eman ta zabal zazu

Universidad del País Vasco
Euskal Herriko Unibertsitatea

**Doktore-tesia**

# GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren garapena eta karakterizazioa altzairuzko eta aluminio-aleaziozko piezen fabrikaziorako


Aurkeztua:

**Eider Aldalur Urresti**

**Ingeniaritza Mekanikoa Saila**

**Euskal Herriko Unibertsitatea – Universidad del País Vasco**

Zuzendariak:

**Prof. Dr. Aitzol Lamikiz Mentxaka**

**Dr. Alfredo Suárez González**


Bilbo, 2021ko abendua

*Nire gurasoei, Amaia eta Koldo.*

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

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

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

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

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

*A todos ellos, muchas gracias.*

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

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

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

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

*Mila esker guztioi!*

# Laburpena

Fabrikazio-gehigarriak gero eta interes handiagoa sortu du azken urteotan. Teknologia mota horretan, hiru dimentsioko diseinu batetik abiatuta, objektu fisiko bat fabrikatzen da, geruzaz geruza materiala gehituz, bloke trinko batetik kendu ordez. Fabrikazio-gehigarri metalikoaren barruan, erabilitako materialaren eta energia-iturri motaren arabera, hainbat teknologia ezberdin bereizten dira, bakoitzak dituen murrizpenekin materialei, kalitateari, produktibitateari eta eraginkortasunari dagokionez.

Fabrikazio-gehigarri metalikoko teknologien artean, doktore-tesi hau WAAM *(Wire Arc Additive Manufacturing*) izeneko teknologiaren garapenerako burutu da. Teknologia hori Energiaren ezartze zuzena (*DED, Direct Energy Deposition*) kategoriaren barruan sailkatzen da. WAAM teknologiak arku elektrikoa erabiltzen du prozesuan hari metaliko gisara elikatutako materiala urtzeko, eta nahi den geometria jarraituz ezartzen du. Zehazki, doktore-tesi honetan, merkatuan aurki daitezkeen WAAM teknologietatik, GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) teknologian oinarritutako WAAM prozesua sakon aztertzen da.

Azken prozesu horrek interes berezia sortzen du, konplexutasun geometriko ertain eta altua duten pieza handiak fabrikatzeko aukera ematen baitu, koste murritzarekin, ingeniaritzako hainbat materialetan eta ezarpen-tasa handiak lortuz. Gainera, teknologia horrekin pieza higatuak konpontzea edo oinarrizko egiturei xehetasunak eranstea ere posible da, teknologia horren gaitasunak are gehiago hobetuz. Horregatik guztiagatik, azken urteotan, WAAM teknologiak gero eta interes handiagoa sortu du industria-fabrikazioan, eta 4.0 Industriaren funtsezko zutabeetako bat izango dela aurreikusten da.

Doktore-tesi hau ADDILAN S.A. enpresarekin lankidetzan egindako HARITIVE eta HARI-PLUS proiektuen barnean kokatzen da. Konkretuki, ADDILAN enpresa, makina-erramintaren sektoreko bi enpresa garrantzitsuren baturatik sortu zen eta WAAM teknologiaren bidez piezak fabrikatzeko makina berria merkaturatu berri du. Proiektu horien helburua WAAM prozesuen ezagutzan sakontzea izan da, horietako bakoitzaren onurak zehaztuz eta merkatuari produktu aurreratuago bat eskainiz.

Doktore-tesi honetan erabilitako material nagusiak ER70S-6 aleazio txikiko altzairua eta 5356 aluminio-aleazioa izan dira. Izan ere, bi material horiek asko erabiltzen dira hainbat industriatan, batez ere, eskakizun mekaniko handiegirik gabeko tamaina handiko piezak fabrikatzeko. Hala ere, doktore-tesi honetan lortutako emaitzak eta ondorioak beste burdin-aleazio batzuetara edo beste aluminio-aleazio batzuetara estrapola daitezke.

Lan honetan, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren analisiaren zati esperimentala, doktore-tesian zehar garatu den sistema robotikoan burutu da. Sistema horri, ohiko elementuez gain, monitorizazio- eta kontrol-sistemak ere gehitu zaizkio, horiek funtsezkoak baitira prozesua modu egoki eta kontrolatuan gauzatzeko. Zehazki, doktore-tesi honetan, altuera kontrol bat garatu eta ezarri da, soldaduraren barne-seinaleetan oinarrituta ezarpen-prozesua kontrolatzeko.

Gainera, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren parametro nagusien eragina aztertu da eta altzairu eta aluminio-aleazioentzako funtzionamendu-modu egokienen (GMAW pultsatua, Cold Arc, Force Arc eta AC pultsatua) analisia ere burutu da.

Halaber, ER70S-6 altzairuan, bi ezarpen-estrategia konparatu dira, oszilazio-estrategia eta gainjartze-estrategia, eta 5356 aluminio-aleazioan prozesuaren parametro esanguratsuenen araberako soldadura-kordoi baten zabalera- eta altuera-ereduak diseinatu dira. Gainera, zehaztutako bi materialetan, propietate mekanikoak eta lortutako metalurgia ere aztertu dira.

Azkenik, emaitzak balioztatzeko, lau balioztatze-pieza fabrikatu dira (bi ER70S-6 altzairuzkoak eta beste biak 5356 aluminio-aleaziozkoak) GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua eta garatutako sistema robotikoa erabiliz.

# Edukien aurkibidea

**EDUKIEN AURKIBIDEA ..... 1**

**IRUDIEN AURKIBIDEA ..... 7**

**TAULEN AURKIBIDEA ..... 14**

**AKRONIMOAK ..... 16**

**I. KAPITULUA : SARRERA ..... I-1**

**1 Testuinguru teknologikoa eta industriala ..... I-1**

**2 Doktore-tesiaren planteamendua. Helburuak ..... I-5**

**3 Doktore-tesiaren antolaketa ..... I-6**

**II. KAPITULUA : ARTEARAREN EGOERA ..... II-1**

**1 Fabrikazio-gehigarria ..... II-1**

**2 Fabrikazio-gehigarri metalikoaren barneko sailkapena ..... II-4**

2.1 Hauts-ohearen fusioa (*Power Bed Fusion, PBF*) ..... II-5

2.2 *Binder Jetting* (BJ) ..... II-7

2.3 *Sheet Lamination* (SL) ..... II-8

2.4 Energiaren ezartze zuzena (*Directed Energy Deposition, DED*) ..... II-9

**3 WAAM teknologia ..... II-14**

3.1 Sarrera ..... II-14

3.2 Abantaila eta desabantailak ..... II-16

3.3 WAAM teknologia motak ..... II-19

3.3.1 GTAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua ..... II-19

3.3.2 PAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua ..... II-20

3.3.3 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua ..... II-20

**4 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua ..... II-21**

4.1 Materialaren transferentzia eta funtzionamendu-moduak ..... II-21

4.1.1 GMAW estandarra eta GMAW pultsatua ..... II-23

4.1.2 Cold Arc ..... II-23

4.1.3 Force Arc ..... II-25
4.1.4 AC pultsatua ..... II-25
4.2 Abantaila eta desabantailak ..... II-26
4.3 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuko parametroen nagusiak ..... II-27
4.4 Ezarpen-estrategiak ..... II-28
4.5 Bero-ekarpena materialaren ezarpen-prozesuan ..... II-29
4.6 GMAW prozesuan oinarritutako WAAM teknologia hobetuak ..... II-30
4.6.1 Bi GMAW elektrodo tandemean kokatuak ..... II-30
4.6.2 GMAW/GTAW prozesu hibridoa ..... II-31
4.6.3 GMAW-HW prozesua ..... II-32
**5 Altzairuak eta aluminio-aleazioak ..... II-33**
5.1 Altzairuak ..... II-34
5.2 Aluminio-aleazioak ..... II-36
**6 WAAM teknologiadun makina komertzialak ..... II-40**
6.1 ADDILAN ..... II-40
6.2 GEFERTEC ..... II-41
6.3 AML3D ..... II-42
6.4 RAMLAB ..... II-42
6.5 Lincoln Electric ..... II-43
6.6 MX3D ..... II-43
6.7 Cranfield unibertsitatea ..... II-43
**7 WAAM prozesuaren monitorizazioa eta kontrola ..... II-44**
**8 WAAM teknologiarako CAD diseinua eta ezarpen-ibilbideen diseinua II-48**

**III. KAPITULUA : ALTUERA KONTROLA DARAMAN GMAW TEKNOLOGIAN OINARRITUTAKO WAAM PROZESURAKO SISTEMA ROBOTIKO BATEN GARAPENA ..... III-1**

**1 Sarrera ..... III-1**
**2 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesurako sistema robotikoaren deskribapena ..... III-1**

**3 GMAW sinergikoan oinarritutako WAAM prozesuaren parametro doigarriak ..... III-4**

**4 Titan XQ 400 AC puls (EWM) soldadura-iturriaren funtzionamendu-modu sinergikoak ..... III-7**

**5 Altuera kontrolaren garapena..... III-13**

5.1 Aurrekariak..... III-14

5.2 Altuera kontrolaren deskribapena..... III-17

5.3 Altuera kontrolaren balioztatzea: edalontzi sinple baten fabrikazioa III-21

**6 Ondorioak..... III-23**

**IV. KAPITULUA : GMAW TEKNOLOGIAN OINARRITUTAKO WAAM PROZESUA: ER70S-6 ALTZAIRUA .....IV-1**

**1 Sarrera.....IV-1**

**2 Materialak eta metodoak.....IV-1**

2.1 Materialak.....IV-1

2.2 Ekipamendua .....IV-2

2.3 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren parametro eta funtzionamendu-modu nagusien analisia: Kordoi sinpleak .....IV-2

2.3.1 Intentsitate- eta tentsio-seinaleetan hariaren elikatze-abiaduraren (WFR) eta Stick-outaren eraginaren analisia.....IV-2

2.3.2 Lortutako kordoien geometrian aitzinamendu-abiaduraren (TS) eraginaren analisia .....IV-3

2.3.3 Penetrazioan, diluzioan, mikroegituran eta gogortasunean funtzionamendu-modu nagusien eraginaren analisia .....IV-4

2.4 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez fabrikatutako horma sinplearen analisia.....IV-4

2.5 Oszilazio- eta gainjartze-estrategien alderaketa GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan.....IV-5

2.5.1 Parametroen aukeraketarako aurretiazko ikerketa .....IV-5

2.5.2 Hormak fabrikatzeko parametroak.....IV-8

2.6 Karakterizazio metalurgiko eta mekanikorako metodoak .....IV-10

**3 Emaitzak eta eztabaida.....IV-12**

3.1 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren parametro eta funtzionamendu-modu nagusien analisia: Kordoi sinpleak ..... IV-12

3.1.1 Intentsitate- eta tentsio-seinaleetan hariaren elikatze-abiaduraren (WFR) eta Stick-outaren eraginaren analisia ..... IV-12

3.1.2 Lortutako kordoien geometrian aitzinamendu-abiaduraren (TS) eraginaren analisia ..... IV-14

3.1.3 Penetrazioan, diluzioan, mikroegituran eta gogortasunean funtzionamendu-modu nagusien eraginaren analisia ..... IV-16

3.2 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez fabrikatutako horma sinple baten analisia ..... IV-20

3.2.1 Makrogituraren analisia ..... IV-20

3.2.2 Mikroegituraren analisia ..... IV-21

3.2.3 Geometriaren analisia ..... IV-23

3.3 Oszilazio- eta gainjartze-estrategien alderaketa GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan ..... IV-25

3.3.1 Materialaren ezarpena eta geruzako hazkundea ..... IV-25

3.3.2 Bero-ekarpenaren analisia *(Heat input, HI)* ..... IV-31

3.3.3 Hozte- eta fabrikazio-denboren analisia ..... IV-34

3.3.4 Makroegitura, mikroegitura eta gogortasunak ..... IV-36

3.3.5 Propietate mekanikoen ebaluazioa ..... IV-42

3.3.6 Geometriaren analisia ..... IV-45

3.4 Balioztatzea ..... IV-49

3.4.1 Horma fineko moldea ..... IV-49

3.4.2 Konpresore baten alabedun pieza eredua ..... IV-53

**4 Ondorioak ..... IV-59**

**V. KAPITULUA : GMAW TEKNOLOGIAN OINARRITUTAKO WAAM PROZESUA: 5356 ALUMINIO-ALEAZIOA ..... V-1**

**1 Sarrera ..... V-1**

**2 Materialak eta metodoak ..... V-1**

2.1 Materialak ..... V-1

2.2 Ekipamendua ..... V-2

2.3 Aluminio-aleazioetarako GMAW funtzionamendu-modu sinergikoen analisia: Kordoiak eta horma sinpleak.....V-2

2.4 Mikroegituraren eta propietate mekanikoen analisia: Horma gainjarria V-4

2.5 Karakterizazio metalurgiko eta mekanikorako metodoak .....V-4

**3 Emaitzak eta eztabaida.....V-5**

3.1 Aluminio-aleazioentzat funtzionamendu-modu sinergikoak.....V-5

3.2 Transferitutako tanten tamainaren azterketa.....V-7

3.3 Aluminio-aleazioetarako GMAW funtzionamendu-modu sinergikoen analisia: kordoi bakarren sorta .....V-7

3.3.1 Bero-ekarpenaren analisia *(Heat input, HI)*.....V-7

3.3.2 Zeharkako sekzioen eta penetrazioen analisia .....V-9

3.3.3 Kordoien zabalera eta altuera ereduak.....V-13

3.4 Aluminio-aleazioetarako GMAW funtzionamendu-modu sinergikoen analisia: Horma sinpleak .....V-14

3.4.1 Ezarritako kordoien forma geometrikoa .....V-14

3.4.2 Mikroegitura .....V-16

3.4.3 Porositatearen analisia .....V-19

3.5 Mikroegituraren eta propietate mekanikoen analisia: Gainjarritako horma.....V-21

3.5.1 Mikroegitura .....V-21

3.5.2 Gogortasunak .....V-23

3.5.3 Propietate mekanikoak .....V-23

3.6 Balioztatzea.....V-23

3.6.1 Karbono-zuntzezko osagaiak fabrikatzeko moldea.....V-24

3.6.2 Aluminiozko dorreak .....V-28

**4 Ondorioak.....V-32**

**VI. KAPITULUA : EKARPENAK ETA LANAREN ETORKIZUNEKO ILDOAK .....VI-1**

**1 Ekarpenak .....VI-1**

**2 Etorkizuneko ildoak.....VI-4**

**ERREFERENTZIAK ..... 1**

# Irudien aurkibidea

*I-1. irudia. 4.0 Industriaren kontzeptua fabrikazio-gehigarriari aplikatua [INTEGRADDE, 2021]* ..... I-2

*I-2. irudia. Covid-19aren pandemia kontuan hartuta, fabrikazio-gehigarri metalikoaren merkatuaren hazkundearen bilakaeraren hainbat aurreikusitako agertoki [AMPOWER, 2020]* ..... I-3

*I-3. irudia. Mundu mailako WAAM fabrikazio teknologiaren garatzaile nagusiak, teknologietan eta materialetan banatuak* ..... I-4

*I-4. irudia. Doktore-tesi honi lotutako proiektuen aurrekariak eta bilakaera* ..... I-5

*II-1. irudia. Hauts-ohearen fusio (PBF) teknologien errepresentazioa* ..... II-6

*II-2. irudia. Binder Jetting prozesuaren adierazpen eskematikoa ([Pragana, 2021] lanetik egokitua)* ..... II-8

*II-3. irudia. Sheet Lamination prozesuaren adierazpen eskematikoa ([Pragana, 2021] lanetik egokitua)* ..... II-9

*II-4. irudia. DED teknologien adierazpen eskematikoa: a) LMD teknologia; b) EBAM teknologia; c) WAAM teknologia. c.1) GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua; c.2) GTAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua; c.3) WAAM teknologian oinarritutako PAW prozesua ([Pragana, 2021] lanetik egokitua)* ..... II-11

*II-5. irudia. GMAW prozesuaren errepresentazio grafikoa ([Hu, 2021] lanetik egokitua)* ..... II-21

*II-6. irudia. Materialaren transferentzia mota nagusiak* ..... II-21

*II-7. irudia. Prozesuaren errepresentazio grafikoa eta intentsitate eta tentsio-seinaleen forma Cold Arc funtzionamendu-moduan ([EWM, 2021] lanetik egokitua)* ..... II-24

*II-8. irudia. Hariaren elikatze kontrolaren fase nagusiak CMT prozesuan [Prado-Cerqueira, 2017]* ..... II-24

*II-9. irudia. Intentsitate-seinalearen forma AC pultsatu funtzionamendu-moduan [EWM, 2021]* ..... II-25

*II-10. irudia. Bi GMAW elektrododun tandem prozesua [Yao, 2016]* ..... II-31

*II-11. irudia. GMAW/GTAW prozesu hibridoa, GTAW zuzia bypass-an sartuta ([Yang, 2016] lanetik egokitua)* ..... II-32

*II-12. irudia. GMAW-HW prozesuaren errepresentazio grafikoa ([Günther, 2018-a] lanetik egokitua)* ..... II-32

*II-13. irudia. (a) MX3D enpresak altzairu herdoilgaitzean fabrikatutako zubia [MX3D, 2021], (b) Barne kanalekin altzairuan fabrikatutako pieza [Lincoln Electric Additive, 2021], (c) Norabide anitzeko 10 tutu elkartzen dituen konektorea YHJ507M harian fabrikatua [Yili, 2018], (d) Altzairuan barne kanalekin fabrikatutako pieza [Lincoln Electric Additive, 2021], (e) Altzairuan fabrikatutako hondeatzaile baten besoa osatzen duen pieza [Greer, 2019]* ..... II-36

*II-14. irudia. (a) Aluminioan fabrikatutako eta topologikoki optimiazatutako beso robotiko baten pieza [MX3D, 2021], (b) Aluminioan ezarpen-estrategien optimizazioarako RASM systems enpresak fabrikatutako pieza [Ma, 2019], (c) 10 m luze den WAAM bidez fabrikatutako aluminiozko pieza [WAAMMAT, 2021], (d) 2,5 m luze den aluminiozko nerbioa WAAM bidez fabrikatua 500kg-tik gorako materialaren aurrezkiak lortuaz [Martina, 2015-a], (e) Nikel-aluminio-brontze aleazioan WAAM bidez fabrikatutako itsasontziko helizea [RAMLAB, 2021]* II-39

*II-15. irudia. ADDILAN v.0.1 makina [ADDILAN, 2021]* ..... II-41

*II-16. irudia. WAAM GTArc603 makina [GEFERTEC, 2021]* ..... II-41

*II-17. irudia. ARCEMY makina GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez piezak fabrikatzeko [AML3D, 2021]* ..... II-42

*II-18. irudia. RAMLAB makina Damen Shipyard taldearentzat itsasontzi baten helizearen fabrikazio-prozesuan [RAMLAB, 2021]* ..... II-42

*II-19. irudia. Lincoln Electric enpresaren sistema robot antropomorfiko batean oinarritua* [*Lincoln Electric Additive, 2021]*..... II-43

*II-20. irudia. Eraikuntzaren sektorean MX3D enpresaren aplikazioen adibideak [MX3D, 2021]* ..... II-43

*II-21. irudia. WAAM zelula robotikoa, GMAW prozesuan oinarritua, paraleloan lan egiten duten 2 robotekin produktibitatea handitzeko [WAAMMAT, 2021]*..... II-44

*II-22. irudia. WAAM prozesurako monitorizazio- eta kontrol-sistemak ([Xia, 2020] lanetik egokitua)* ..... II-46

*II-23. irudia. WAAM prozesurako CCD kameretan oinarritutako kontrol-sistema baten diagrama eskematikoa [Xiong, 2016]* ..... II-47

*II-24. irudia. Beso robotiko baten birdiseinua optimizazio topologikoaren bidez [MX3D, 2021]* ..... II-49

*II-25. irudia. WAAM sistema integralaren kontzeptua ([Wu, 2018-b] lanetik egokitua)*..... II-50

*III-1. irudia. Erabilitako robot antropomorfikoa eta soldadura-zuziaren errepresentazio zehatza (Set-up)*..... III-2

*III-2. irudia. Robotaren eskaneatze posizioa* ..... III-3

*III-3. irudia. Garatutako sistema robotikorako erabilitako komunikazio-protokoloaren eskema* ..... III-4

*III-4. irudia. Stick-outaren, arkuaren luzeraren eta arkuaren zabaleraren definizioa* ..... III-6

*III-5. irudia. GMAW a) estandarraren eta b) pultsatuaren intentsitate-seinaleak, %20 $CO_2$ - %80 Ar babes-gasa erabilita altzairuetan, 1,2 mm-ko hari-diametroarekin (Job 9) eta 5 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurekin* ..... III-9

*III-6. irudia. (a) GMAW pultsatu funtzionamendu-moduaren intentsitate-seinale teorikoaren forma, %20 $CO_2$ - %80 Ar babes-gasarekin altzairuetan, hariaren diametroa 1,2 mm-koa (Job 9) eta hariaren elikatze-abiadura 8 m/min-koa denean; (b) Material urtuaren tanta bat eratzeko prozesua eta intentsitate-seinalearekin prozesu honek duen korrelazioa* ..... III-10

*III-7. irudia. Intentsitate-seinale erreala GMAW pultsatu funtzionamendu-modurako altzairuentzat 20% $CO_2$ - 80% Ar gasarentzat, 1,2 mm-ko hariaren diametroarekin (Job 9) eta 8 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin* ..... III-10

*III-8. irudia. 3 mm-ko lodiera duen edalontzia Cold Arc moduarekin fabrikatua altzairu herdoilgaitzean, 1 mm-ko hari diametroarekin.* ..... III-11

*III-9. irudia. Cold Arc moduaren intentsitate-seinalea, altzairuetan, %20 $CO_2$ - %80 Ar babes-gasarekin, 1,2 mm-ko hariaren diametroarekin (Job 194) eta 5 m/min hariaren elikatze-abiadurarekin* ..... III-11

*III-10. irudia. Force Arc a) estandarraren eta b) pultsatuaren intentsitate-seinaleak altzairuetan %20 $CO_2$ - %80 Ar babes-gasarekin, 1,2 mm-ko hariaren diametroarekin (Job 180) eta 5 m/min hariaren elikatze-abiadurarekin* ..... III-12

*III-11. irudia. WFR = 8 m/min eta Stick-out desberdinak dituzten kordoien fabrikazioan zehar jasotako intentsitate-seinaleak* ..... III-14

*III-12. irudia. WFR = 8 m/min eta Stick-out desberdinak dituzten kordoien fabrikazioan zehar jasotako intentsitate-seinaleen FFT grafikak* ..... III-15

*III-13. irudia. WFR = 16 m/min eta Stick-out desberdinak dituzten kordoien fabrikazioan zehar jasotako intentsitate-seinaleak eta euren FFT grafikak* .. III-15

*III-14. irudia. 5 hormen fabrikazioan zehar oinarri-materialaren ondulazioa* . III-16

*III-15. irudia. Gainjarritako hiru kordoi dituzten 5 hormen 23. geruzaren fabrikazioan zehar eskuratutako intentsitate-seinalearen zati bat* ..... III-16

*III-16. irudia. Bi hormetako geruza bakoitzeko soldadura-kordoien erdiko %60an (a) hariaren elikatze-abiaduraren eta (b) intentsitate-seinaleen batez besteko balioak* ..... III-17

*III-17. irudia. GMAW pultsatu funtzionamendu-modua erabiltzen duten Job-etan eta material desberdinetan hariaren elikatze-abiaduraren eta intentsitatearen arteko erlazioa. Kontuan izan legendan materiala eta Job-a laburbiltzen direla* ..... III-19

*III-18. irudia. 9. Job-aren zuzen teorikoa eta Job honekin fabrikatutako kordoi bakarretan intentsitatearen batez besteko balio errealak* ..... III-19

*III-19. irudia. Altuera kontrolaren diagrama* ..... III-20

*III-20. irudia. Altuera kontrola balioztatzeko egin den edalontziaren fabrikazioan zehar monitorizatutako (a) hariaren elikatze-abiadura, (b) intentsitate eta (c) robotaren altuera balioak* ..... III-22

*III-21. irudia. Altuera kontrola balioztazeko fabrikatutako edalontzia* ..... III-22

*IV-1. irudia. (a) Eskaner laserraren bidez neurtutako 7. kordoiaren profilak, non kordoiaren altuera (h) eta zabalera (w) ikus daitezkeen; (b) 2, 8 eta 13. kordoien itxura* ..... IV-6

*IV-2. irudia. (a) Gainjartze-estrategiaren ibilbidea; (b) Oszilazio-estrategiaren ibilbidea* ..... IV-9

*IV-3. irudia. Bi fabrikazio-estrategietan geruza bakoitzeko bataz besteko intentsitate eta tentsio balioak* ..... IV-10

*IV-4. irudia. Kordoi baten makrografia, gogortasunak neurtzeko eta mikroegitura behatzeko puntuak adierazita* ..... IV-11

*IV-5. irudia. Horma sinplearen makrografia, gogortasunak neurtzeko eta mikroegitura behatzeko puntuak adierazita* ..... IV-11

*IV-6. irudia. Horma oszilatuan eta gainjarrian propietate mekanikoak neurtzeko probeten banaketa* ..... IV-12

*IV-7. irudia. Hariaren elikatze-abiaduraren eragina intentsitatearen eta tentsioaren batez besteko balioetan a) GMAW pultsatu moduan, b) Force Arc moduan eta c) Cold Arc moduan* ..... IV-13

*IV-8. irudia. (a) 2.7 kordoiaren laser bidez eskuratutako puntu-hodeiaren irudikapen grafikoa; (b) 2.8 kordoiaren laser bidez eskuratutako puntu-hodeiaren irudikapen grafikoa; (c) 16 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin fabrikatutako soldadura-kordoiak (2.7, 2.8 eta 2.9 kordoiak) eta (d) 2.9 kordoiaren laser bidez eskuratutako puntu-hodeiaren irudikapen grafikoa* ..... IV-15

*IV-9. irudia. Horma sinplearen makrografia eta ezarritako lehen kordoiaren xehetasuna* ..... IV-21

*IV-10. irudia. IV-5. irudian adierazitako horma sinpleko puntuetako mikroegiturak* ..... IV-22

*IV-11. irudia (a) Kordoi bikoitien ezarpenaren ondoren laser bidez lortutako puntu-hodeien irudikapen grafikoa; (b) kordoi bakoitien ezarpenaren ondoren laser bidez lortutako puntu-hodeien irudikapen grafikoa eta lortutako horma efektiboa (beltzez)* .....IV-24

*IV-12. irudia. Kontrol-bolumenaren definizioa*.....IV-25

*IV-13. irudia. Kontrol-bolumenaren barnean, horma oszilatuaren eta gainjarriaren fabrikazioan zuziak jarraitutako ibilbidea eta tanten ezarpena* .....IV-26

*IV-14. irudia. Zuziaren ibilbidea eta abiadura-eremua horma oszilatuaren fabrikazioan* .....IV-27

*IV-15. irudia. 25. eta 26. geruzen geruzako hazkunde bolumetrikoaren kalkulua bi hormetan* .....IV-28

*IV-16. irudia. Geruzako batez besteko hazkunde bolumetrikoa. Kontuan izan errore-barrek balio maximoak eta minimoak adierazten dituztela* .....IV-29

*IV-17. irudia. Hormen altuera Z ardatzean, bi hormetan geruzako hazkunde bolumetrikoaren bilakaera irudikatzeko neurtua* .....IV-30

*IV-18. irudia. (goian) Lehenengo kordoiaren goitik begiratutako itxura, ibilbide oszilatorioaren uhin-luzeraren ondorioz alboetan markak ikus daitezkeelarik; (behean) lauki gorriak mugatutako bost marken luminantzia-balioak*.....IV-31

*IV-19. irudia. Horma (a) gainjarria eta (b) oszilatua fabrikatzean prozesuan hornitzen den energia*.....IV-32

*IV-20. irudia. (a) Tenperaturaren bilakaera gainjarritako hormaren zortzigarren geruzaren barruko kordoien arteko hozte-denboran; (b) Geruzen arteko hozte-denboraren bilakaera gainjarritako horman zehar; (c) Tenperaturaren bilakaera oszilatutako hormaren lehenengo zortzi geruzen arteko hozte-denboran; (d) Geruzen arteko hozte-denboraren bilakaera horma oszilatuan.*.....IV-35

*IV-21. irudia (goian) Horma gainjarriaren eta horma oszilaturen mikroegituraren analisirako hartutako erreferentzia sistemaren irudikapena; (ezkerrean) horma oszilatuaren mikroegitura YZ eta XY planoetan; (eskuinean) hormaren gainjarriaren mikroegitura YZ eta XY planoetan*.....IV-37

*IV-22. irudia. (ezkerrean) Zeharkako norabidean (XZ planoan) gainjarritako hormaren goialdeko eta behealdeko makroegiturak; (eskuinean) gainjarritako hormaren mikroegiturak. Kontuan izan mikrografiak makrografietan lauki gorriekin markatutako eremuetan atera direla*.....IV-39

*IV-23. irudia. (ezkerrean) Zeharkako norabidean (XZ planoan) oszilazio hormaren goialdeko eta behealdeko makroegiturak; (eskuinean) oszilazio hormaren mikroegiturak. Kontuan izan mikrografiak makrografietan lauki gorriekin markatutako eremuetan atera direla*.....IV-41

*IV-24. irudia. Horma oszilatu eta gainjarrietatik ateratako probeta (a) horizontalen eta (b) bertikalen tentsio-deformazio kurbak* .....IV-44

*IV-25. irudia. Profilen zeharkako sekzioak eta lautasunaren kalkulua (a) oszilazio-estrategiaren eta (b) estrategia gainjarriaren bidez fabrikatutako hormen goiko gainazaletan* .....IV-47

*IV-26. irudia. Estrategia (a) oszilatu eta (b) gainjarriaren bidez fabrikatutako hormen zeharkako azalera eraginkorraren kalkulua*.....IV-48

*IV-27. irudia. Bi estrategiekin egindako hormen zeharkako azalera eraginkorra, altuera eta zabalera efektiboaren arabera*.....IV-49

*IV-28. irudia. Moldearen diseinua neurri nagusiak mm-tan adierazita*.....IV-50

*IV-29. irudia. Horma fineko moldea ER70S-6 altzairuan fabrikatua* .....IV-51

*IV-30. irudia. Moldearen fabrikazioan monitorizatutako intentsitatea, tentsioa eta aitzinamendu-abiadura eta kalkulatutako energia* .....IV-52

*IV-31. irudia. Piezaren kanpoko azaleko puntu neurtuak (puntu beltzak) eta moldearen forma teorikoa*.....IV-53

*IV-32. irudia. a) alabedun piezaren jatorrizko diseinua; b) alabedun piezaren muntaia (arrosaz dagoen pieza da alabedun pieza)*.....IV-54

*IV-33. irudia. (Ezk.) Albedun piezaren birdiseinua WAAM teknologiarako; (esk.) alabedun piezaren aurreforma WAAM bidez fabrikatzeko* .....IV-55

*IV-34. irudia. Alabedun balioztatze pieza fabrikatzeko sortutako ibilbideak* .IV-55

*IV-35. irudia. Erdialdeko zatiko ibilbideak: (ezk.) geruza bikoitietako ibilbideak; (esk.) geruza bakoitietako ibilbideak* .....IV-57

*IV-36. irudia. Fabrikatutako eta mekanizatutako alabedun pieza* .....IV-58

*IV-37. irudia. Gehiegizko bero metaketa pieza 10 mm-ko lodierako oinarri-materialaren gainean fabrikatzean* .....IV-58

*V-1. irudia. (ezk.) Horma gainjarrian probeten banaketa; (esk.) fabrikatutako horma* .....V-5

*V-2. irudia. WFR=8 m/min-rekin intentsitate-seinaleak: a) GMAW pultsatua, b) Cold Arc eta c) AC pultsatua* .....V-6

*V-3. irudia. (a) GMAW pultsatu, Cold Arc eta AC pultsatu moduetako intentsitate-seinaleak gainjarrita; (b) hiru moduetako maiztasun-seinaleak gainjarrita* .....V-6

*V-4. irudia. Ratioaren arabera bero-ekarpenaren (HI) balioak hiru funtzionamendu-moduekin eta (a) 4 m/min-ko (1-4 kasuak) eta (b) 8 m/min-ko (5-8 kasuak) hariaren elikatze-abiadurekin egindako kordoietan*.....V-9

*V-5. irudia. (a) GMAW pultsatu, (b) Cold Arc eta (c) AC pultsatu hormen makrografiak. (a.1) Hormen ertzak zehazteko tratatutako makrografia* .....V-15

*V-6. irudia. Hormaren zabalera (WW) hormaren altueran (Z ardatza) zehar adierazia, Z ardatzaren balioa nulua izanik hormen goialdean. Kalkulatutako WW-ren balioak eta gainazaleko ondulazio balioak ere ageri dira* .....V-16

*V-7. irudia. (a) GMAW pultsatu, (b) Cold Arc eta (c) AC pultsatu moduen bidez fabrikatutako hormen erdialdeko gunearen mikroegitura: 1) Mikroskopio optikoaren bidez behatutako mikroegitura; 2) EBSD mapak* .....V-18

*V-8. irudia. (a) GMAW pultsatu, (b) Cold Arc eta (c) AC pultsatu hormen erdiko zeharkako sekzioen EBSD mapetako aleen tamainaren banaketa* .....V-19

*V-9. irudia. Porositatea aztertzeko eraso kimikorik gabeko mikrografiak: (a) GMAW pultsatu horma; (b) Cold Arc horma; (c) AC pultsatu horma. (1) hormen goiko gunea; (2) hormen erdiko gunea; (3) hormen beheko gunea*.....V-20

*V-10. irudia. GMAW pultsatu, Cold Arc eta AC pultsatu funtzionamendu-moduekin lortutako batez besteko porositate balioak*.....V-21

*V-11. irudia. Gainjarritako hormaren mikroegitura XZ, YZ eta XY planoetan handipen ezberdinekin (x50, x200)* .....V-22

*V-12. irudia. Aluminiozko moldearen bidez karbono-zuntzean fabrikatu beharreko piezaren diseinua* .....V-24

*V-13. irudia. Moldearen diseinua, kotak mm-tan* .....V-25

*V-14. irudia. Moldearen ezarpen-ibilbidea eta -sekuentzia*.....V-25

*V-15. irudia. WAAM bidez fabrikatutako aluminiozko moldea (ezk.) fabrikaziotik atera den bezala eta (esk.) azken mekanizazioaren ondoren* .....V-27

*V-16. irudia. Dorreak diseinatzeko eta fabrikatzeko prozesua*.....V-29

*V-17. irudia. Aluminiozko dorrean ondoz ondoko bi geruzaren ezarpen-ibilbideak* .....V-31

*V-18. irudia. Matrizialki fabrikatutako lau dorreak*.....V-31

*VI-1. irudia. Doktore-tesi honetan garatu den sistema robotikoaren zuziaren irudikapena, HW gehituta* .....VI-5

# Taulen aurkibidea

*II-1. taula. SLM eta EBM teknologien ezaugarri nagusiak* ..... II-7

*II-2. taula. Fabrikazio-gehigarri metalikoko teknologien arteko konparaketa* . II-13

*II-3. taula. Hainbat estrategiaren bidez fabrikatutako hormak definitzeko erabilitako nomenklaturaren laburpena* ..... II-28

*II-4. taula. ER70S-6 altzairu gozoan, autore ezberdinek ezarpen-estrategia ezberdinen bidez, WAAM teknologiarekin, fabrikatutako piezen propietate mekanikoen alderaketa* ..... II-35

*II-5. taula. Babes-gas gisa purutasun altuko nitrogenoa eta argona erabilita WAAM teknologia bidez fabrikatutako 5356 aluminio-aleazioaren propietate mekanikoak.* ..... II-38

*III-1. taula. GMAW sinergikoan oinarritutako WAAM prozesuaren parametro nagusiak* ..... III-5

*III-2. taula. Titan XQ 400 AC puls (EWM) soldadura-iturrian altzairuetarako erabiltzen diren funtzionamendu-modu nagusiak* ..... III-13

*IV-1. taula. ER70S-6 altzairuzko hariaren konposizio kimikoa pisuan (%)* .....IV-1

*IV-2. taula. Hariaren elikatze-abiaduraren eragina ikusteko fabrikatutako soldadura-kordoien parametroak*.....IV-3

*IV-3. taula. Funtzionamendu-modu bakoitzaren mikroegitura, diluzioa eta penetrazioa aztertzeko egindako kordoien fabrikazio-parametroak* .....IV-4

*IV-4. taula. ER70S-6 altzairuan oszilazio- eta gainjartze-estrategiak erabilita hormak fabrikatzeko parametroak hautatzeko entsegua*.....IV-5

*IV-5. taula. Neurtutako eta kalkulatutako kordoien geometria definitzeko balioak* .....IV-7

*IV-6. taula. Horma oszilatuaren eta gainjarriaren fabrikazio-parametroak*....IV-10

*IV-7. taula. Aitzinamendu-abiaduraren eragina zehazteko kordoiak fabrikatzeko erabilitako parametroak eta eskaner laserraren bidez neurtutako kordoien zabalera eta altuera balioak* .....IV-14

*IV-8. taula. Kordoien zeharkako makrografiak, diluzioa eta kordoien penetrazioa neurtuta funtzionamendu-moduaren eragina ikusteko* .....IV-17

*IV-9.taula. 3.1 kordoiaren mikrografiak, IV-4. irudian definitutako bost puntuetan eta puntu horiei dagozkien gogortasun balioak* .....IV-19

*IV-10. taula. Geruzako hazkundearekin erlazionatutako parametroak bi hormetan* .....IV-30

*IV-11. taula. Bi hormetan bero-ekarpenarekin erlazionatutako parametroak*IV-33

*IV-12. taula. Fabrikazio-denborak* .....IV-36

*IV-13. taula. Fabrikatutako hormen gogortasun balioak* .....IV-42

*IV-14. taula. Fabrikatutako bi hormetako zeharkako norabideko gogortasunaren bilakaeraren azterketa* .....IV-42

*IV-15. taula. Charpy entsegutik eta trakzio-saiakuntzetatik bi hormetan lortutako emaitzen batez besteko balioak eta desbideratze estandarrak. Hariaren hornitzaileak aurrez definitutako material soldatuaren balio mekanikoak ere adierazten dira alderaketarako* .....IV-45

*IV-16. taula. Horma fineko moldearen fabrikaziorako erabilitako parametroak* IV-51

*IV-17. taula. Alabedun balioztatze-piezaren fabrikazio parametroak*.....IV-57

*V-1. taula. Al5356 hariaren konposizioa pisuan (%)* .....V-2

*V-2. taula. Kordoi bakarreko sortaren fabrikazio-parametroak alderatutako hiru funtzionamendu-moduetarako: GMAW pultsatua, Cold Arc eta AC pultsatua*.V-3

*V-3. taula. Horma gainjarriaren fabrikazio-parametroak* .....V-4

*V-4. taula. Hiru funtzionamendu-moduen bidez fabrikatutako kordoi bakarretarako, hariaren elikatze-abiadura maila bakoitzerako intentsitatearen, tentsioaren eta transferitutako tanten bolumenaren balioak* .....V-8

*V-5. taula. WFR = 4 m/min duten kordoien zeharkako sekzioak hiru funtzionamendu-moduetan*.....V-10

*V-6. taula. WFR = 8 m/min duten kordoien zeharkako sekzioak hiru funtzionamendu-moduetan*.....V-11

*V-7. taula. Hiru funtzionamendu-moduekin egindako kordoien zabalera, altuera eta penetrazio balioak* .....V-12

*V-8. taula. Horma gainjarriaren gogortasun balioen emaitzak*.....V-23

*V-9. taula. 5356 aluminio-aleaziozko horma gainjarriaren trakzio-saiakuntzatik eta Charpy entsegutik lortutako balioak* .....V-23

*V-10. taula. 5356 aluminio-aleaziozko moldearen fabrikazio-parametroak* ...V-27

*V-11. taula. Diseinu originalaren, FGrako topologikoki optimizatutako birdiseinuaren eta WAAMerako topologikoki optimizatutako bi birdiseinuen pisuen alderaketak* .....V-29

*V-12. taula. Dorre bakarra eta lau dorre matrizialak fabrikatzeko parametroak*.V-30

# Akronimoak

| | |
|---|---|
| FG | Fabrikazio-gehigarria |
| ASTM | American Society for Testing and Materials |
| CAD | Ordenagailuz sortutako diseinua (*Computer-Aided Design*) |
| PBF | Hauts-ohearen fusioa (*Power Bed Fusion*) |
| DED | Energiaren ezartze zuzena (*Direct Energy Deposition*) |
| BJ | Binder Jetting |
| SL | Sheet Lamination |
| ME | Material Extrusion |
| MJ | Material Jetting |
| VP | Estereolitografia (*Vat Photopolymerization*) |
| SLM | Laser bidezko fusio selektiboa (*Selective Laser Melting*) |
| EBM | Elektroi-sorta bidezko fusioa (*Electron Beam Melting*) |
| DMLS | Metalen laser bidezko sinterizazio zuzena (*Direct Metal Laser Sintering*) |
| LOM | Laminated Object Manufacturing |
| CBAM | Composite Based Additive Manufacturing |
| UAM | Ultrasonic Additive Manufacturing |
| LMD | Laser Metal Deposition |
| EBAM | Electron Beam Additive Manufacturing |
| WAAM | Arku eta hari bidezko fabrikazio-gehigarriko prozesua (Wire Arc Additive Manufacturing) |
| NNS | Near Net Shape |
| WFR | Hariaren elikatze-abiadura (*Wire Feed Rate*) |
| TS | Aitzinamendu-abiadura (*Travel Speed*) |
| GMAW | Gas Metal Arc Welding |
| GTAW | Gas Tungsten Arc Welding |
| PAW | Plasma Arc Welding |
| CMT | Cold Metal Transfer |
| HW | Hari beroa (*Hot Wire*) |

| | |
|---|---|
| CAM | Ordenagailuz lagundutako fabrikazioa (*Computer-Aided Manufacturing*) |
| DR | Ezarpen-tasa (*Deposition Rate*) |
| DPM | Dynamic Path Modification |
| HAZ | Termikoki kaltetutako zonaldea *(Heat Affected Zone)* |
| EG | Ezaugarri geometriko |
| OVL | Gainjarria (*Overlapped*) |
| OSC | Oszilatua (*Oscillated*) |
| HI | Bero-ekarpena (Heat Input) |
| UTS | Haustura-tentsioa (*Ultimate Tensile Strength*) |
| YS | Limite elastikoa (*Yield Strength*) |
| EBSD | Elektroien atzerakadan oinarritutako difrakzioa azterketa (Electron Back-Scattered Diffraction) |
| PSD | Potentzia dentsitate espektrala (Power Spectral Density) |
| WW | Hormaren zabalera (Wall Width) |

# *I. KAPITULUA*

# I. KAPITULUA: SARRERA

## 1 Testuinguru teknologikoa eta industriala

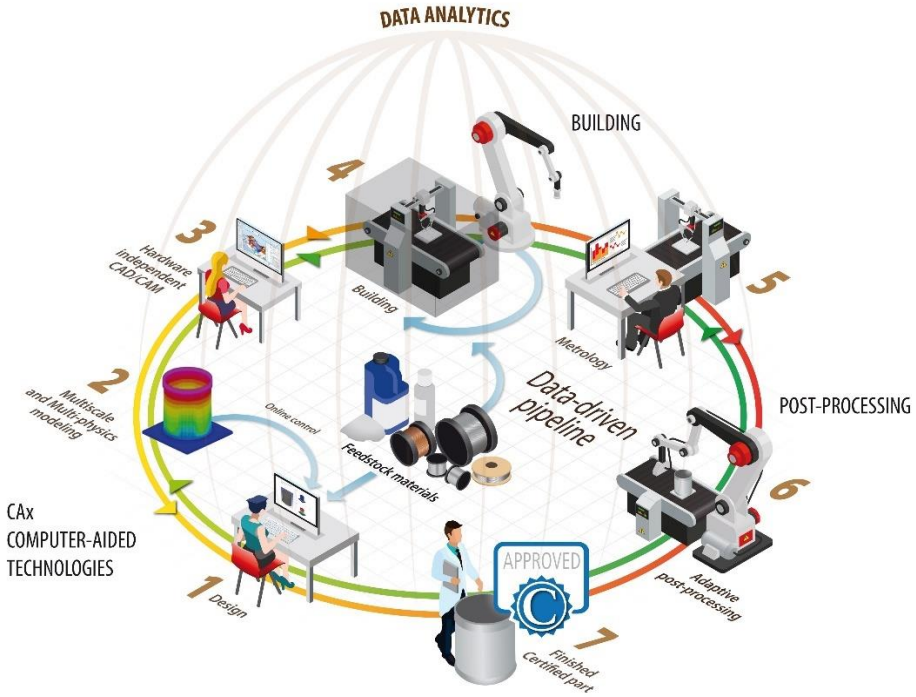
Fabrikazio-gehigarria (FG) etorkizun handia izango duela aurreikusten den ekoizpen kontzeptua da, eta azken urteotan gero eta interes handiagoa sortu du hainbat industria-sektoretan. Teknologia mota horretan, hiru dimentsioko (3D) diseinu digital batetik abiatuta objektu fisiko bat fabrikatzen da, geruzaz geruza materiala gehituz [Herzog, 2016]. ASTMk honela definitzen du fabrikazio-gehigarria: “3D ereduetatik abiatuta piezak fabrikatzeko materiala geruzaz geruza gehitzen duten prozesuen multzoa, kenketa-fabrikazioko teknologiek ez bezala” [ISO/ASTM, 2015].

Fabrikazio-gehigarria lehen aldiz 1986an agertu zen prozesu egonkor bat bezala, polimero fotosentikorrak geruzaz geruza ontzeko izpi ultramoreak erabiltzen dituen estereolitografia teknologia sortu zenean [Singh, 2020]. Jatorrian, fabrikazio-gehigarriari 3D inprimaketa ere deitu zitzaion, eta bertan elkarren segidako material geruzak gainjarriz hiru dimentsioko objektuak sortzen zituzten fabrikazio-teknologia guztiak bildu ziren. Hori dela eta, fabrikazio-gehigarriko makinei 3D inprimagailu ere deitzen zaie, material desberdinetan piezak edo pieza multzoak inprimatzeko gaitasuna dutelarik. Gainera, historikoki, 1980ko hamarkadan, fabrikazio-gehigarriko teknikak prototipo funtzional edo estetikoak ekoizteko soilik erabiltzen ziren, eta hori dela eta, teknologia mota honentzako termino egokiagoa prototipatze azkarra zen (*rapid prototyping*) [Guo, 2013].

Azken urteetan, ordea, 3D inprimaketaren zehaztasuna, errepikakortasuna eta material gama handitu egin dira, eta teknologia batzuk industria-ekoizpenerako bideragarritzat jotzen dira. Horregatik, “fabrikazio-gehigarria” terminoa 3D inprimaketaren sinonimo egokiagotzat jotzen da [Li, 2019]. Hala, ekonomia, ingurumen eta diseinu aldetik prestazio hobeak dituzten osagai errealen eskariak, azken aldian, fabrikazio-gehigarriaren garapena bultzatu du. Gainera, horrelako teknologiak disruptiboak izango direla aurreikusten da, eta munduko ekoizpen-sarea eraldatuko dute, hainbat industria-sektoretarako ezinbesteko tresna bihurtuz.

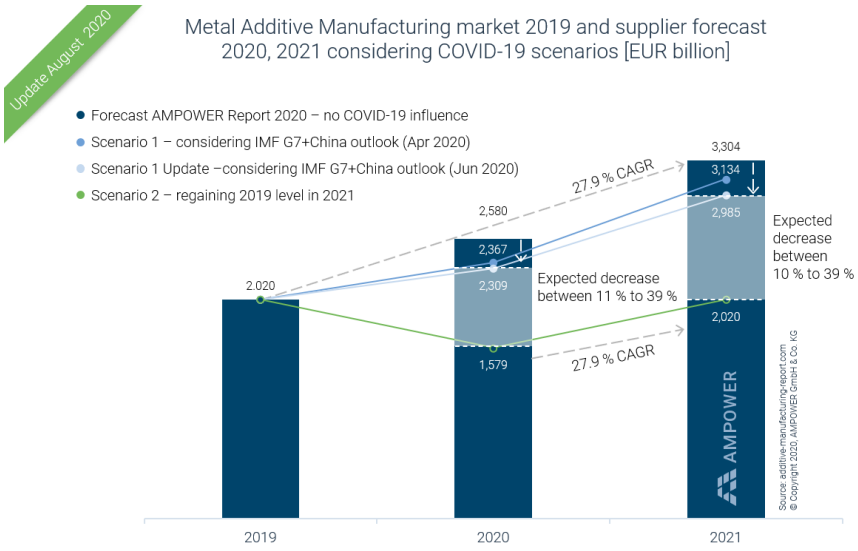
Ekoizpen-sistema adimendunak eta informazio-teknologiak gaur egungo industria-sistemetan integratzea 4.0 Industriaren oinarria da, ekoizpen-sistema adimendunak eta aurreratuak sortzeko. Hala, interkonektagarritasuna, automatizazioa, ikaskuntza automatizatua eta datuak denbora errealean eskuratu eta tratatzea 4.0 Industriaren helburu nagusiak dira. Integrazio ziber-fisiko horrek eraginkortasun handiko fabrika adimendunak sortzen ditu, produktu pertsonalizatuak eta kalitate handikoak fabrikatzeko gai izanik. Bide horretan,

fabrikazio-gehigarriak 4.0 Industriak planteatzen duen ekoizpen-sistemaren garapenari erantzuten dio, eta hasierako diseinutik azken piezarako bidea errazten du. Gainera, diseinu askatasun handiko piezak egiteko eta piezak pertsonalizatzeko aukera ematen du. Hain zuzen ere, laugarren industria iraultza gertatzea, neurri batean, fabrikazio-gehigarriak bereganatu ditzakeen gaitasunen araberakoa izango da, eta teknologia horiek zehaztuko dute industria-aro berri horren garapena [Dilberoglu, 2017]. Zehazki, I-1. irudian ageri da 4.0 Industriaren kontzeptua, fabrikazio-gehigarriko teknologiei aplikatua.




*I-1. irudia. 4.0 Industriaren kontzeptua fabrikazio-gehigarriari aplikatua [INTEGRADDE, 2021]*

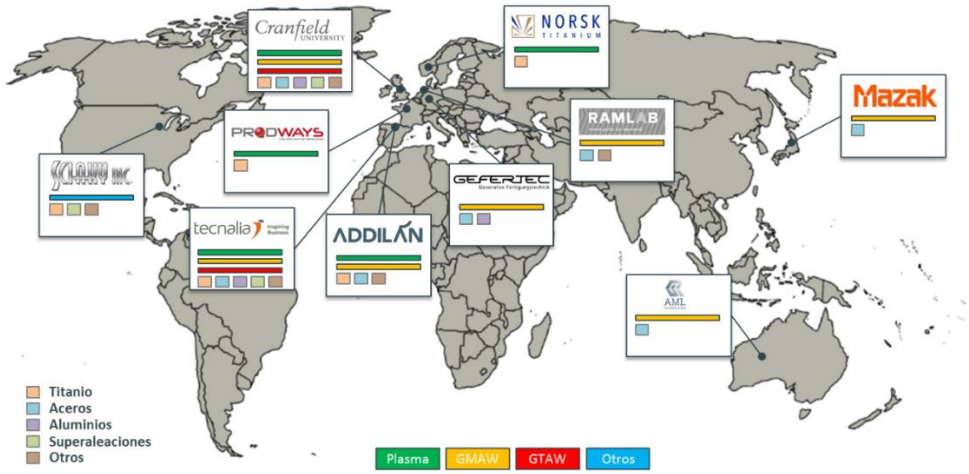
Fabrikazio-gehigarri metalikoaren merkatuaren hazkundearentzat aurreikuspenak baikorrak baziren ere, murriztu egin dira Covid-19aren pandemiaren ondorioz (I-2. irudia). Pandemiaren ondorioz gertatutako merkatuaren uzkurtzeak, aurreikuspenak zenbait urte atzeratzea espero da, denbora beharko baitute merkatuek erabat berreskuratzeko. 2025etik aurrera fabrikazio-gehigarriaren merkatua handitzen hastea aurreikusten da, baina 2030era arte ez da hazkunde hau guztiz osatuko [Harrop, 2020].




*I-2. irudia. Covid-19aren pandemia kontuan hartuta, fabrikazio-gehigarri metalikoaren merkatuaren hazkundearen bilakaeraren hainbat aurreikusitako agertoki [AMPOWER, 2020]*

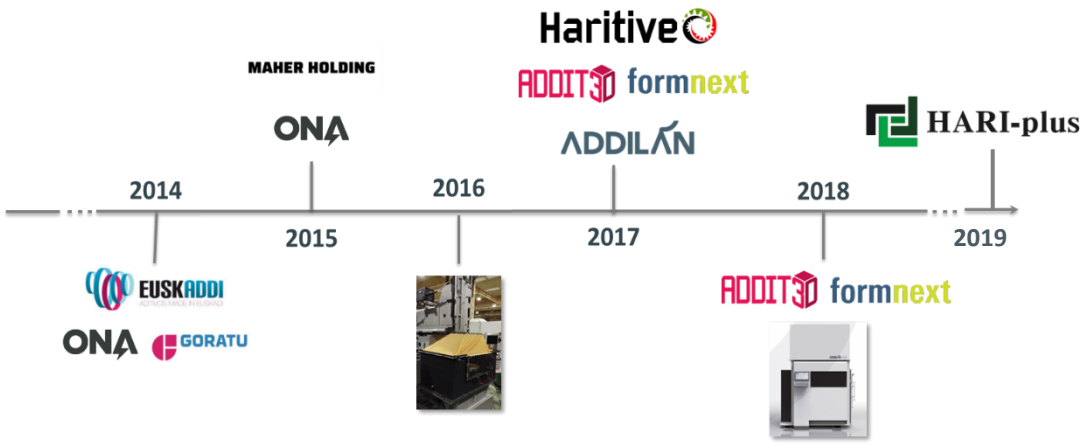
Ondoren azalduko diren fabrikazio-gehigarri metalikoko tekniken barruan sailkatutako teknologia guztien artean, WAAM teknologia da hari gisara elikatutako materiala urtzeko eta nahi den geometriarekin ezartzeko arku elektriko bat erabiltzen duena. Datozen urteetan, teknologia horren eskaria handitu egingo dela aurreikusten da, fabrikazio-gehigarria gero eta gehiago sartuko baita hainbat industriatan, hala nola automobilgintzan, industria aeroespazialean, defentsan, medikuntzan, oil & gas sektorean, etab. Izan ere, sektore horietarako WAAM teknologiari esker pieza handiak eta konplexuak fabrika daitezke, pieza higatuak konpondu daitezke edo oinarrizko egiturei xehetasunak erantsi dakizkieke, datozen urteetarako eskaria are gehiago hobetuz.

Horregatik guztiagatik, azken urteotan, WAAM teknologiak gero eta interes handiagoa sortu du industria-fabrikazioaren sektorean, tamaina handiko eta konplexutasun geometriko ertaineko pieza metalikoak kostu txikiarekin fabrikatzeko aukerari esker [Cunningham, 2018]. II-3. irudian, mundu mailako WAAM makina-fabrikatzaile eta teknologia-garatzaile nagusiak ikus daitezke.




*I-3. irudia. Mundu mailako WAAM fabrikazio teknologiaren garatzaile nagusiak, teknologietan eta materialetan banatuak*

Testuinguru horretan, ADDILAN S.A. enpresak WAAM teknologiaren bidez piezak fabrikatzeko makina berria merkaturatu berri du. I-4. irudian ikus daitekeenez, ADDILAN S.A. Euskadiko makina-erreminta sektoreko bi enpresa garrantzitsuren, Maher Holding Taldearen eta ONA Electroerosión enpresaren, arteko I+G proiektu baten emaitza da. Bi enpresek, Goratuk, Maher Holding-en aldetik, eta ONAk, EUSKADDI proiektuan parte hartu zuten, Etorgai 2014 deialdiaren barruan, Energiaren ezartze zuzena (*Direct Energy Deposition, DED*) fabrikazio-gehigarriko teknologiaren barruan kokatzeko asmoz. Proiektu horren emaitza nabarmen gisara, bi enpresek WAAM teknologiaren aldeko apustua egitea eta bakoitzak bere gaitasun onenak eskaintzea erabaki zuten, makina- eta teknologia-soluzio diferentziala merkaturatzeko. 2017. urtean, ADDILAN enpresa sortu zen eta HARITIVE proiektuaren barruan teknologia garatzen jarraitu zuten. HARITIVE proiektua mugarri disruptiboa izan zen industrian, WAAM teknologia duen CNC kontrolean oinarritutako lehen makina aurkeztu baitzuten beronen baitan. Ondoren, aurrera jarraitzeko, HARI-PLUS proiektua aurkeztu zen 2019an. Proiektu horren helburua WAAM prozesuen ezagutzan sakontzea zen, horietako bakoitzaren onurak identifikatuz, merkatuari irtenbiderik aurreratuena eskaini ahal izateko. Hala, doktore-tesi hau ADDILAN enpresarekin lankidetzan egindako HARITIVE eta HARI-PLUS proiektuen barruan kokatzen da.




*I-4. irudia. Doktore-tesi honi lotutako proiektuen aurrekariak eta bilakaera*

## 2 Doktore-tesiaren planteamendua. Helburuak

Azkenaldian GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua intentsiboki aztertu den arren, literaturan ez da ikerketa sakonik egin, esate baterako, sartutako intentsitate-seinalearen forma eta efektuari buruz, ezarpen-estrategia desberdinei buruz edota aluminio-aleazioak ezartzeko funtzionamendu-modu desberdinek piezaren akats eraketan, nagusiki porositatean, duten erlazioari buruz.

Hala, doktore-tesi honen helburu nagusia GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua garatzea eta karakterizatzea da, ER70S-6 aleazio txikiko altzairuan eta 5356 aluminio-aleazioan, doktore-tesian zehar diseinatutako sistema robotikoa erabiliz.

Helburu orokor hori lortzeko, lan honen helburu teknologikoak hauek dira:

1. GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez piezak automatikoki eta kontrolpean fabrikatzeko sistema robotiko bat garatzea, monitorizazio- eta kontrol-tresnak integratuta.
2. GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesura egokitutako kontrol sistemak diseinatu eta ezartzea, ezarpen optimoa eta akatsik gabea lortzeko.
3. WAAM prozesuaren parametro nagusien eta ER70S-6 altzairuarentzako funtzionamendu-modu ezberdinen eragina aztertzea.
4. Oszilazio-estrategia gainjartze-estrategiarekin konparatzea, geruzen hazkundearen, bero-ekarpenaren, mikroegituraren, propietate mekanikoen eta geometriaren arabera.
5. 5356 aluminio-aleaziorako egokienak diren funtzionamendu-moduen eragina aztertzea.

6. GMAW teknologiaren bidez, ezarritako soldadura-kordoien zabalera eta altuera aurresateko, prozesuaren parametro esanguratsuenen araberako ereduak diseinatzea.

## 3 Doktore-tesiaren antolaketa

Aurreko atalean aurkeztu diren helburu teknologikoak modu egituratuan lantzeko, doktore-tesi hau honela egituratu da:

1. Lehenengo kapituluan, fabrikazio-gehigarriaren gaur egungo testuinguru teknologikoa eta industriala aurkeztu dira, baita doktore-tesi honen helburuak ere.
2. Bigarren kapituluan, fabrikazio-gehigarriak zertan datzan azaldu ondoren, berrikuspen bibliografiko bat egin da, fabrikazio-gehigarri metalikoaren egoera laburbiltzen duena, batez ere, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan zentratuta. Lehenik eta behin, teknologia mota horretako funtzionamendu-modu ezberdinek materialaren transferentzia-prozesuetan duten efektua berrikusi da. Horrez gain, baita prozesuan zehar izan daitezkeen ezarpen-estrategia ezberdinen influentzia eta bero-ekarpenaren eragina ere. Bigarrenik, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua hobetzeko bibliografian aurkitu diren bideak laburbildu dira. Ondoren, WAAM bidez doktore-tesi honetan zehar ezarritako bi materialetan beste autore batzuek egindako lanak aurkeztu dira: ER70S-6 altzairuan eta 5356 aluminio-aleazioan. Azkenik, hainbat fabrikatzailek garatutako WAAM teknologia duten makinak eta beste autore batzuek diseinatutako monitorizazio- eta kontrol-sistemak aipatu dira.
3. Hirugarren kapituluan, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua integratzen duen sistema robotiko baten garapena aurkeztu da. Sistema hori monitorizazio- eta kontrol-sistema batez hornitu da. Monitorizazio- eta kontrol-sistemak funtsezkoak dira prozesua modu egoki eta kontrolatuan gauzatu ahal izateko.
4. Laugarren kapituluan, III. kapituluan garatutako sistema robotikoan, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez ER70S-6 aleazio txikiko altzairuan egindako esperimentazioa deskribatu da. Lehenik eta behin, soldadura-kordoi sinpleak egin dira prozesuaren parametro nagusien eragina eta altzairuentzako funtzionamendu-modu egokienak aztertzeko (GMAW pultsatua, Cold Arc eta Force Arc). Bigarrenik, horma sinple bat fabrikatu eta metalurgikoki eta geometrikoki aztertu da. Azkenik, oszilazio-estrategia gainjartze-estrategiarekin

konparatu da. Gainera, lortutako emaitzak balioztatzeko, bi pieza fabrikatu dira WAAM teknologiaren bidez material horretan.

5. Bosgarren kapituluan, 5356 aluminio-aleazioarentzat, IV. kapituluan ER70S-6 altzairuarentzat deskribatutako esperimentazioa errepikatu da, ezarpen-estrategien azterketa izan ezik. Gainera, soldadura-kordoien zabalera eta altuera prozesuaren parametro esanguratsuenen arabera aurresateko aukera ematen duten eredu esperimentalak ere garatu dira.
6. Seigarren eta azken kapituluan, ikerketa-lan honek artearen egoeran egin dituen ekarpen nagusiak laburbildu dira, eta baita etorkizunari begira sortzen diren ikerketa-ildo berriak ere.

# *II. KAPITULUA*

# II. KAPITULUA: ARTEAREN EGOERA

## 1 Fabrikazio-gehigarria

Fabrikazio-gehigarriaren abantaila nagusienetako bat konplexutasun geometriko handiko piezak fabrikatzeko gaitasuna da; beste teknologia batzuk erabilita ezinezkoak liratekeen piezak, esaterako, pieza hutsak, xehetasun konplexuak dituztenak edo barne-sare konplexudunak. Beraz, fabrikazio-gehigarriaren bidez, diseinu-askatasun handia lortzen da, eta hori funtsezkoa da, adibidez, pisu murrizketak behar dituzten aplikazioetarako. Murrizketa horiek diseinuaren optimizazio topologikoaren bidez egin daitezke [Zhu, 2021], pieza trinkoen ordez barne-sareak dituztenak eginez, edo pieza bakar batean fabrikatuz teknika tradizionalekin azpi osagai asko behar zituzten zatiak. Adibidez, General Electric konpainiak, bere CFM LEAP hegazkin-motorrean, fabrikazio-gehigarriaren bidez fabrikatutako erregai-injektoreak sartu zituen. Injektore berriak osagai bakarrean fabrikatuta zeuden eta hasierako 18 piezako sistema baino, %25 arinagoak ziren [General Electric, 2017].

Gainera, fabrikazio-gehigarriaren bidez pertsonalizazioa ere aukera bihurtzen da [Tofail, 2018]; izan ere, fabrikazio-teknika tradizionaletan, pieza konplexuen pertsonalizazioa mugatua da, horrek dakarren kostuagatik. Gehienetan, kostu hori tirada luzeak eskatzen dituzten molde eta erraminta konplexuen beharrarekin lotuta dago. Aldiz, fabrikazio-gehigarriaren bidez, piezak ordenagailuz sortutako diseinu *(Computer Aided Design, CAD)* batetik abiatuta zuzenean fabrikatzen direnez, pieza bakarrak eta pertsonalizatuak egitea bideragarria da, tresneria garestirik gabe [Satish Prakash, 2018].

Orain arte, ohiko kenketa-teknikek bloke trinko batetik abiatuta fabrikatzen zituzten piezak, eta behar zen materiala ezabatzen zuten nahi zen geometria lortu arte. Fabrikazio-gehigarriaren barruan sailkatutako teknologiek, ordea, materiala behar den tokian bakarrik gehitzen edo ezartzen dute, erabilitako lehengai-kopurua minimizatuz eta, beraz, fabrikatu beharreko piezen kostua nabarmen murriztuz [Hosseini, 2019]. Horren ondorioz, fabrikazio-gehigarriak merkatu aukera handi bat izan lezake, esate baterako, industria aeronautikoan, erabilitako materialen (titanioa, nikel-aleazioak, etab.) prezio altua eta osagaien *buy-to-use* ratio handia direla eta [Ding, 2015-a].

Hala, fabrikazio-gehigarriko teknologien bidez, amaierako geometriatik hurbil dauden piezak lortzen dira (*Near Net Shape* prozesu kontsideratzen direlarik honakoak), eta lehengaien aprobetxamendu-tasa oso handia da. Hala, postprozesurik gabe edo postprozesu gutxirekin, fabrikatutako aurreformatik azken piezara igarotze posible izango da [Tofail, 2018]. Testuinguru horretan,

Hybrid Manufacturing terminoa sartzen da jokoan. *Hybrid Manufacturing* terminoak fabrikazio-gehigarriko prozesuen eta prozesu tradizionalen (eskuarki, mekanizazio-prozesuen) konbinazioan oinarritutako fabrikazio-prozesuak hartzen ditu kontuan, prozesu mota bakoitzaren bidez lortzeko zailak (edo are gehiago, ezinezkoak) diren piezak sortzeko. Gainera, hibridazio horren bidez, fabrikazio-gehigarriko teknologien produktibitate baxuarekin, gainazal-akaberarekin eta neurri-zehaztasunarekin erlazionatutako mugak gaindi daitezke [Pragana, 2021].

Fabrikazio-gehigarriko teknologiek ahalmen handia erakutsi dute energia kontsumoa murrizteko alferrik galdutako material kantitatea eta mekanizazio-urratsak ezabatuz. Esaterako, aurrera eramandako zenbait azterketetan iragarri da, fabrikazio-gehigarriaren erabilera orokorrak energia-eskaera %27 jaitsiko lukeela [Sun, 2021].

Gaur egun, fabrikazio-gehigarriak dentsitate osoa duten piezak sor ditzake material-sorta zabal batean, hala nola, polimeroak [Jafferson, 2021], metalak [Herzog, 2016], material zeramikoak [Zhang, 2020-c], konpositeak [Parandoush, 2017], etab. Material polimerikoen fabrikazio-gehigarria, seguruenik, gehien aztertu dena izan da, halako materialek behar dituzten prozesatze- eta fusio-tenperatura baxuak direla medio, eta ez dutelako ez babes-gasik, ez lan egiteko atmosfera babesturik behar. Aldiz, material metaliko eta zeramikoen urtze-tenperaturak altuagoak dira, eta ez dira hain erraz prozesatzen [Tofail, 2018]. Hala ere, azkenaldian, gero eta interes handiagoa ari dira irabazten halako materialen fabrikazio-gehigarriko teknologiak. Gainera, fabrikazio-gehigarriko teknologiek aukera ematen dute material anitzeko piezak sortzeko, hau da, material mota batez baino gehiagoz osatutako piezak fabrikatzeko. Hain zuzen ere, pieza mota hau, orain arte fabrikazio-teknika tradizionalekin egitea ez zen posible [Bandyopadhyay, 2018].

Azken 30 urteetan, fabrikazio-gehigarriaren barnean sailkatzen diren teknikak hainbat sektoretarako erabili izan dira, hala nola, sektore aeroespazialean [Shi, 2020], sektore aeronautikoan [Gisario, 2019], automobil industrian [Delic, 2020], sektore biomedikoan [Rezvani, 2021], energiaren sektorean [Ermakova, 2019] [Sun, 2021], erreminten, tresnen eta moldeen sektorean [Hao, 2021], eraikuntza sektorean [Paolini, 2019], etab.

-**Sektore aeronautikoa eta aeroespaziala:** Sektore horietan, osagaiek geometria konplexuak izan ohi dituzte, eta prestazio altuko material metalikoz eginak daude, hala nola, titanio-aleazioz, nikel-aleazioz, altzairu bereziz eta zeramikaz; piezek oso tenperatura altuetan lan egiten baitute. Horrelako piezen ohiko fabrikazioa garestia eta luzea izaten da, eta, gainera, tiradak

laburrak izaten dira (milaka pieza ingurukoak). Hori dela eta, mota horretako sektoreetan fabrikazio-gehigarriak merkatu handia izango duela aurreikusten da [Guo, 2013].

**-Automobilgintza:** Automobil industrian, bestalde, tiradak luzeak izaten dira, eta horregatik, fabrikazio-gehigarria batez ere piezen diseinu-etapetan erabiltzen da eta ez serieko fabrikazioan. Hala, teknologia mota hau garrantzitsua da osagai berriak diseinatzeko eta garatzeko denborak eta garapen-zikloen kostuak minimizatzeko. Gainera, horrelako teknologiak tirada laburrak dituzten pieza estruktural eta funtzionalak, hala nola, motor-ihesak, transmisio-ardatzak, abiadura-kaxaren osagaiak eta luxuzko ibilgailuetarako balaztatze-sistemak fabrikatzeko ere erabili izan dira. Hala ere, ez dira ohikoak automobilen ekoizpen-bolumen handiko piezetarako. Azkenik, lasterketetarako ibilgailuak fabrikatzeko ere erabiltzen dira fabrikazio-gehigarriko teknologiak; izan ere, esparru honetan aleazio arinetan fabrikatutako piezak izaten dira (adibidez, titaniozkoak), egitura oso konplexudunak eta ekoizpen-bolumen txikiekin [Satish Prakash, 2018].

**-Biomedikuntzaren sektorea:** Fabrikazio-gehigarrian, biomaterialetan, biologia-zientzietan eta biomedikuntzan berriki egin diren garapenei esker, fabrikazio-gehigarriko tekniken aplikazio eremua zabaldu egin da sektore honen barruan, produktu ortopedikoak, inplanteak, ehunen hazkuntzarako “scaffold-ak”, organo artifizialak, gailu medikoak, sare mikrobaskularrak, txip biologikoak eta abar fabrikatzeko. [Sheoran, 2020].

**-Energia-sektorea:** Azken urteotan, fabrikazio-gehigarriko teknologiak gero eta gehiago erabili izan dira energia sortzeko, bihurtzeko eta biltegiratzeko garapen berrietan, errendimendua eta sistemen eraginkortasun energetikoa hobetzeko. Adibidez, energia nuklearreko instalazioetan, fabrikazio-gehigarriari esker, piezak fabrika daitezke in situ, nukleo nuklearreko osagaien fabrikazioa bizkortuz egungo eta etorkizuneko erreaktore aurreratuen flotetarako. Bestalde, FGko teknikak pieza funtzionalak fabrikatzeko ere erabili dira, erregai-pilen propietate elektrokimikoak egokitzeko [Hughes, 2019].

**-Erreminten, tresnen eta moldeen sektorea:** Fabrikazio-gehigarriaren erabilera tirada txikiko ekoizpen-kasuetarako oso egokia da eta beraz baita sektore honetarako ere. Hala, FGko teknikek geometria konplexuak sortzeko duten gaitasunak, erreminten, tresnen edo moldeen errendimendua hobetu dezake. Gainera, aukera ona izan daiteke material garestizko piezetan galera handiak agertzen diren kasuetarako.

**-Eraikuntzaren sektorea:** Eraikuntzaren sektorean, azken hamar urtean baino gehiagoan, eredu arkitektonikoak fabrikazio-gehigarriaren bidez

fabrikatu izan dira. Gainera, azken urteetan asko handitu dira eraikuntzako osagaiak fabrikatzeko, hormigoian edo zementuan inprimatzeko metodoei buruzko ikerketak, eta fabrikazio-gehigarria aplikatzen duten lehenengo eraikuntza-proiektuak azaldu dira [Paolini, 2019] [Craveiro, 2019]. Adibide gisara, MX3D konpainiak Amsterdamen instalatu den diseinu optimizatua daraman altzairu herdoilgaitzez egindako zubi bat fabrikatu du GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez [MX3D, 2021].

Fabrikazio-gehigarria Laugarren Industria Iraultzaren zati izango dela esaten da. Horri, Industria 4.0 ere deitzen zaio, eta fabrikazio malguagoa, aldakorragoa, pertsonalizagarria eta azkarragoa bilatzen du.

Hala ere, gaur egun oraindik zenbait alderdi hobetu behar dira fabrikazio-gehigarria, prozesu industrial erreal eta lehiakor bat izan dadin. Ikuspegi teorikoa behar da fabrikazio-gehigarria industria-ekoizpeneko sistemetan nola erabil daitekeen hobeto ulertzeko [Eyers, 2017]. Masako ekoizpen-prozesuetan, adibidez, fabrikazio-gehigarriak mugak ditu, fabrikazio-abiadura eta errepikakortasuna txikiak baitira. Horrela, teknika horiek orain arte pieza bakarrak fabrikatzeko eta konponketa-aplikazioetarako erabili izan dira, baina, gaur egun, benetako ekoizpen-kateetan sartzea da erronka. Gainera, prozesu-parametroen optimizazioa eta hautaketa egokia eta kontrol- eta monitorizazio-sistemen erabilera funtsezkoak izango dira teknologia-mota horien erabateko kontrola izateko.

## 2 Fabrikazio-gehigarri metalikoaren barneko sailkapena

Fabrikazio-gehigarriaren barruan, teknologia mota bakoitza energia-iturri baten, materialaren formatuaren eta sistema mugikor baten konbinazio berezi bat da, bakoitza aplikazio jakin baterako egokia izanik. ASTMk (ASTM F2792) sortutako terminologia estandarraren arabera, fabrikazio-gehigarriko teknologiak zazpi kategoriatan sailkatzen dira [ISO/ASTM, 2015], eta lehenengo laurak metalezko osagaiak fabrikatzeko erabil daitezke [Zhang, 2018-b]:

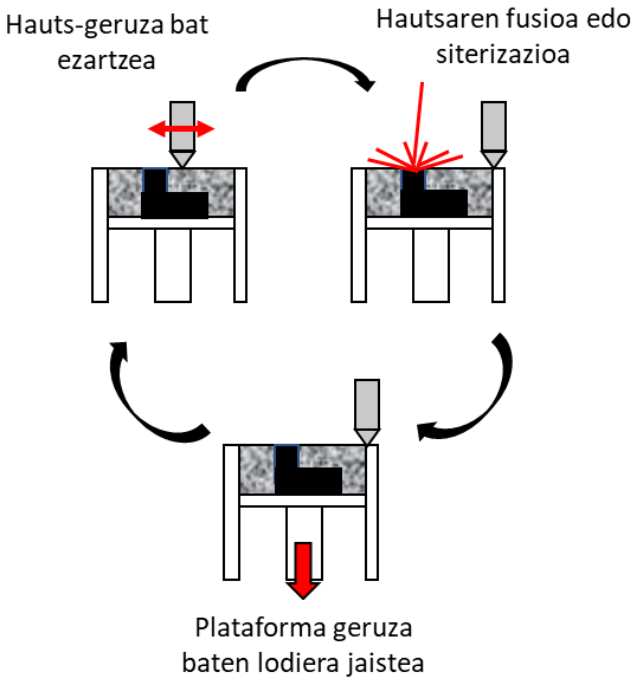
1. Hauts-ohearen fusioa (*Power Bed Fusion, PBF*)
2. Binder Jetting (BJ)
3. Sheet Lamination (SL)
4. Energiaren ezartze zuzena (*Directed Energy Deposition, DED*)
5. Material Extrusion (ME)
6. Material Jetting (MJ)
7. Estereolitografia (*Vat Photopolymerization, VP*)

Material metalikoei dagokienez, hainbat fabrikazio-teknika tradizional daude. Ohikoenak galdaketa, forjaketa eta mekanizazioa dira, eta horiek dira oraindik ere munduko metalen industriaren zutabe nagusiak. Material mota horien fabrikazio-gehigarria, berriz, nahiko berria da (80ko hamarkadakoa), eta geruzaz geruzako produkzioan oinarritutako teknika automatizatuak eskaintzen dituzte. Hasiera batean, halako teknologiak prototipo azkarrak egiteko garatu baziren ere; egun fabrikazio-gehigarriko teknologien eskaria asko handitu da tirada txiki eta ertainak dituzten eta ingurumen- eta ekonomia-ezaugarri hobeak eskaintzen dituzten ingeniaritzako osagai errealen fabrikaziorako.

Gaur egun, material metalikoetan oinarritutako fabrikazio-gehigarriko teknikek material eta energia asko aurrezten laguntzen dute, hainbat piezaren fabrikazioaren kostua eta ingurumen-inpaktua murriztuz. Gainera, teknika horiekin geometria konplexudun piezak egin daitezke (ohiko fabrikazio-teknikekin fabrikatu ezin direnak) eta balio erantsi handiko piezak konpontzea ere posible da. Hala, zehaztasun geometriko handiko piezak lor daitezke, propietate mekaniko egokiak mantenduz.

## 2.1 Hauts-ohearen fusioa (*Power Bed Fusion, PBF*)

Teknologia mota honen barruan sailkatzen dira 3D pieza bat sortzeko asmoz hauts-materialetik abiatuta geruzaz geruza hauts hori fusionatzen duten metodoak. Oro har, mota horretako teknologien oinarrizko printzipioa energia-iturri batek (laser izpi batek edo elektroi-sorta batek) emandako energia termikoa erabiltzea da hauts-ohearen eremu selektiboak fusionatzeko edo sinterizatzeko. Prozesuan zehar, lehenik eta behin, arrabola baten bidez lehenengo hauts-geruza zabaltzen da fabrikazio-plataformaren gainean. Ondoren, energia-iturria erabiliz eskaneatu egiten da eta hala, hauts-partikulak solidotu egiten dira geruza horretan fabrikatu beharreko piezak duen geometriaren arabera [Cook, 2020]. Jarraian, fabrikazio-plataforma geruza baten lodiera jaitsi eta gainean arrabolaren bidez beste hauts-geruza bat zabaltzen da. Prozesu hori errepikatzen da objektua erabat fabrikatuta izan arte, II-1. irudian ikus daitekeen bezala [Bhavar, 2014]. Pieza bukatutakoan, hauts-ohetik atera eta behar diren postprozesuak burutzen zaizkio.




*II-1. irudia. Hauts-ohearen fusio (PBF) teknologien errepresentazioa*

PBF multzoaren barruan sailkatutako teknologiak zabalduenak dira fabrikazio-gehigarri metalikoaren barruan hainbat sektore industrialetan, hala nola, industria biomedikoan, industria aeroespazialean eta industria aeronautikoan [Singh, 2019], laser izpiak edo zehaztasun handiko elektroi-sortak erabiliz pieza geometrikoki konplexuak fabrikatzeko duten gaitasunagatik [Chin, 2020]. Gainera, teknologia horiekin posible da gainazal-akabera egokiko piezak eta geometrikoki zehatzak lortzea, pieza txiki eta ertain konplexuak lortzeko oso erabilgarriak izanik. Hala ere, hauts-ohearen teknologiek muga handiak dituzte tamainari eta produktibitateari dagokienez; izan ere, ezarpen-tasak nahikoa txikiak dira (gehienez 150 $cm^3$/h), eta fabrikatu daitezkeen piezen tamaina makinen lan-eremuaren tamainak mugatzen du [Bhavar, 2014]. Gainera, teknologia mota horietan kostu operatiboak alderaketan altuak dira, lehengaien eta makinen kostu handiagatik, hauts metalikoak birziklatzeko arazoengatik, material aldaketa zailengatik eta babes-gasen gestiorako eta segurtasunerako instalazioen eskakizunengatik. Prozesu horien beste ezaugarri nagusi bat teknologia makina-fabrikatzaile nagusien (EOS, GE Additive, Renishaw, SLM solutions, etab.) esku dagoela izan ohi da, irtenbide itxi bat eskaintzen dutelarik, erabiltzaileak makina jasotzeaz gain, materiala, teknologia, softwarea eta abar ere jasotzen baititu. [Udroiu, 2012].

PBF multzoak hainbat teknologia barne hartzen ditu, hala nola, laser bidezko fusio selektiboa (*Selective Laser Melting, SLM*) eta elektroi-sorta bidezko fusioa (*Electron Beam Melting, EBM*). Prozesu horien ezaugarri nagusiak II-1. taulan

laburbiltzen dira. SLM eta EBM prozesuek antzeko lan-printzipioak dituzte, biek ala biek geruzaz geruza urtzen dute hautsa, laser edo elektroi-sorta baten bidez, hurrenez hurren. Gainera, EBMk hutsa duen lan-eremu bat behar du lan egiteko eta, aldiz, SLMk atmosfera babestua soilik [Dev Singh, 2020].

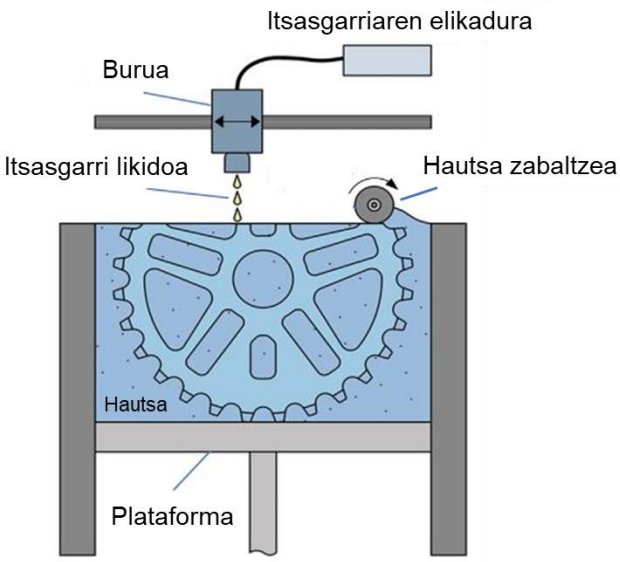
*II-1. taula. SLM eta EBM teknologien ezaugarri nagusiak*

| | **SLM** | **EBM** |
|---|---|---|
| **Energia-iturria** | 200-1000 W-ko fibrazko laser bat edo gehiago | 3000-6000 W-ko potentzia altuko elektroi-sorta |
| **Lan-eremuko atmosfera** | Atmosfera inertea | Hutsa |
| **Hautsaren aurretiko berotzea** | Plataformaren aurretiko berotzea | Eskaneatze bidez |
| **Euskarri beharra** | Bai | Ez |
| **Fabrikazio-bolumen maximoa (mm)** | 800x400x500 [GE Additive, 2021-a] | 350x430 (Ø x H) [GE Additive, 2021-b] |
| **Ezarpen-tasa maximoa ($cm^3$/h) [Bhavar, 2014]** | 20-150 | 80 |
| **Geruzaren lodiera (µm) [Singh, 2019]** | 20-150 | 50-200 |
| **Gainazal-akabera (µm) (Ra) [Bhavar, 2014], [Gokuldoss, 2017], [Herderick, 2011]** | 4-11 | 25-35 |
| **Tolerantzia geometrikoa (mm) [Bhavar, 2014], [Mcwilliams, 2017]** | ±0,05-0,1 | ± 0,2 |
| **Fabrika daitekeen detaile tamaina txikiena (µm) [Bhavar, 2014]** | 40-200 | 100 |

## 2.2 *Binder Jetting* (BJ)

*Binder Jetting* prozesuak bi material erabiltzen ditu: hauts eran dagoen materiala eta aglutinatzailea. II-2. irudian ikus daitekeenez, inprimaketa prozesuan likido aglutinatzailea hauts-ohearen gainean ezartzen da. Horretarako, inprimaketa-burua horizontalki mugitzen da, fabrikatu beharreko piezaren forma geometrikoa deskribatuz, eta aglutinatzaileak hauts-geruzen arteko itsasgarri gisa jarduten du. Ondoren, fabrikazio-plataforma geruza baten lodiera jaisten da, PBF prozesuetan bezala eta arrabola baten bidez hurrengo hauts-geruza zabaltzen da aurrekoaren gainean. Prozesua hori piezaren azken geometria lortu arte errepikatzen da. Berotutako lan-eremu batek inprimaketa prozesua bizkortzen lagun dezake materialen biskositatea handitzen baitu [Karlsson, 2019].

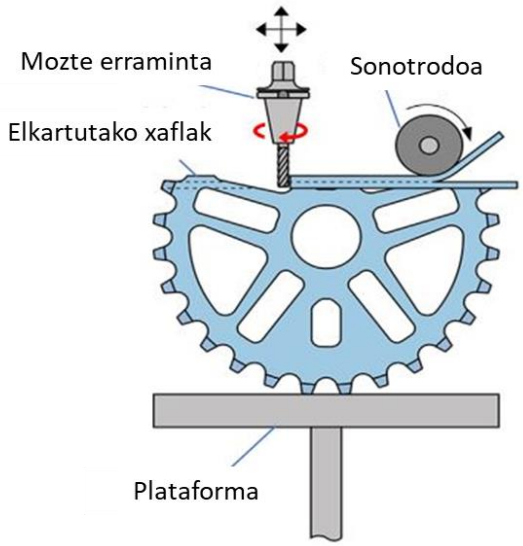
Merkatuan BJ prozesurako hautsak material askotan daude eskuragarri, hala nola, material metalikoetan, polimeroetan eta material zeramikoetan [Kunchala, 2018]. Bestalde, *Binder Jetting* makinen fabrikazio-bolumena, fabrikazio-gehigarriko teknologia guztien artean, merkatuko handienen artean dago (800 x 500 x 400 mm arte) [ExOne, 2021].




*II-2. irudia. Binder Jetting prozesuaren adierazpen eskematikoa ([Pragana, 2021] lanetik egokitua)*

### 2.3 *Sheet Lamination* (SL)

SL teknologiek material-xaflak erabiltzen ditu hiru dimentsioko objektuak fabrikatzeko. Teknologia horietan guztietan, xaflak nahi den objektuaren formarekin mozten dira, eta, gero, nolabait, elkartu egiten dira hiru dimentsioko pieza bat lortzeko, II-3. irudian ikus daitekeen bezala [Bhatt, 2019]. Xaflen materialaren arabera, SL teknologia desberdinak bereiz daitezke, hala nola, *Laminated Object Manufacturing* (LOM) polimeroentzat, *Composite Based Additive Manufacturing* (CBAM) konpositeentzat eta *Ultrasonic Additive Manufacturing* (UAM) metalentzat. Teknologia mota horien onuretako batzuk abiadura handia, kostu txikia eta materiala erabiltzeko erraztasuna dira.




*II-3. irudia. Sheet Lamination prozesuaren adierazpen eskematikoa ([Pragana, 2021] lanetik egokitua)*

## 2.4 Energiaren ezartze zuzena (*Directed Energy Deposition, DED*)

DED prozesuak gero eta garrantzia handiagoa hartzen hari diren prozesuak dira, duela 15 urte ingurutik garapen eta industrializazio fasean daudelarik. DED multzoaren barruan, energia-iturriak materiala elikatzen den aldi berean urtzen duen teknika guztiak sartzen dira [Lee, 2017]. PBF teknologiekin alderatuta, teknologia mota honen abantaila nagusiak, fabrikazio-bolumen handiagoak izanik pieza handiagoak fabrikatzeko aukera eta kaltetutako piezak konpontzeko aukera dira [Saboori, 2019].

Prozesu mota honetan, piezaren azken geometriatik oso gertu dagoen aurreforma bat lortzen da, mekanizatu behar den material kopurua bloke batetik hasita baino askoz ere txikiagoa delarik. Gainera, piezaren hiru dimentsioko diseinu digital batetik zuzenean abiatzen da eta material metalikoa behar den tokian eta kantitatean urtu eta ezartzen da, geometria geruzaz geruza sortuz. Orain gutxi fabrikatutako pieza batzuetan jada frogatu da materialean, kostuan eta energia-kontsumoan %70etik gorako aurrezkiak lor litezkeela eta entrega-epeak nabarmen murritz daitezkeela fabrikazio konbentzionalarekin alderatuta [Vimal, 2020].

DED teknologien barruan, bi prozesu mota bereizten dira: Hari-elikatzedun deposizioa [Ding, 2015-b] eta hauts-elikatzedun deposizioa [Frazier, 2014]. Hautsaren ordez lehengai gisara haria erabiltzeak kilogramoko prezioa murrizten du, materialaren erabileraren eraginkortasuna handitzen du, hautsak birziklatzeko sistemen beharra murrizten du, prozesua ingurumenerako atsegina

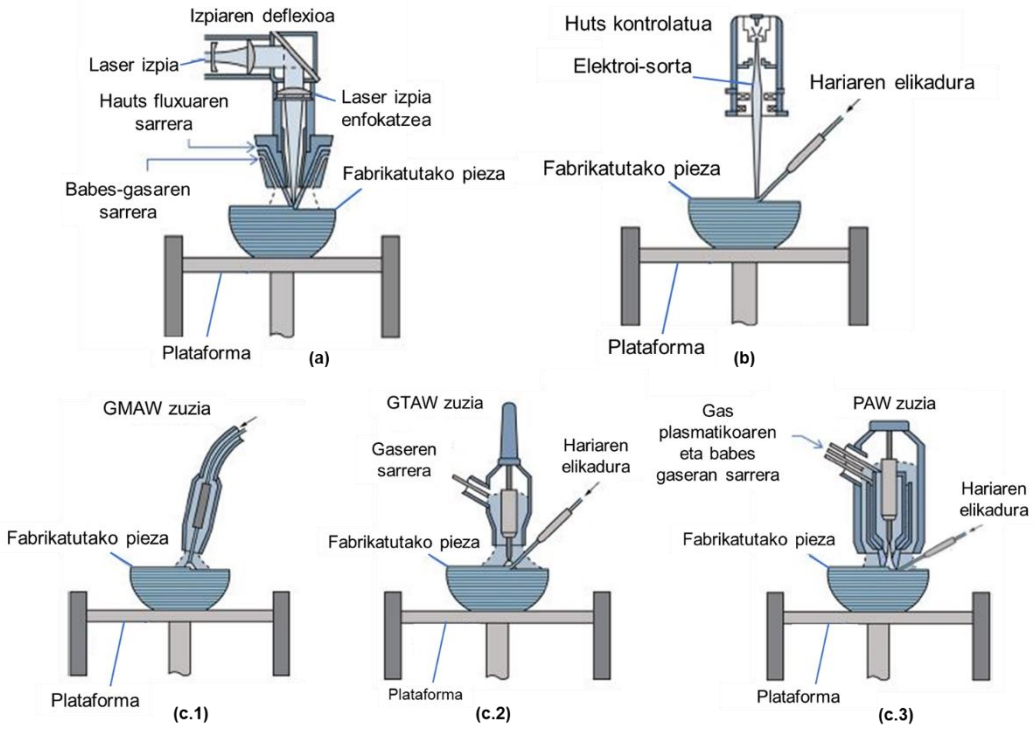
bihurtzen du eta langileek segurtasun eta osasun kezkarik gabe materiala erraz manipulatzeko aukera ematen du [Wang, 2019] [Jin, 2020].

Materiala urtzeko energia-iturri gisara laser bat, elektroi-sorta bat edo arku elektriko bat erabil daitezke. Hala, energia-iturriaren zuzia eta materiala elikatzeko ekipamendua sistema mugikor batean (beso robotiko bat, Gantry makina bat, makina kartesiar bat, etab.) muntatzen dira eta, horren bidez, nahi den materiala nahi den lekuan ezartzen da [Herzog, 2016]. Horregatik, teknologia mota horietan ez da ohikoa konponbide itxiak eskaintzen dituzten makina-saltzaileak aurkitzea.

Bestalde, DED kategoriaren barruan hainbat prozesu mota bereizten dira, energia-iturriaren izaeraren eta sartutako materialaren formatuaren arabera, II-4. irudian ikus daitekeen bezala: LMD (*Laser Material Deposition*), EBAM (*Electron Beam Additive Manufacturing*) eta WAAM (*Wire Arc Additive Manufacturing*) [Pragana, 2021].

Teknologia mota horietan energia eskualde jakin batera bideratzen da oinarri-materiala (substratua) edo aurretik ezarritako materiala berotzeko eta utzi beharreko materiala urtzeko. Prozesuaren zehaztasuna erabiltzen den energia-iturri motaren araberakoa da (laser>elektroi-sorta>arku elektrikoa) [Lee, 2017]; fabrikazio-abiadura, ordea, ezarpen-tasarekin lotuta dago (LMD 1 kg/h < EBAM 10 kg/h < WAAM 10 kg/h).

Gainera, laserrak duen eraginkortasun energetikoa murritza da (%35 gehienez), elektroi-sortarena apur bat txikiagoa da (%15-20), baina arku elektrikoarekin ezin da alderatu, zenbait egoeratan %90era irits baitaiteke [Ding, 2015-a]. Laserrak erabiltzen dituzten teknikekin alderatuta, arku elektrikoa materiala urtzeko energia-iturri eraginkorragoa da, batez ere, aleazio metaliko islatzaileetan, hala nola, aluminio-aleazioetan, kobrean eta magnesioan [Cunningham, 2018].




*II-4. irudia. DED teknologien adierazpen eskematikoa: a) LMD teknologia; b) EBAM teknologia; c) WAAM teknologia. c.1) GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua; c.2) GTAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua; c.3) WAAM teknologian oinarritutako PAW prozesua ([Pragana, 2021] lanetik egokitua)*

**LMD** teknikan, hauts metalikoa ahoko koaxial jarraitu, lateral edo multi-jet baten bidez elikatzen da [Jardon, 2020], eta lente sistemez zuzendutako egoera solidoko laser baten (Nd: YAG), zuntzezko laser baten, diodozko laser baten edo 1-5 kW potentziadun $CO_2$-zko laser baten bidez urtzen da (II-4 a. irudia) [Azarniya, 2019]. Teknologia honetan, metala erreaktiboa bada, bainu urtua babes-gas noble batek babestuko du, haren oxidazioa saihesteko.

Materiala elikatzen eta urtzen den bitartean, piezaren azken geometria lortzeko bi aukera daude: pieza mugitzen da ahokoa geldirik dagoen bitartean, edo ohikoena, ahokoa sistema mugikorraren bidez mugitzen da pieza geldirik dagoen bitartean [Frazier, 2014]. Prozesu hori geruzaz geruza errepikatzen da, hiru dimentsioko pieza bat osatu arte. Teknika horrekin, ahoko motaren eta laser izpiaren tamainaren arabera, posible da bai estaldura zabalak eta bai milimetro hamarren gutxiko xehetasunak fabrikatzea [Kittel, 2020].

Bestalde, **EBAM** teknologian materiala hari formatuan elikatzen da eta elektroi-sorta baten bidez urtzen da (II-4 b. irudia). Teknologia hau 2004an garatu eta merkaturatu zuen lehen aldiz SCIAKY enpresak Boeingekin elkarlanean [Gisario, 2019], [SCIAKY, 2021]. Prozesua hutsean egin behar da, eta, horregatik, ezin

dira hauts metalikoak erabili, hutsean hauts metalikoen fluxuen manipulazioa zaila baita [Zhang, 2020-a].

Azkenik, **WAAM** teknologian materiala hari formatuan elikatu eta arku elektriko baten bidez urtzen da. WAAM teknika soldadura automatikoaren printzipioetan oinarritzen da, piezak oinarri-material baten gainean fabrikatzen direlarik geruzak gainezarriz [Williams, 2016-b]. Metodo honek material-ezarpen masiborako ahalmena ematen du, 10 kg/h baino gehiagoko ezarpen-tasetara iritsiz, eta laser-hauts sistemen ezarpen-tasa tipikoak (normalean 1 kg/h arte) baino askoz handiagoak lortuz [Ng, 2009]. Horregatik, nahiz eta zehaztasun geometrikoa laserrarena baino askoz txikiagoa izan, arku bidezko ezarpen-prozesuak metalak bolumen handitan ezartzeko metodorik ekonomikoenetako bat dira. Horregatik, WAAM teknologia bereziki egokia da konplexutasun geometriko ertaineko eta tamaina handiko piezak fabrikatzeko.

Gainera, WAAM teknologiak, EBAM prozesuek ez bezala, ez du hutsa behar lan egiteko, eta horrek asko murrizten du ekipamenduaren kostua. Hala ere, soldadura prozesuetan bezala babes-gas batekin babestutako atmosfera lokalizatua behar da material urtua ez kutsatzeko eta material batzuetan atmosfera babestua ere komenigarria litzateke. Bestalde, laserrak erabiltzen dituzten teknikekin alderatuta, arku elektrikoa energia-iturri eraginkorragoa da materiala urtzeko, batez ere, aleazio metaliko islatzaileetan, hala nola, aluminio-aleazioetan, kobrean eta magnesioan [Cunningham, 2018].

Oro har, hauts-ohearen eta DED teknologien ezaugarri nagusien alderaketa II-2. taulan ikus daiteke.

*II-2. taula. Fabrikazio-gehigarri metalikoko teknologien arteko konparaketa*

| | **PBF [Bhavar, 2014]** | **DED-LMD [Kittel, 2020]** | **DED-EBAM [SCIAKY, 2021]** | **DED-WAAM [Tabernero, 2018], [Chen, 2015]** |
|---|---|---|---|---|
| **Zehaztasuna** | Altua: ±0,05-0,2 mm | Ertaina: ±0,2 mm | Amaierako mekanizazioaren beharra | Amaierako mekanizazioaren beharra |
| **Integritate estrukturala** | Altua: Huts-ganbera/atmosfera babestua | Altua: Atmosfera babestua | Altua: Huts-ganbera | Altua: Atmosfera babestua |
| **Produktibitatea [Pragana, 2021], [Gisario, 2019]** | Baxua: ~ 0,1-0,2 kg/h | Ertaina: ~0,5-1 kg/h | Altua: ~3-11 kg/h | Altua: ~ 10kg/h |
| **Pieza tamaina** | Makinaren lan eremuaren tamainak mugatua (max. 800 x 400 x 500 mm) [GE Additive, 2021-a] | Handia, makinaren irisgarritasunak mugatua | Handia, makinaren irisgarritasunak mugatua | Handia, makinaren irisgarritasunak mugatua |
| **Konplexutasun geometrikoa** | Altua | Ertaina | Baxua-Ertaina | Baxua-Ertaina |
| **Aplikazio industriala** | Pieza konplexuen fabrikazio zuzena | Piezen konponketa, estaldurak, piezen fabrikazio zuzena | Piezen konponketa, estaldurak, piezen fabrikazio zuzena | Piezen konponketa, estaldurak, piezen fabrikazio zuzena |
| **Ekipamendu kostua** | Altua | Altua | Altua | Baxua |
| **Lehengaien prezioa** | Oso altua | Altua | Baxua | Baxua |

Beraz, metodo horien aukerak eta mugak aztertzean (ikusi II-2. taula), metalen fabrikazio-gehigarriko teknikek etorkizun hurbilean gainditu beharreko erronka asko dituztela ondorioztatzen da. Adibidez, prozesuaren aldagaiak kontrolatu behar dira, hala nola, hozte-prozesuaren denbora eta tenperatura, babes-atmosferaren konposizioa eta materialaren solidotze-abiadura.

Izan ere, aldagai horien ondorio dira lortzen diren piezaren azken propietateak, hala nola, mikroegitura, gainazal-akabera, erresistentzia mekanikoa edo nekearekiko erresistentzia. Gainera, kontuan hartu behar dira honako aldagai hauen kontrol eskasaren ondorioak: porositate gisara azaltzen diren akatsak, hondar-tentsio gehiegizkoak, oinarri-materialarekiko atxikidura txikiegia edo propietate mekanikoen galera [Sames, 2016].

Bestalde, gaur egun, kasu askotan, fabrikazio-gehigarri metalikoko teknologiak prototipoen fabrikaziora, balio erantsi handiko pieza txikien ekoizpenera eta konponketetara mugatzen dira [Dilberoglu, 2017]. Beraz, fabrikazio-metodo tradizionalak ordezkatzeko eta 4.0 Industriaren oinarrizko elementu bihurtzeko, teknologia horiek dituzten oztopoak gainditu ditzaketela eta masa-ekoizpenera egokitu daitezkeela erakutsi beharko dute.

# 3 WAAM teknologia

## 3.1 Sarrera

Gaur egun, arku eta hari bidezko fabrikazio-gehigarriko prozesua *(Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM*) fabrikazio-prozesu interesgarri bihurtu da, tamaina handiko eta konplexutasun geometriko ertaineko pieza metalikoak kostu txikiarekin fabrikatzeko aukerari esker [Cunningham, 2018]. Teknologia hori fabrikazio-gehigarri metalikoko teknologien artean sailkatzen da, Energiaren ezartze zuzena (DED) taldearen barruan.

Teknologia honen jatorria 1925an dago, Bakerrek [Baker, 1925] dekorazio-objektuak fabrikatzeko bero-iturri gisara arku elektriko bat erabiltzea proposatu zuenean hari formatuko materiala urtzeko. Ordutik, teknologiak asko eboluzionatu du, batez ere azken hamabost urteetan, gaur egun WAAM bezala ezagutzen duguna izan arte [Derekar, 2018]. Egun, WAAM teknologia fabrikazio-prozesu interesgarri bihurtu da birtualki mugarik gabeko tamaina duten Near net shape (NNS) piezak egiteko material metaliko ezberdinetan, hala nola, titanio-aleazioetan, altzairuetan, nikel-aleazioetan, aluminio-aleazioetan, etab. [Wu, 2018-b].

Bere ezaugarriei dagokienez, WAAM prozesua soldadura automatikoko prozesu baten antzekoa da [Williams, 2016-b]. WAAM teknologiarako behar den

ekipamendua, funtsean, energia-iturri batek, haria elikatzeko sistema automatiko batek, zuzi batek, manipulazio-sistema batek (robot antropomorfiko batean edo makina kartesiar batean oinarrituak) eta sistema osagarri batzuek osatzen dute, esaterako, babes-gasaren sistemak [Pan, 2018]. Funtsean, prozesu honetan, energia-iturriak haria arku elektriko baten bidez urtzen du eta manipulazio-sistemari esker geruzaz geruza oinarri-materialaren gainean ezartzen du, nahi den aurreforma lortuz.

Prozesuan zehar, atmosferako gasen ondorioz materialaren kutsadura saihesteko eta oxidoen, nitratoen edo beste ezpurutasun batzuen agerpena gutxitzeko, bainu urtua emari egokia duen babes-gas batekin babesten da. Gasaren emaria handiegia bada, gehiegizko gasak porositatea eta penetrazio txikia eragin ditzake, bainu urtuan sortutako turbulentzien ondorioz. Gainera, gas horren konposizioa garrantzitsua da, beroaren transferentzian eragiten baitu [Cunningham, 2018]. Rodrigues et al.-ek [Rodrigues, 2019-b] babes-gasen eta emari desberdinen eragina aztertzen zuten hainbat lan laburbildu zituzten, eta ondorioztatu zuten parametro horiek batez ere fabrikatutako piezen propietate mekanikoei eta itxura geometrikoari eragiten zietela. Ikerketa honek, lan honetan aipatutako beste lan batzuek bezalaxe, parametroen aukeraketan eta prozesuan berauek duten eraginaren garrantzian foku berezia ezartzen du.

Fabrikazio-gehigarriaren ondoriozko aurrerapen handia, gaur egun industrian erabiltzen diren fabrikazio-metodoak, esaterako, mekanizazioa, forjaketa, galdaketa eta soldadura, ordezteagatik edo horiekin konbinatzeagatik etorriko da. Kasu honetan, material metalikoen fabrikazio-gehigarriaren inpaktua askoz ere handiagoa izango da, merkatu-segmentu zabalagoetan erabiltzeko aukera baitago.

Aurrerapen hori posible izango da baldin eta soilik fabrikazio-gehigarriko sistema komertzialek osagaien fabrikazio-kostu askoz txikiagoak, ezarpen-tasa altuagoak eta fabrikazio-bolumen handiagoak eskaintzen badituzte. Fabrikazioaren kostua bi faktoreren mende dago nagusiki: produktibitatea, ezarpen-tasari lotua eta *buy-to-use* ratioa, fabrikazio-gehigarriko prozesuen ondoren ezabatu beharreko material kopurua adierazten duena. Cranfield-eko Unibertsitateak egindako ikerketa batek bi faktore hauen arteko erlazioa erakusten du; ezarpen-tasa handitzean, *buy-to-use* ratioa murrizten da [Williams, 2016-a]. Horregatik, azken horien arteko oreka WAAM prozesuen eraginkortasunaren faktore erabakigarria izango da.

### 3.2 Abantaila eta desabantailak

Beste fabrikazio-teknika gehigarri batzuekin alderatuta, WAAM teknologiaren abantaila nagusiena lortzen dituen ezarpen-tasa altuak dira (1-10 kg/h, materialaren arabera [Cunningham, 2018]) tamaina handiko piezak egin daitezkeelarik. Hala ere, ezarpen-tasaren balio handiak lortzeko, beharrezkoa da hariaren elikatze-abiadura handiak izatea eta horrek ezegonkortasuna sor lezake prozesuan, zimurtasun handiko gainazal-akabera lortzen direlarik. Hori dela eta, oro har, esaten da WAAM prozesu konbentzionalarekin (ez prozesu hobetuekin: GMAW-HW, GMAW Tandem, etb.) ez dela gainditu behar 8 kg/h-ko ezarpen-tasa altzairuetan eta 1 kg/h-koa titanio eta aluminio-aleazioetan, [Williams, 2016-b], bestela, ondorengo mekanizazio-prozesuak luzeegiak liratekeelako.

WAAM teknologiaren beste abantaila aipagarri batzuk ere badaude:

- Ezarritako materialaren kalitatea oso altua da, akatsik gabea eta propietate mekaniko onekin [Cunningham, 2018] [Sames, 2016].
- Erlatiboki, hari formatuan dagoen lehengaiaren kostua txikia da eta kalitate egokia du, propietate ziurtatuekin eta materialetan barietate handiarekin [Sames, 2016]. Zehazki, hari formatuko materialaren kilogramoko prezioa, titanio, altzairu eta nikel-aleazioak bezalako ingeniaritzako materialetan, hauts formakoa baino baxuagoa da [Cunningham, 2018]. Adibidez, batez beste, fabrikazio-gehigarrirako Ti6AI-4V titanio hautsa, aleazio bereko haria baino %141 garestiagoa da. Bestalde, fabrikazio-gehigarrirako tantalio hautsa tantalio hariaren batez besteko kostua baino %7 garestiagoa da. Era berean, ezberdintasun hau handiagoa da beste material batzuetan, fabrikazio-gehigarrirako 316 altzairu herdoilgaitzezko hautsaren eta fabrikazio-gehigarrirako Inconel 625zko hautsaren kostua hari formatuko material bereko lehengaia baino bi aldiz handiagoa da [SCIAKY, 2021]. Gainera, hautsak birziklatzeko sistemen beharra ere murrizten da eta alde batera uzten dira materiala formatu horretan erabilita sortzen diren osasunarekin eta segurtasunarekin erlazionatutako alderdiak.
- Bestalde, ekipamenduaren kostua erlatiboki txikia da, hau da, ez da beharrezkoa kapital handiak inbertitzea sistema bat instalatzeko eta gainera, ekipamenduen hornitzaileen aniztasuna handia da. Izan ere, WAAM teknologiarako beharrezkoa den ekipamendua erraz lor daiteke soldadurako ekipamendua saltzen duen edozein hornitzaileren bidez. Aldiz, beste FGko teknologia batzuetan, hala nola, EBMn, huts-ganbera bat beharrezkoa da eta horrek asko handitzen du ekipamenduaren prezioa

[Cunningham, 2018]. Gainera, mantentze-lanen kostua txikia da, ekipamenduetan ez baitago laserren optikak bezalako osagai sentikorrik.

- Ezarpen-tasa handiekin lortzen diren ekoizpen-denborak laburrak dira [Pan, 2018]. Ohiko mekanizazio teknikekin alderatuta, WAAM teknologiarekin ekoizpen-denborak %40-60 murritz daitezke eta postprozesu-denborak, berriz, %15-20 piezaren tamainaren arabera [Wu, 2018-b].
- WAAM teknologiari esker, amaierako geometriatik gertu dauden piezak lor daitezke (NNS prozesutzat hartzen da) eta lehengaiaren aprobetxamendu-tasa oso handia da. Hala ere, WAAM teknologiaren bidez fabrikatutako piezek ia beti mekanizazio-etapa bat behar izaten dute azken akabera lortzeko. Etapa horretan, ezarritako materialaren zehaztasun geometrikoa eta gainazal-akabera hobetzen dira. Hala ere, materialaren erabilera-efizientzia WAAM teknologian oso handia da, %90etik gorakoa [Liberini, 2017] eta %75etik gora akaberako mekanizazioa kontuan hartzen bada. Adibidez, duela gutxi, aireontzi baten lurreratze-tren baten mihiztadurak fabrikatu ziren WAAM teknologiaren bidez, erabilitako lehengaiaren kopurua %78 murriztuz ohiko mekanizazio teknikekin alderatuta [Williams, 2016-b].
- Gainera, arku bidezko ezarpen-prozesuen eraginkortasun energetikoa bere lehiakideena (laserra edo elektroi-sorta) baino askoz ere handiagoa da (%90) [Liberini, 2017]. Teknologia konbentzionalen aldean, WAAM teknologiak gutxieneko material kantitatea ezartzen eta prozesatzen du, materiala eta energia nabarmen aurreztuz.
- Azkenik, WAAM prozesuak ez du ingurumen-inpaktu handirik sortzen [Wu, 2018-b], batez ere, lehen esan bezala, energetikoki oso eraginkorra delako eta bigarrenik, WAAM prozesuak materialaren erabilera oso eraginkorra egiten duelako.

Aurrez azaldutako abantaila guztiek WAAM teknologia etorkizun handikoa dela adierazten badute ere, teknologia honek oraindik erronka asko ditu gainditzeko. WAAM teknologia erabiltzeko oztopo nagusietako bat, geruzaz geruza fabrikatutako piezetan akabera-eragiketak egiteko beharra da. WAAM prozesua fabrikazio-etapa bat baino ez da; pieza gehienek beste postprozesu-etapa batzuk ere behar dituzte, dela mekanizatua, leundua, tratamendu termikoak, etab. Zimurtasuna, porositatea, mikroegitura eta lortutako hondar-tentsioak desberdinak dira WAAM prozesu mota bakoitzerako eta erabilitako material bakoitzerako. Beraz, aplikazio bakoitzak postprozesatu mota bat eskatuko du.

Lehenik eta behin, WAAM prozesuaren zehaztasun geometrikoa ez da bikaina (fabrikatu daitezkeen hormarik finenak 2,5-3 mm artekoak dira) eta, gainera,

lortutako gainazal-akaberak ez dira onargarriak aplikazio batzuentzat [Horgar, 2018]. Adibidez, 1-2 mm-ko geruza altuera tipikoekin, gainazal-akabera tipikoa Ra=500 µm-koa da [Williams, 2016-b], eta azken hori oso tamaina txikiko piezetan WAAM teknologia erabiltzeko faktore erabakigarria eta murriztailea izan daiteke. Lortzen den gainazaleko kalitate baxua konpontzeko eta piezek perdoi geometrikoak errespetatzen dituztela ziurtatzeko, ia beti aurreikusten da azken mekanizazio-postprozesatu baten beharra.

Bigarrenik, amaierako mekanizazioaz gain, WAAM bidez fabrikatutako piezei aplikatu beharreko tratamendu termikoak ere aipatu behar dira, prozesu honetan arku elektrikoa erabiliz piezak geruzaz geruza ezartzeak ziklo termikoak sortzen baititu metal solidotuan eta oinarri-materialean. Zehazki, prozesuaren bero-ekarpenak urtze partziala eta tratamendu termikoak eragiten dituzte aurreko geruzetan [Derekar, 2018]. Hori dela eta, piezek estres termiko handia jasaten dute, eta ondorioz, hondar-tentsioak sortzen dira, tratamendu termikoen bidez askatu behar direnak. Azterketa batzuetan, tratamendu termikoez gain, geruzen arteko hozte behartua edo askea erabili izan da arazo horri irtenbidea emateko [Pan, 2018]. Adibidez, ondo dokumentatuta dago tratamendu termikoek mikroegitura eta propietate mekanikoak hobetzen dituztela Inconel 718n eta Ti6Al4Vn [Dhinakaran, 2020]. Gainera, WAAM bidez fabrikatutako Ti6Al4V materialean, Martina et al.-ek [Martina, 2015-b] ondorioztatu dute postprozesu gisara azaleko ijezketa aplikatuz, alea findu daitekeela eta mikroegitura kolumnarretik ekiaxialera alda daitekeela.

Azkenik, WAAM bidez fabrikatzen diren piezek, prozesu parametro egokiak aukeratzen ez badira, barneko edo kanpoko akatsak izan ditzakete, hala nola, poroak, betetze-faltak, akabera ez egokiak eta arrakalak [Geng, 2017], [Xiong, 2018]. Gainera, teknologia honetarako CAD sistemak oraindik guztiz garatu gabe daude eta monitorizazio- eta kontrol- sistemak urriak dira [Pan, 2018].

Horregatik guztiagatik, kontuan izan behar da beste fabrikazio-gehigarriko prozesu batzuek arreta handiagoa jaso dutela azken urteotan. WAAM prozesuak etorkizunera begira potentzial handia badu ere, oraindik hainbat alderdi garatu behar dira teknologia horren garapen osoa eman ahal izateko, hasierako diseinutik hasi eta piezen kalitatearen azken egiaztapeneraino.

Bai distortsio termikoak murrizteko, bai gainazaleko akabera onargarriak eta tolerantzia geometrikoak mantentzeko, material bakoitzerako hautatutako parametroak funtsezkoak dira [Horgar, 2018]. Soldadu-kordoiaren ezaugarriak ere, hala nola, kordoiaren geometria, penetrazioa, termikoki erasandako eremuaren sakonera, etab., prozesu-parametroen araberakoak dira. Horien artean, honako hauek dira garrantzitsuenak: hariaren elikatze-abiadura (*Wire*

*Feed Rate, WFR*), bero-ekarpena (*Heat Input, HI*), hariaren diametroa, aitzinamendu-abiadura (*Travel Speed, TS*), arkuaren forma, Stick-outa (soldadura-zuziaren ahotik haria ateratzen den distantzia), erabilitako gasaren konposizioa eta emaria eta ezarpen-sekuentzia eta ibilbidea [Nagesh, 2002].

## 3.3 WAAM teknologia motak

Soldadura-iturriaren izaeraren arabera, hiru WAAM prozesu mota bereizten dira: 1) *Gas Metal Arc Welding* (GMAW) teknologian oinarritutako WAAM prozesua [Horgar, 2018], 2) *Gas Tungsten Arc Welding* (GTAW) teknologian oinarritutako WAAM prozesua [Qi, 2018] eta 3) *Plasma Arc Welding* (PAW) teknologian oinarritutako WAAM prozesua [Jia, 2020]. GMAW (II-4 c.1. irudia), GTAW (II-4 c.2. irudia) eta PAW (II-4 c.3. irudia) prozesuak soldadura-prozesuak dira, bakoitza bere ezaugarri eta aplikazioekin. Prozesu horietan, arku elektriko baten bidez urtutako materiala oinarri-materialaren gainean ezartzen den heinean, soldadura-kordoiak eratzen dira, eta geruzaz geruza kordoi horiek gainjarrita, geometria anitzeko piezak egin daitezke [Veiga, 2020]. Ezarpen-prozesu mota aukeratzea materialaren eta fabrikatu beharreko geometriaren araberakoa da. Hala, PAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua da titaniozko tamaina ertaineko piezak fabrikatzeko aukerarik egokiena, lortutako propietate mekaniko altuak eta kutsadura arrisku txikia direla eta. Bestalde, ezarpen-tasa handiak behar dituzten pieza handien kasuan, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua izango litzateke aukerarik egokiena altzairuzko eta aluminiozko piezak fabrikatzeko [Singh, 2020]. Azkenik, GTAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua 3-5 mm inguruko horma finak egiteko erabiltzen da.

### 3.3.1 GTAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua

GTAW eta PAW prozesuek kontsumigarria ez den tungstenozko elektrodo bat daramate eta baita haria ez-koaxialki elikatzeko sistema bat ere. Sistema honen bidez gainera ezarritako materialaren kalitatea ziurtatzeko haria orientatu behar da [Wu, 2018-b]. Hori eragozpen bat da, piezen fabrikazioaren programazioa asko zailtzen baitu [Singh, 2020].

GTAW prozesuan, II-4 c.2. irudian ikusten den bezala, arkua elektrodoaren eta oinarri-materialaren edo piezaren artean sortzen da eta bainu urtua babes-gas noble baten bidez babesten da, normalean argona edo helioa, material urtuaren inguruan babes-atmosfera bat sortuz [Wu, 2018-a]. Teknologia honetan ez da proiekziorik sortzen eta egokia da horma meheak dituzten piezak fabrikatzeko.

### 3.3.2 PAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua

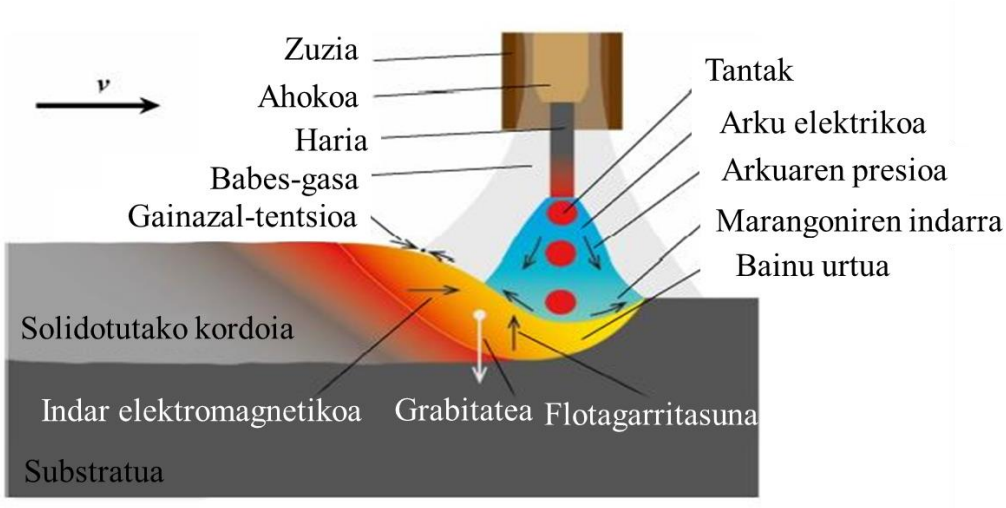
PAW prozesuan, II-4 c.3. irudian ikusten den bezala, GTAW prozesuan ez bezala, bi gas erabiltzen dira: zuziaren gorputzaren barruan dagoen tungstenozko elektrodoa inguratzen duen gas plasmatikoa eta bainu urtua babesten duen gas babeslea. Bi gas horiek hodi bereizietatik doaz eta arku elektrikoari esker gas plasmatikoaren ionizazioa bultzatzen da. Horrela, plasma zuziaren ahotik irteten da eta arku elektrikoa uzkurtzen du, oinarri-materialera tenperatura oso altuak lor ditzakeen zurrusta kontzentratua zuzenduz.

Prozesu horretan lortutako dentsitate energetikoa eta tenperaturak GTAW prozesuan lortutakoak baino askoz handiagoak dira eta termikoki kaltetutako eremua askoz txikiagoa da. Horrela, PAW teknologiari esker, kalitate handiko soldadura-kordoiak lor daitezke, piezaren distortsio txikiagoarekin, egonkortasun handiko prozesua lortuz [Singh, 2020].

Plasma-arku bidezko ezarpenak propietate mekaniko onenak eskaintzen ditu, batez ere titanioa bezalako aleazio aeronautikoetan [Artaza, 2020-b]. Adibidez, Artaza et al.-ek [Artaza, 2019] Mn4Ni2CrMo altzairuan GMAW eta PAW teknologietan oinarritutako WAAM prozesuen bidez fabrikatutako piezen propietate mekanikoak alderatu zituzten. Haien ikerketak erakutsi zuen bi teknologia horiekin, forjaketa bidez lortzen diren propietate mekaniko estandarrak baino hobeak lortzen direla. Hala ere, ondorioztatu zuten PAW teknologiarekin GMAW teknologiarekin baino pixka bat propietate altuagoak lortzen direl.

### 3.3.3 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua

GMAW prozesuan, haria bera elektrodo kontsumigarria da eta modu koaxialean elikatzen da, II-5. irudian ikus daitekeen bezala. Prozesu horretan, elektrodoaren eta piezaren artean arku elektrikoa eratzen da eta horrela, haria (elektrodoa) urtu eta geruzaz geruza erabakitzen den lekuan ezartzen da. Bainu urtua prozesuan zehar aktiboa edo inertea izan daitekeen babes-gas batekin babesten da. Gas honen izaeraren arabera, MAG (*Metal Active Gas*) eta MIG (*Metal Inert Gas*) prozesuak bereizten dira.



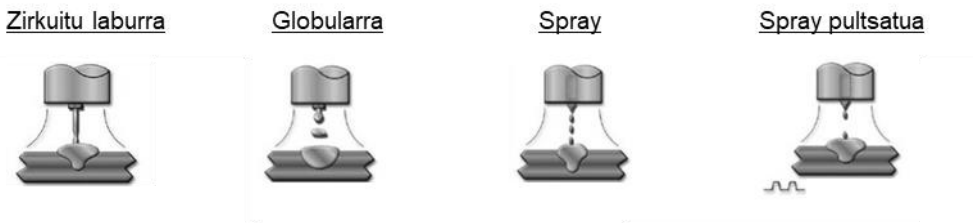

*II-5. irudia. GMAW prozesuaren errepresentazio grafikoa ([Hu, 2021] lanetik egokitua)*

Hurrengo atalean sakon aztertuko da GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua, baina laburpen gisara WAAM prozesuaren izaera kontuan hartuta eta tamaina ertain eta handiko piezak fabrikatzeko ekonomikoki lehiakorra izan behar duela kontuan hartuta, GMAW prozesuaren abantailarik garrantzitsuena gainerako teknologia gehigarriekin alderatuta lortutako ezarpen-tasa altuak dira.

# 4 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua

## 4.1 Materialaren transferentzia eta funtzionamendu-moduak

Aipatu bezala, GMAW teknologian arku elektriko bat eratzen da hari formako elektrodoaren eta piezaren artean. Horrela, metal urtuzko tantak elektrodotik (haria) bainu urtura transferitzen dira. Transferentzia hori hainbat modu ezberdinetan gerta daiteke, hala nola, spray eran, era globularrean edo zirkuitu labur bidez [Kim, 1993] [Ferraresi, 2003] [Scotti, 2014]. II-6. irudian ikus daitezke material transferentzia mota nagusiak.




*II-6. irudia. Materialaren transferentzia mota nagusiak*

Adibidez, zirkuitu labur bidezko transferentzia bero-ekarpen baxuko prozesua da. Prozesu horretan materiala transferitzen da elektrodoa elektrikoki murriztua denean, hau da, elektrodoaren eta oinarri-materialaren edo bainu urtuaren artean kontaktu fisikoa dagoenean. Lortzen den bero-ekarpen baxuari esker,

transferentzia mota hau oso egokia da xafla finen arteko soldadurarako edo soldadura posizionalerako [Scotti, 2012].

Transferentzia globularrean, bestalde, materiala tanta irregular handietan transferitzen da grabitatearen laguntzaz. Tanta hauek elektrodoak baino diametro handiagoa dute, eta, beraz, euren ezarpena eta metaketa nahikoa erratikoa izan daiteke, zipriztinak eta balizko hutsuneak sortuz [Nassan, 2003].

Aldiz, spray erako transferentzia energia handiko prozesua da, non materiala urtutako tanta uniforme txikien zurrusta baten bidez transferitzen den. Arkuak axialki bultzatzen ditu tanta hauek, ezarpen-tasa handiak lortzen direlarik. Azkenik, spray pultsatu transferentzia modua oso kontrolatua dagoen spray transferentziaren aldaera bat da. Horrelako transferentzia izateko, intentsitate-seinalea pultsukakoa izan behar da, oinarrizko balio batetik maximo batera fluktuatzen duelarik. Hala, intentsitate pultsu bakoitzean material tanta kontrolatu bat transferitzen da elektrodotik bainu urtura [Wu, 2004]. Gainera, transferentzia modu horrekin, transferentzia globularrean eta zirkuitu laburrekoan ohikoak diren zipriztinak, betetze faltak eta fusio osatugabeen ondoriozko akatsak gutxitzen dira [Dos Santos, 2017] [Zheng, 2021].

Azken hamarkadetan, materialaren transferentzia kontrolatzeko, maiztasun altuko kontrol-estrategiak dituzten soldadura-iturriak erabiltzen dira. Funtzionamendu-modu bakoitzak ezarritako kontrol-estrategiek (soldadura-iturri bakoitzak bere funtzionamendu-moduak izan ditzake) hariari aplikatutako intentsitate-seinalearen forma definitzen dute. Intentsitate-seinalearen formak bainu urtuaren dinamikan eta bero-ekarpenean eragiten du, faktore horiek funtsezkoak izanik mikroegitura espezifikoak lortzeko edo akats metalurgikoak saihesteko. Horrelako kontrolak dituzten soldadura-iturriei makina sinergiko deitzen zaie [Subramaniam, 1999].

Beraz, soldadura-iturrien fabrikatzaileek definituta dute urtu beharreko harian aplikatzen den intentsitate-seinalearen forma, funtzionamendu-modu ezberdinak sortuz, esaterako, CMT (*Cold Metal Transfer*) edo Cold Arc, Pulse eta abar. [Selvi, 2018] [Kah, 2013]. Zehazki, doktore-tesi honetan erabiliko diren EWM [EWM, 2021] enpresaren soldadura-iturriek bost funtzionamendu-modu nagusi dituzte: GMAW estandarra, GMAW pultsatua, Cold Arc, Force Arc eta AC pultsatua, bakoitza bere ezaugarriekin.

### 4.1.1 GMAW estandarra eta GMAW pultsatua

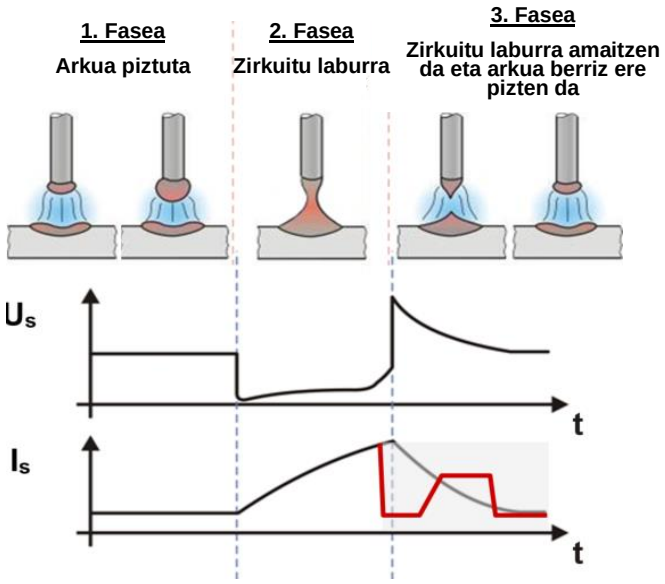
GMAW estandarra deritzon funtzionamendu-moduak ezarpen-tasa altuak ahalbidetzen ditu eta materialaren transferentzia modua globularraren eta Spray erakoaren artean izaten du. Aldiz, GMAW pultsatu moduak, pultsu bakoitzean, modu kontrolatuan, urtutako material tanta bat transferitzen du haritik bainu urtura, ezarpen-tasa altuekin.

Energiaren transferentzia GMAW pultsatuan GMAW estandarrean baino txikiagoa da eta aldi berean, beroaren sarrera ere murriztu egiten da [Dos Santos, 2017] [Liang, 2018]. Horrela, Luo et al.-ek [Luo, 2018] arku pultsatuko eta arku ez pultsatuko WAAM prozesuak aztertu zituzten eta ondorioztatu zuten fabrikazio-eraginkortasuna eta prozesuaren kontrola handiagoak zirela arku pultsatuko WAAM prozesuetan. Gainera, pultsukako prozesuek soldadura ke gutxiago, zipriztin gutxiago eta betetze falta gutxiago sortzen dituzte [Kah, 2013].

### 4.1.2 Cold Arc

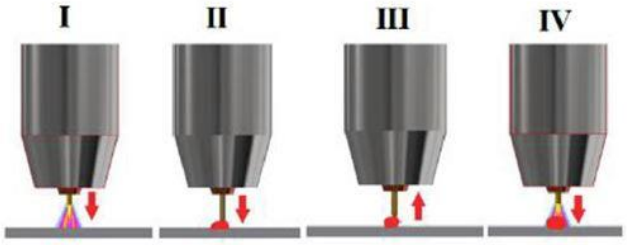
EWM enpresak 2004an diseinatutako eta aurkeztutako Cold Arc moduak materiala modu kontrolatuan transferitzen du zirkuitu laburreko prozesu baten bidez. Prozesu mota hori posible da intentsitate-seinalearen kontrol digital oso azkar bati eta inbertitzaileen konmutazio mota dinamikoki oso azkarrari esker.

Intentsitate-seinalearen prozesadorea, arkua berriro piztu aurretik, hau da, zirkuitulaburraren ondoren, energiaren berehalako erauzketa kontrolatzeko erabiltzen da; une horretan gailur intentsitatea dramatikoki jaisten delarik. II-7. irudian, Cold Arc seinalea zirkuitulaburreko ohiko seinalearekin alderatzen da. Lehenengo bi faseak berdinak dira bi kasuetan, arkua piztuta dago eta elektrodoaren materiala urtuz doa bainu urtura gerturatzen delarik. Elektrodoak pieza ukitzen duen unean, tentsioa ia balio nulura jaisten da zirkuitulaburra gertatzen delarik, intentsitatea bat-batean handitzen den bitartean. Orduan, intentsitatea izugarri murrizten da, metal urtua eta elektrodoaren arteko loturaren haustura leuna ahalbidetzeko, zipriztinik gabe. Berehala, arkua piztu egiten da. Arkua egonkortu ondoren, intentsitatea denbora-tarte labur batez apur bat handitzen da, banaketa erregular bat lortzeko. Gainera, aldi honetan elektrodoaren puntan fusio-kono bat sortzen da, prozesuaren jarraitutasun leuna bermatzeko [Kah, 2013].




*II-7. irudia. Prozesuaren errepresentazio grafikoa eta intentsitate eta tentsio-seinaleen forma Cold Arc funtzionamendu-moduan ([EWM, 2021] lanetik egokitua)*

Fronius enpresak (Fronius, Austria), bere aldetik, Cold Arc moduaren antzekoa den CMT funtzionamendu-modua garatu zuen, WAAM teknologiarako aktiboki ikertu dena, batez ere aluminio-aleazioen ezarpenerako [Zhang, 2019]. CMT soldadura prozesuak, Cold Arc moduak bezala, zirkuitulaburreko transferentzia modua erabiltzen du [Selvi, 2018]. Sistema honek prozesua kontrolatzen duten abiadura handiko kontrol digitala, inbertsoreak eta prozesadoreak ditu; hauen bidez arkuaren luzera, intentsitatea eta tentsioa erabakitzen direlarik. CMT funtzionamendu-moduak materialaren transferentzia kontrolatzen du elektrikoki lagundutako metodoen bidez, zirkuitu laburraren hastapena eta iraupena erabakiz eta mekanikoki lagundutako metodoen bidez, II-8. irudian ikus daitekeenez.




*II-8. irudia. Hariaren elikatze kontrolaren fase nagusiak CMT prozesuan [Prado-Cerqueira, 2017]*

Laburbilduz, Cold Arc eta CMT moduetan proiekzioak eta bero-ekarpena minimizatzen dira ohiko GMAW funtzionamendu-moduekin (pultsatua edo estandarra) alderatuta [Shukla, 2020]. Hala ere, prozesu horiek ezarpen-tasa txikiagotara mugatzen dira (altzairuetan 2-3 kg/h, CMT 10 kg/h arte), bainu urtu txikiak sortzen dituztelarik [Tabernero, 2018].

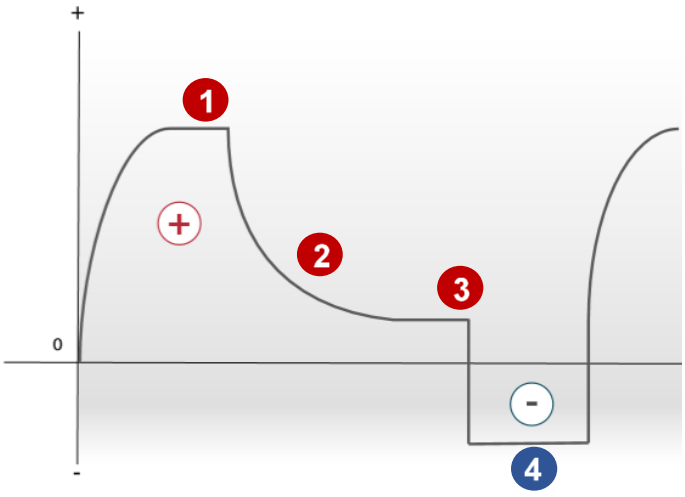
Adibidez, Panchenko et al.-ek [Panchenko, 2020] Cold Arc modua erabili zuten, GMAW autoerregulatu baten ordez, beroaren sarrera %16 murrizteko. Beroa murrizteak material ezartzearen eraginkortasuna hobetzen du eta kordoiaren penetrazioa murrizten du. Horrela, lodiera txikiko hormak egin daitezke ezarpen-tasa txikiagoekin, piezan sartutako bero-ekarpena txikia baita. Azkenik, Derekar et al.-ek [Derekar, 2020] 5183 aluminio-aleazioan, GMAW pultsatua eta CMT funtzionamendu-moduak alderatu zituzten, GMAW pultsatu moduak porositate maila altuagoak lortzen zituela ondorioztatuz.

### 4.1.3 Force Arc

Hirugarrenik, Force Arc funtzionamendu-modua erabiltzen da ezarpen-tasa altuak lortzeko, presio handiko arku boltaikoarekin. Horrela, direkzio-egonkortasun handia eta penetrazio sakona eta kontzentratua duten soldadurak lortzen dira [EWM, 2021]. Sustraien soldaduretarako prozesu egokia da, penetrazio handia eta segurua lortzen baita. Gainera, teknologia honekin angeluko soldaduretan juntura lodierarik handienak soldatzea posible da.

### 4.1.4 AC pultsatua

Azkenik, AC pultsatu prozesuan, intentsitate-seinaleak polaritate aldakorra du eta ezarpen-tasa handiak lortzen dira. II-9. irudian ikusten denez, fase positiboan tanta sortzen da (1. gunea), 2. gunean tanta askatzen da, 3. gunean oinarri-intentsitatera iristen da eta fase negatiboan (4. gunea) ezarri beharreko haria aurreberotu eta garbitu egiten da. Prozesu honek erredura aztarnarik gabeko soldadura garbiak lortzen ditu xafla finetan, baita AlMg aleazioetan ere. Zehazki, aluminio-aleazioen soldadura ahalmena mugatua izan arren, AC pultsatu prozesua bereziki egokia da soldadura mota horretarako.




*II-9. irudia. Intentsitate-seinalearen forma AC pultsatu funtzionamendu-moduan [EWM, 2021]*

Hala ere, polaritate aldakorreko intentsitate-seinaleak izateak ez du berritasun handirik, baina ezarpen-tasa handiko prozesuetan horrelako seinaleak erabiltzea garapen berritzailea da. Aurretiko azterlan batzuetan polaritate aldakorreko CMT teknika aurreratuen eragina aztertu izan da. Hain zuzen ere, CMT aurreratua (CMT-ADV) eta CMT aurreratu pultsatua (CMT-PADV) izenekin ezagutzen dira funtzionamendu-modu hauek eta batez ere, aluminio-aleazioen soldadurarako erabili izan dira [Cong, 2017], [Zhang, 2018-a], [Gu, 2014]. Hala ere, CMT teknologiari buruzko azterlan hauetan erlatiboki ezarpen-tasa baxuak erabili izan dira. Aldiz, doktore-tesi honetan AC pulsatu teknika aztertuko da, ezarpen-tasa altuak lortuz, WAAM teknologiari aplikatutako aluminiozko soldaduretan azken berrikuntza izanik.

Adibidez, Gu et al.-ek [Gu, 2014] CMT-PADV prozesua materialaren porositate maila murrizteko modu eraginkorra dela frogatu zuten, polaritate aldakorreko seinaleak aluminiozko piezak fabrikatzeko egokiak direla ondorioztatuz. Gainera, fabrikatutako piezek lortutako erresistentzia eta deformazio plastikoaren balioak egokiak ziren. Hala ere, ezarpen-tasa nahikoa baxua zen kasu honetan: 1,08 kg/h. Gainera, Zhang et al.-ek [Zhang, 2020-b] eta Scotti et al.-ek [Scotti, 2020] CMT-PADV prozesuko polaritate positibo/negatibo erlazioa, intentsitate-seinaleak polaritate positiboa eta negatiboa dituen uneen arteko erlazioa, alegia, aztertu zuten.

## 4.2 Abantaila eta desabantailak

Arestian aipatu bezala, WAAM teknologiak tamaina ertain eta handiko piezak fabrikatzeko ekonomikoki lehiakorra izan behar duela kontuan hartuta, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua aukera ona da, fabrikazio-gehigarriko beste teknologia batzuekin alderatuta lortzen dituen ezarpen-tasa altuak baitira. Ezarpen-tasa funtzionamendu-moduaren araberakoa da. GMAW pultsatu, AC pultsatu eta Force Arc moduek ezarpen-tasa altuak lortzen dituzte; aldiz, Cold Arc moduak tasa baxuagoak lortzen ditu. Adibidez, altzairuen kasuan, 10 kg/h-ko tasak lor daitezke. Lehengai gisara hauts metalikoak erabiltzen dituzten prozesuekin, SLMrekin (0,6 kg/h) edo LMDrekin (1 kg/h), alderatuz 16 aldiz handiagoak [Tabernero, 2018]. Oro har, erabilitako materialaren eta parametroen arabera, GMAW teknologiaren ezarpen-tasak 1-10 kg/h artean daude [Cunningham, 2018] [Williams, 2016-b], GTAW eta PAW teknologietan oinarritutako WAAM prozesuekin alderatuta 2-3 aldiz handiagoak izanik.

Gainera, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesurako behar den ekipamendua nahiko merkea da eta teknologia mota hau material metaliko askotan erabil daiteke. Adibidez, altzairuzko eta aluminio-aleaziozko piezak ezartzeko oso prozesu egokia da. Automatizatzeko prozesu erraza dela ere

aipatu behar da eta PAW eta GTAW prozesuetan ez bezala, materiala ezartzean, ez da zuzia orientatu behar, diseinu-askatasun handia lortzen delarik. Azkenik, WAAM teknologiaren tamaina-muga oso handia da, teknologia hori Gantry makina batean edo robot antropomorfiko batean instala baitaiteke geroago zalduko denez.

Hala ere, GMAW prozesua ez da oso egonkorra eta GTAW eta PAW prozesuek baino soldadura ke gehiago sortzen ditu, korronte elektrikoa harian zuzenean sartzen baita [Wu, 2018-b]. Gainera, ezaugarri horrek zipriztinak eta gehiegizko beroketa eragin ditzake eta horrek materialen propietate mekanikoak erasan ditzake.

Gainera, ezarpen-tasa altuak lortzeko, beharrezkoa da hariaren elikatze-abiadura altuak izatea eta horrek ezegonkortasunak sor ditzake prozesuan gainazalean uhin jarraiak sortuz. Horregatik, hariaren elikadura-balioak kontrolatu behar dira, gainazaleko akabera-balio onargarriak izateko eta ezarritako piezak eskatzen dituen tolerantziak bermatzeko [Williams, 2016-b]. Hala ere, GMAW bidezko ezarpenaren ondoren, azken mekanizazioa ia beti beharrezkoa izango da behar diren perdoi geometrikoak lortzeko.

### 4.3 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuko parametroen nagusiak

Ezarri beharreko hariaren osaera eta babes-gasaren konposizioa aukeratu ondoren, teknologia horren parametro nagusien artean honako hauek daude:

- Elikatutako hariaren diametroa
- Babes-gasaren emaria
- Funtzionamendu-modua
- Hariaren elikatze-abiadura (*Wire Feed Rate, WFR*)
- Aitzinamendu-abiadura (*Travel Speed, TS*)
- Stick-outa
- Ezarpen-estrategia
- Bero-ekarpena (*Heat Input, HI*)

Lehenik eta behin, prozesuan elikatuko den hariaren diametroa zehaztu beharko da. Diametro hori, normalean, 0,8-1,6 mm artekoa izan ohi da. Gainera, aukeratutako materialaren arabera, babes-gasaren konposizioa eta emaria ere aukeratu beharko dira. Ezarpena egokia izateko, gasaren eta ezarri beharreko materialaren arabera, 12-30 l/min artekoak izango dira erabilitako emariak.

Parametro horiek zehaztu ondoren, nahi den funtzionamendu-modua aukeratuko da (4.1 atalean laburtuak) eta hariaren elikatze-abiadura ezarriko da. Bi balio horien arabera, energia-iturriak elikatutako harian sartuko diren eta uhin-forma zehatz bat duten intentsitate-seinaleak sortuko ditu. Gainera, WAAM prozesuaren beste parametro garrantzitsu bat WAAM sistema instalatuta dagoen makinaren aitzinamendu-abiadura balioa da.

Bestalde, Stick-outa (soldadura-zuziaren ahotik haria ateratzen den distantzia) ere zehaztu beharreko parametroa da, eta prozesuan zehar harian sartutako intentsitatean eragina izango du. Azkenik, WAAM prozesuan aukeratu beharreko beste parametro nagusietako bat hurrengo atalean sakontasun handiagoz aztertuko den ezarpen-estrategia da. Horrela, bero-ekarpena prozesuan sartutako energiak eta hautatutako ezarpen-estrategiak zehaztuko dute (4.5 atalean xehetasunez berrikusia) [Nagesh, 2002].

## 4.4 Ezarpen-estrategiak

GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren produktibitatea eta zehaztasun geometrikoa hobetzeko helburuarekin, lehenago publikatutako hainbat lanetan ezarpen-estrategia desberdinak erabiltzea proposatu da, esaterako, gainjartze-estrategia, oszilazio-estrategia edo matrize-estrategia. Gainjartze-estrategia kordoi zuzenak bata bestearekin gainjartzen dituena da, nahi den eremua materialez estaltzeko. Oszilazio-estrategian, bestalde, eremu hori estaltzeko, sistema mugikorrak oszilazio- edo *weaving*-estrategia bat deskribatzen du. Gainjartze-estrategiaren bidez nahiz oszilazio-estrategiaren bidez fabrikatutako hormak II-3. taulan jasotzen den bezala izendatzen dira.

*II-3. taula. Hainbat estrategiaren bidez fabrikatutako hormak definitzeko erabilitako nomenklaturaren laburpena*

| Horma mota | Definizioa | Irudikapena |
|---|---|---|
| **Horma sinplea** | Kordoi bakarra geruza bakoitzean | |
| **Horma gainjarri bikoitza** | Bi kordoi gainjarri geruza bakoitzean | |
| **Horma gainjarri hirukoitza** | Hiru kordoi gainjarri geruza bakoitzean | |
| **Horma oszilatu sinplea** | Kordoi oszilatu bakarra geruza bakoitzean | |

Azkenik, matrize-estrategian, pieza bakarra egin ordez, aldi berean hainbat pieza fabrikatzen dira, hau da, lehen piezaren geruza bat ezarri ostean, hurrengo piezaren geruza bera ezarriko da eta horrela hurrenez hurren.

Adibidez, Ma et al.-ek [Ma, 2019] ikerketa sakona burutu zuten aluminio-aleazioetan metalezko egitura handiak eta horma meheak fabrikatzeko oszilazio-

estrategia erabiltzeari buruz. Ikerketa honen helburu nagusia goiko gainazalaren lautasuna hobetzeko estrategia oszilatzailea erabiltzea eraginkorra zela ondorioztatzea zen. Bestalde, Caballero et al.-ek [Caballero, 2019] ezarritako altzairu herdoilgaitzaren (17-4 PH) mikroegituran eta propietate mekanikoetan, WAAM prozesuaren hainbat aldagaik, hala nola, gas babesle motak, ezarpen-estrategiak (kordoi sinplea, oszilazioa eta kordoi gainjarriak) eta ondorengo tratamendu termikoek zuten eragina zehazteko ikerketa bat egin zuten. Bestalde, Xu et al.-ek [Xu, 2019] altzairu martensitikoetan gainjartze paraleloa, triangelu-formako oszilazioa eta karratu-formako oszilazioa alderatu zituzten. Azkenik, Dirisu et al.-ek [Dirisu, 2019] erresistentzia mekanikoaren eta hausturarekiko erresistentziaren balioak alderatu zituzten, oszilazio-estrategiaren eta kordoi bakarraren bidez fabrikatutako altzairuzko osagaietan. Gaur egun arte, ikerketa horiek guztiak ezarpen-tasa txikiko GMAW funtzionamendu-moduetarako egin dira. Beraz, oraindik ez da aztertu oszilazio-estrategiak ezarpen-tasa handiko prozesuetan duen eragina.

### 4.5 Bero-ekarpena materialaren ezarpen-prozesuan

WAAM teknologiaren azterketaren barruan, merezi duen arreta guztia jaso ez duen beste alderdi bat bero-ekarpena da. WAAM prozesuan, fusio- eta solidotze-ziklo ugariek bero-hedapen ez uniformea sortzen dute fabrikatutako osagaietan. Bero hedapen eta metaketa ez-lineal honek lortutako osagaien morfologia, mikroegitura eta propietate mekanikoak zehazten dituzte [Wu, 2018-b]. Adibidez, Li et al.-ek [Li, 2020-a] bero-ekarpenak, Al-7Si-0,6Mg aluminio-aleazioan fabrikatutako osagaien mikroegituran eta propietate mekanikoetan, eragina duela frogatu zuten. Era berean, hariaren elikatze-abiadura eta aitzinamendu-abiadura aldatuta emaitza berberak lortu zituzten, Al-Mg aleaziozko WAAM bidez fabrikatutako probetetan, Su et al.-ek [Su, 2019]. Ti6Al4V aleazioan, Wu et al.-ek [Wu, 2018-a] beroaren metaketak lortutako piezen forma geometrikoari eragiten diola adierazi zuten. Gainera, frogatuta dago bero-ekarpenak barne-akatsen eraketei, hondar-tentsioei, distortsioari eta fase-eraldaketei ere eragiten diela [Oliveira, 2020]. Beraz, argi dago WAAM prozesuan tenperatura monitorizatzeko eta kontrolatzeko sistemak beharrezkoak direla.

Ondorioz, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan sartutako bero-kantitatea handia denez, beharrezkoa da hozte-denborak txertatzea geruzen artean, osagaia hozteko, kolapsoa saihesteko eta bero-metaketaren ondorioak minimizatzeko. Hozte-denbora horiek denbora-tarte finko gisa defini daitezke edo hurrengo geruza ezarri aurretik tenperatura finko bat lortu arteko denbora gisa [Montevecchi, 2018]. Horrela, geruzen arteko tenperatura bero-ekarpenarekin estuki lotuta dagoen parametro bat da. Derekar et al.-ek [Derekar, 2019]

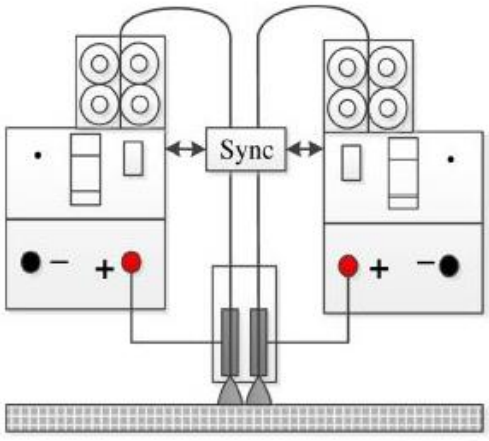
aluminiozko osagaietan geruzen arteko tenperaturak porositatean eta lortutako propietate mekanikoetan duen eragina aztertu zuten. Gainera, azterlan honetan, ezarpen-estrategia oszilatzailea erabili zuten.

## 4.6 GMAW prozesuan oinarritutako WAAM teknologia hobetuak

Aipatu bezala, WAAM teknologia ekonomikoki lehiakorra izan dadin, beharrezkoa da ezarpen-tasa ahalik eta altuenak izatea. GMAW prozesu tradizionalarekin ezarpen-tasa handiak lortzeko, beharrezkoa da hariaren elikatze-abiadura altuak izatea eta beraz, bero-ekarpena handitzea. Horrek ezegonkortasuna sor dezake prozesuan eta horregatik, ezarpen-tasa gehieneko balio gaindiezin batera mugatuta dago. Azken aldian, ordea, prozesuan aldaketak planteatzen dituzten ikerketak burutzen dira, balio hori maximizatu ahal izateko. Ildo honetan, hiru metodo nagusi garatu dira: bi GMAW elektrodo tandemean kokatuak, GMAW/GTAW hibridoa (GMAW prozesuari GTAW elektrodo bat gehitzea) eta GMAW prozesu tradizionalari beste hari bat (*Hot wire, HW*) gehitzea.

### 4.6.1 Bi GMAW elektrodo tandemean kokatuak

Prozesu honetan bi GMAW elektrodo tandemean kokatzen dira zuzi beraren barruan, elkarrengandik isolatuta eta energia-iturri ezberdinetatik elikatuta, aldi berean arku elektrikoa sortuz eta oinarri-materialari energia emanez. Hala, hari bakarreko GMAW prozesu konbentzionalarekin lortzen den bero-banaketa aldatu egiten da, II-10. irudian ikus daitekeen bezala [Fang, 2012]. Horrelako prozesuetan, bi arku elektriko izan arren, bainu urtu bakarra sortzen da. Bainu urtu hori, GMAW elektrodo bakarrarekin lortutako bainuarekin alderatuta askoz handiagoa da, bero-ekarpen berarekin [Chen, 2015]. Horri esker, tandem prozesua oso prozesu eraginkorra da, ezarpen-tasa altuak, produktibitatean hobekuntzak eta akatsen murrizketa lortzen baititu, lortutako soldadura-kordoien kalitatea handituz [Yao, 2016]. Adibidez, Lee et al.-ek [Lee, 2013] aluminioan, tandem prozesuaren ezarpen-tasa (8,7 kg/h) hari bakarreko prozesuarenarekin alderatu zuten (5,52 kg/h) eta hariaren diametro bererako (1,6 mm), nabarmen handitu zitekeela ondorioztatu zuten. Bestalde, Martina et al.-ek [Martina, 2018] altzairu herdoilgaitzean (17-4 PH), tandem teknologiadun zuzi batekin MIG pultsatu teknika erabiliz, 9,5 kg/h-ko ezarpen-tasak lortu zituzten.

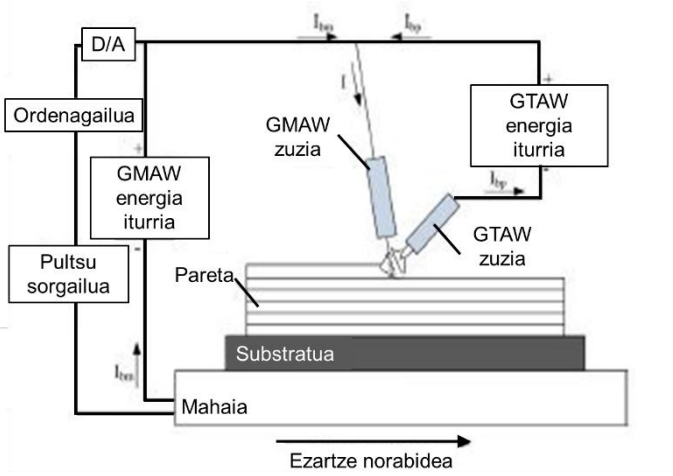



*II-10. irudia. Bi GMAW elektrododun tandem prozesua [Yao, 2016]*

### 4.6.2 GMAW/GTAW prozesu hibridoa

Helburu bererako, ohiko GMAW zuziari beste GTAW elektrodo bat gehitu dakioke, teknologia hibrido bat sortuz. Teknologia honekin ezarpen-tasa handiagoak lortzen dira, GTAW zuziak oinarri-materiala aurreberotu eta bertan bainu urtua sortzen baitu, ondoren bertatik GMAW zuzia pasatzeko eta nahi den material kopurua arku egonkorrago batekin ezartzeko [Sahasrabudhe, 2018-b]. Prozesu mota honetan, materialaren transferentzia modua, produktibitatea eta prozesuaren kalitatea definitzeko bi zuzien arteko elkarrekintzak garrantzitsuak dira [Sahasrabudhe, 2018-a].

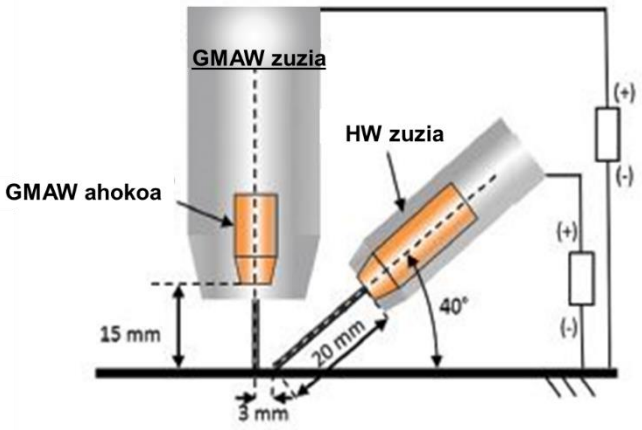
Ideia horren barruan bi teknologia bereizten dira. Lehenengoa, oinarri-materialean sartzen den bero-ekarpena murrizten duen eta intentsitatea konstante mantentzen duen elektrodo-bikoitzaren teknologia da, *bypassean* GTAW zuzi bat sartuz (II-11. irudia). Adibidez, elektrodo bikoitzeko teknologiaren bidez horma finak fabrikatzeko orduan, materialaren erabilera-koefizientea %10 baino gehiago handitzen da eta beraz, materialaren ezarpen-efizientzia eta ezarpen-tasa handitu egiten dira teknika tradizionalekin alderatuta [Yang, 2016]. Bigarrena, aldiz, GMAW/GTAW hibrida izenekoa da, non GTAW zuzi berri bat gehitzen den bere energia-iturriarekin arku elektrikoaren banaketa optimoa lortzeko [Chen, 2017].




*II-11. irudia. GMAW/GTAW prozesu hibridoa, GTAW zuzia bypass-an sartuta ([Yang, 2016] lanetik egokitua)*

### 4.6.3 GMAW-HW prozesua

Azkenik, planteatutako beste irtenbide bat GMAW prozesu tradizionalari hari bero gehigarri bat gehitzea da (GMAW-HW). Hari beroa prozesuan sartu aurretik berotzen da, bertatik korronte elektriko bat sartzeari esker (II-12. irudia). Korronte hori, hari nagusian sartzen dena baino askoz txikiagoa da eta ez da nahikoa oinarri-materialaren eta hari beroaren artean arku elektriko bat sortzeko.




*II-12. irudia. GMAW-HW prozesuaren errepresentazio grafikoa ([Günther, 2018-a] lanetik egokitua)*

Jada aipatu den bezala, GMAW prozesu tradizionalean, ezarpen-tasa (denbora-unitate bakoitzeko elikatzen den material kopurua) handitzean bero-ekarpena handitzen da eta horrek gehiegizko beroa sortzen du fabrikatu beharreko piezan. Horregatik, materialak jasan dezakeen beroa mugagabea ez denez, elikatzen den material kopuruaren balioa ezin da mugarik gabe handitu. Hala, oso baliagarria izango litzateke energiaren eta materialaren ekarpenak bereiztea, bakoitza bere aldetik aldatu ahal izateko.

Hori da, hain zuzen ere, HW hari beroa gehituta lortzen dena. GMAW elektrodo nagusiak sortutako beroaren zati bat HWk sartutako materiala urtzeko erabiltzen da. Horrela, energia berarekin material gehiago urtzen da, ezarpen-tasa handituz eta diluzioa murriztuz. Gainera, GMAW prozesuaren aldaera honen bidez lortutako ezarpen-tasak altuagoak direnez, produktibitatea handitu egiten da.

Gaur egun arte, prozesu hori estaldurak fabrikatzeko baino ez da erabili. Adibidez, Günther et al.-ek [Günther, 2018-a] gainazalak gogortzeko nikelean oinarritutako estaldura bat ezarri zuten, GMAW-HW teknologia erabiliz. Teknologia honen bidez, beroa atera zuten bainu urtutik, diluzioa %5 gutxituz eta 12 kg/h-ko ezarpen-tasa handiagoak lortuz. Aldiz, Günther et al.-ek [Günther, 2018-b] beste ikerketa batean, FeCrCn oinarritutako beste gainazalak gogortzeko estaldura bat ezarri zuten, 9 kg/h-ko ezarpen-tasak eta %10eko diluzioak lortuz. GMAW prozesu tradizionalarekin, berriz, estaldura bera egiteko lortutako ezarpen-tasak 4,5 kg/h-koak ziren, %50eko diluzioekin. Gainera, hariaren elikatze-abiadura bererako, ohiko GMAW prozesuarekin alderatuta, beharrezko potentzia %30 murrizten da HWa erabiltzean. Izan ere, hari nagusiaren arku elektrikoak eta bainu urtuak hari beroa aurrez berotzen dute eta hori nahikoa da bainu urtuarekin kontaktuan sartzean urtzeko.

## 5 Altzairuak eta aluminio-aleazioak

WAAM prozesuak pieza metalikoak soldagarritzat jotzen diren materialetan fabrikatzea ahalbidetzen du. Normalean, kostu txikia, kalitate handia eta propietate ziurtatuak dituzten metalezko hariak erabiltzen dira ezarpen prozesuetarako. Erabilitako harien diametroa normalean 0,8 mm-tik 4 mm-ra doa [Sames, 2016]. Beraz, WAAM teknologiak erabiltzen dituen hariak material anitzetan daude eskuragarri eta hala, hainbat materialetan fabrikatu daitezke piezak: altzairuetan [Jin, 2020], aluminio-aleazioetan [Derekar, 2018], nikel-aleazioetan [Artaza, 2020-a], titanio-aleazioetan [Artaza, 2020-b], kobre-aleazioetan [Qi, 2018], etab.

Oraindik, hainbat materialetan, WAAM prozesuaren bidez lortutako mikroegitura eta propietate mekanikoak ikertzen ari dira. Prozesuan zehar, materialak berotze- eta hozte-ziklo termikoak jasaten ditu eta ziklo horiek mikroegitura espezifikoak sor ditzakete. Mikroegitura horiek materialak izango dituen propietate mekanikoak zehaztuko dituzte eta beraz, horien kontrolak berebiziko garrantzia izango du [Li, 2019].

## 5.1 Altzairuak

Altzairuak burdinazko aleazioak dira, ingeniaritzako material gisa asko erabiltzen direnak. Konposizioaren arabera, altzairu mota desberdinak lor daitezke beren propietateekin. Oro har, trakzioarekiko erresistentzia handia, fabrikazio erraza eta kostu txikia duten materialak dira. Altzairuak, WAAM fabrikazio-teknologiekin konbinatuta, pieza handiak fabrikatzeko erabil daitezke kostu global txikiarekin, adibidez, ontzigintzaren sektorean [Queguineur, 2018], gas & oil sektorean [Hejripour, 2019], energia eolikoaren sektorean [Dirisu, 2019], eraikuntzan eta automobil industrian [Rodrigues, 2019-b]. Hainbat ikerketetan, WAAM teknologiaren bidez hainbat altzairu ezberdinetan fabrikatu dira piezak: altzairu gozoetan [Dirisu, 2019], altzairu herdoilgaitzetan [Caballero, 2019] eta erreminta-altzairuetan [Xu, 2019]. Doktore-tesi honetan, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez, altzairu gozoetan piezen fabrikazioa aztertuko da.

Aipatu bezala, WAAM teknologian ezarpena geruzaz geruza egiten da eta horrek ziklo termiko jarraitu eta aldakorrak sortzen ditu. Ondorioz, altzairu gozoetan, karbono-eduki txikia dutenez eta aleazio-elementuen proportzioaren arabera, mikroegituran heterogeneotasunak sortzen dira eta propietate mekanikoetan dispertsioak. Berotze-malda, gailur-tenperatura eta hozte-ratio ezberdinak dituzten ziklo termiko errepikakorrek mikroegitura konposatua sortzen dute. Mikroegitura hori likidotik solidorako eta solidotik likidorako transformazioen emaitza da, bai eta beroan gertatzen diren egoera solidoko transformazioena (ferritatik austenitara edo austenitatik ferritara) eta hoztearena (austenitatik ale-mugako ferritara, Widmanstätten ferritara, ferrita azikularrera, bainitara edo martensitara) ere. Horrela, hozte-prozesu motaren arabera, mikroegitura ezberdinak aurki daitezke, hala nola, ferrita azikularra, bainita, perlita, etab. Adibidez, Mn eta Ni aleazio-elementuek tenplagarritasuna handitzen dute ferrita azikularra sortzen laguntzen dutelako; Mo eta Cr elementuek, berriz, bainitaren eraketa handitzen dute [Dirisu, 2019].

Choi eta Hillek C-Mn altzairuzko (altzairu gozozko) soldadura-kordoien hozte prozesuko fase nagusien transformazio-tenperaturak azaldu zituzten [Choi, 1978]:

1. Hoztea moderatua denean, lehen mailako ferrita 800 ºC eta 650 ºC artean nukleatua, austenitaren ale-mugetan sortzen da.
2. Ferritazko albo-plakak (askotan, Widmanstätten ferrita deitua) 750 ºC eta 650 ºC artean eratzen dira austenitaren ale-mugetan, hozte-abiadurak handitzen direnean.
3. Ale fineko ferrita azikularra gutxi gorabehera 650 ºC-tik behera eratzen da austenita aleen barruan.

4. Dislokazioz osatutako subegitura bat duen listoiz osatutako egitura bat eratzen da 500 ºC-tik behera. Egitura hori bainitikoa da hozte-abiadurak azkarrak direnean (> 50 ºC/s).
5. Aleazio handiko altzairuetan, 400 ºC-tik behera hozte azkarretan, mikroegitura martensitikoa sortzen da.

Hala, berriz ere, materiala Ac1 tenperaturatik (tenperatura eutektoidetik) gora berotzen bada, transformazio produktu horiek austenita bihurtzen dira berriro. Eraldaketa zikliko horiek eremu hauskorragoz eta ez hain hauskorrez osatutako mikroegitura bat osatzen dute, erresistentzia mekanikoaren eta inpaktu-erresistentziaren balioetan dispertsioa sortuz [Shassere, 2019].

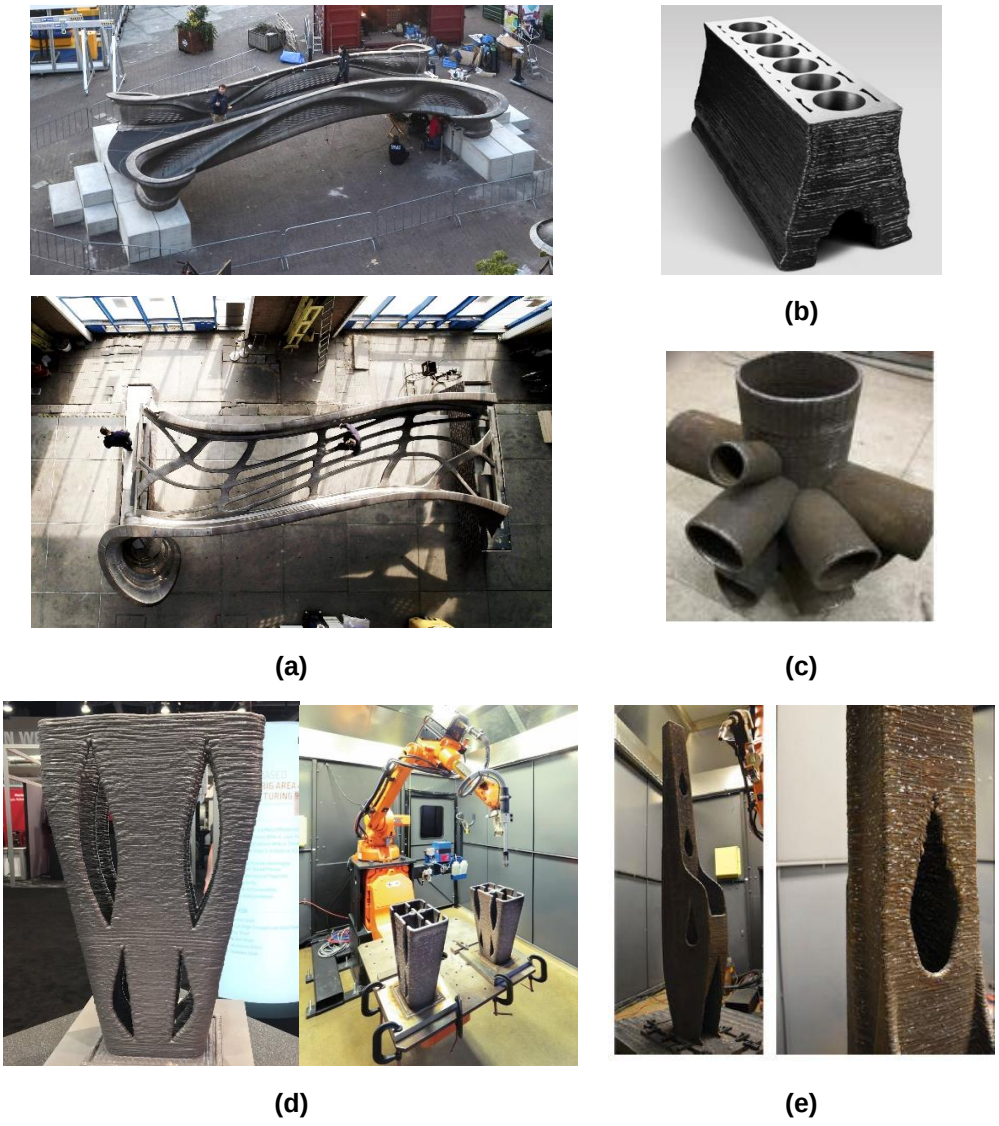
Lortutako propietate mekanikoei dagokienez, altzairu gozoak oso eskakizun handiak ez dituzten aplikazio orokorretarako erabiltzen dira. Dirisu et al.-ek [Dirisu, 2019] oszilazio-estrategiarekin eta kordoi bakarreko estrategiarekin, WAAM bidez, fabrikatutako osagaien hausturarekiko erresistentzia eta erresistentzia mekanikoa alderatu zituzten altzairu gozoetan. Aldiz, Shassere et al.-ek [Shassere, 2019] WAAM teknologiaren bidez bi horma fabrikatu zituzten 572 x 470 mm eta 305 x 362 mm-ko neurrikoak, trakzio-saiakuntzaren eta erresilientzia saiakuntzaren bidez ER70S-6 altzairua karakterizatzeko. Azkenik, Haden et al.-ek [Haden, 2017] ER70S-6 altzairu gozoz eta 304 altzairu herdoilgaitzez, WAAM bidez, egindako horma meheak entseiatu zituzten. II-3. taulan egile bakoitzak lortutako propietate mekanikoak laburbiltzen dira:

*II-4. taula. ER70S-6 altzairu gozoan, autore ezberdinek ezarpen-estrategia ezberdinen bidez, WAAM teknologiarekin, fabrikatutako piezen propietate mekanikoen alderaketa*

| Estrategia | Limite elastikoa (MPa) | Haustura-tentsioa (MPa) | Elongazioa (%) | Egilea |
|---|---|---|---|---|
| Bi kordoi gainezarri | 360 ± 7 | 475 ± 4 | 34-42 | [Shassere, 2019] |
| Kordoi bakarra | 370 | 480 | 35,5 | [Dirisu, 2019] |
| Oszilazioa | 420 | 510 | 33 | |
| Kordoi bakarra | 350 | 460 | - | [Haden, 2017] |

Azken urteotan, altzairu gozoetan materiala karakterizatzeari eta piezak WAAM teknologiaren bidez fabrikatzeari buruzko hainbat lan burutu dira. Adibidez, Venturini et al.-ek [Venturini, 2016] ER70S-6 altzairuzko T formako gurutzeen fabrikazioa aztertu zuten. Bestalde, Somashekara eta Suryakumarrek [Somashekara, 2017] GMAW tandem elektrodo bikoitzeko teknologiaren bidez material anitzeko soldadura-kordoiak ezarri zituzten. Bi elektrodoak, 1,2 mm-ko diametrokoak, ER70S-6 eta ER110S-G altzairu gozozko hariekin elikatu ziren, funtzionalki hobetutako piezak fabrikatu ahal izateko. Gainera, II-13. irudian ikus

daitekeen bezala, WAAM ekipamenduen fabrikatzaile nagusiek eta teknologiaren garatzaileek altzairuetan hainbat pieza esanguratsu fabrikatu dituzte hainbat aplikaziotarako.




*II-13. irudia. (a) MX3D enpresak altzairu herdoilgaitzean fabrikatutako zubia [MX3D, 2021], (b) Barne kanalekin altzairuan fabrikatutako pieza [Lincoln Electric Additive, 2021], (c) Norabide anitzeko 10 tutu elkartzen dituen konektorea YHJ507M harian fabrikatua [Yili, 2018], (d) Altzairuan barne kanalekin fabrikatutako pieza [Lincoln Electric Additive, 2021], (e) Altzairuan fabrikatutako hondeatzaile baten besoa osatzen duen pieza [Greer, 2019]*

## 5.2 Aluminio-aleazioak

Aluminioak gaitasun berezia du aleazioak sortzeko hainbat elementurekin (metalikoak zein ez-metalikoak), erresistentzia espezifiko handiko eta korrosioarekiko erresistentzia handiko material arinak sortuz. Aluminio-aleazioak, ziurrenik, pieza handiak fabrikatzeko aukera interesgarrienetako bat eta ekonomikoki lehiakorrenetako bat dira. Industria-aplikazio nagusiak hainbat

sektoretan ikus daitezke, hala nola, automobilgintzan [Klein, 2020], ontzigintza-sektorean [Taşdemir, 2020] eta sektore aeroespazialean [Starke, 2010]. Hala ere, aluminio-aleazioen soldadura problematikoa izan daiteke, erabilitako aleazioaren konposizioaren arabera, porositatea, gainazalean oxido-filmak eta solidotze-prozesuan pitzadurak agertu baitaitezke [Derekar, 2018]. Al-Cu (2xxx) [Fang, 2021], Al-Si (4xxx) [Ma, 2019] eta Al-Mg (5xxx) [Horgar, 2018] aluminiozko serieak egokiak dira WAAM teknologiaren bidez fabrikatzeko. Bestalde, 7xxx eta 6xxx serieak ez dira hain egokiak, akats metalurgikoak sortzen baitira bainu urtu zurrunbilotsuen ondorioz [Wu, 2018-b].

Merkatuan eskuragarri dauden WAAM teknologien artean, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua etorkizun handikoa da akatsik gabeko aluminiozko pieza handiak lortzeko [Williams, 2016-b]. Zehazki, aluminio-aleazioen soldadura-ahalmen mugatuak, aluminioentzako funtzionamendu-modu espezifikoak dituzten GMAW soldadura-iturrien beharra sortzen du. Bestalde, gainontzeko soldadura-teknologiek, esaterako, PAWk eta GTAWk, arazoak izaten dituzte. Zehazki, GMAW teknologiaren barruan AC pultsatua funtzionamendu-modua bereziki egokia da horrelako soldaduretarako.

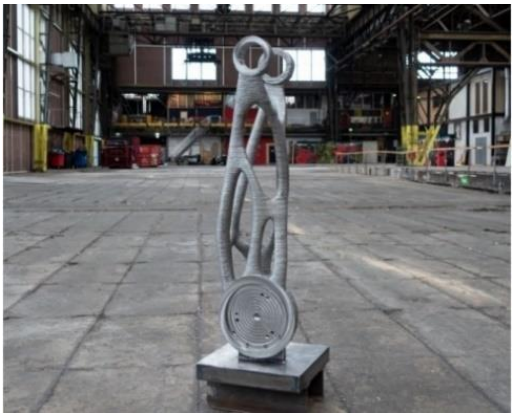
Ondorioz, porositatea da WAAM bidez aluminio-aleazioetan piezak fabrikatzeko erronka nagusia. Porositate horren jatorria, hidrogenoak egoera solidoan eta likidoan duen disolbagarritasun ezberdinetan dago. Ezarpen-prozesuan zehar solidotutako aluminioaren barruan hidrogeno askearen kantitateak maila jakin batzuk gainditzen dituenean porositatea agertzen da eta piezen propietate mekanikoei eragin diezaieke [Gu, 2019]. Ikerketa batzuetan, porositate mailak murrizteko, alea fintzeko eta propietate mekanikoak hobetzeko gailu gehigarriak behar dituzten teknika mekanikoak, hala nola, geruzen arteko ijezketa [Gu, 2018] [Gu, 2020] eta geruzen arteko mailukadak [Fang, 2021] erabili izan dira. Beste ikerketa batzuetan, aldiz, helburu bererako tratamendu termikoak erabili dira [Gu, 2016].

WAAM bidez ezarritako eta doktore-tesi honetan erabilitako 5356 aluminio-aleazioaren propietate mekanikoei dagokienez, Li et al.-ek [S. Li, 2020] aleazio horren mikroegitura eta propietate mekanikoak alderatu zituzten bi babes-gas mota erabilita: argona eta purutasun handiko nitrogenoa. II-4. taulan ikus daitezke, azterketa horretan, kordoi bakarreko hormetan lortutako propietate mekanikoak.

*II-5. taula. Babes-gas gisa purutasun altuko nitrogenoa eta argona erabilita WAAM teknologia bidez fabrikatutako 5356 aluminio-aleazioaren propietate mekanikoak.*

| Babes-gasa | Limite elastikoa (MPa) | Haustura-tentsioa (MPa) | Elongazioa (%) |
|---|---|---|---|
| Ar | 130 ± 3 | 275 ± 2 | 28 ± 5 |
| $N_2$ | 150 ± 2 | 200 ± 4 | 4 ± 1 |

Egin diren azken ikerketetan nabarmen aurreratu da aluminiozko piezak fabrikatzeko WAAM teknologiaren erabileran. Adibidez, MX3D enpresak [MX3D, 2021] topologikoki optimizatutako beso robotiko baten pieza bat fabrikatu zuen (II-14. irudian), erabilitako material kopurua nabarmen murriztuz. Ramlab enpresak [RAMLAB, 2021], bestalde, itsasontzi baten helizea fabrikatu zuen nikel-aluminio-brontzezko aleazio batean Damen Shipyard [Damen, 2021] taldeak errektifikatua eta dagoeneko martxan dagoena. Helize hori eta beste zenbait aplikazio adibide II-14. irudian ikus daitezke.



**(a)**



**(b)**



**(c)**



**(d)**



**(e)**

*II-14. irudia. (a) Aluminioan fabrikatutako eta topologikoki optimiazatutako beso robotiko baten pieza [MX3D, 2021], (b) Aluminioan ezarpen-estrategien optimizazioarako RASM systems enpresak fabrikatutako pieza [Ma, 2019], (c) 10 m luze den WAAM bidez fabrikatutako aluminiozko pieza [WAAMMAT, 2021], (d) 2,5 m luze den aluminiozko nerbioa WAAM bidez fabrikatua 500kg-tik gorako materialaren aurrezkiak lortuaz [Martina, 2015-a], (e) Nikel-aluminio-brontze aleazioan WAAM bidez fabrikatutako itsasontziko helizea [RAMLAB, 2021]*

# 6 WAAM teknologiadun makina komertzialak

GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua duten makinei dagokienez, nagusiki bi motatako soluzioak daude: makina-erremintan oinarritutako sistemak eta sistema robotikoak [Urhal, 2019]. Hain zuzen ere, WAAM sistema gehienek robot industrial antropomorfiko bat erabiltzen dute mugimendu mekanismo bezala eta ohikoena gas babeslea prozesuan sartzeko babes-sistema lokal bat erabiltzea da [Wu, 2018-b]. Merkatuan badira soluzio komertzial batzuk, kontrol- eta monitorizazio-sistema integratuak eta CAD/CAM software espezifikoak dituztenak. Hala ere, ia edozein manipulatzaile eta soldadura-iturri bat konbinatu daitezke WAAM sistema sinple bat sortzeko. Horregatik, WAAM prozesurako behar den ekipamendua merkea dela esaten da, elektroi sortak edo prezio altuko laserrak erabiltzen dituzten sistemekin alderatuta. Gainera, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuak ez du kamera inerterik behar material arruntekin (altzairua, aluminioa, etab.) lan egiteko, ekipamenduaren prezioa are gehiago murriztuz. Teknologia horrekin piezak fabrikatzeko, hiru makina mota bereiz daitezke: 3 ardatzeko makinak, 5 ardatzeko makinak edo robot antropomorfikoak. Jarraian, unibertsitateetan, ikerketa-zentroetan eta enpresetan garatzen ari diren makinen edo roboten garapenak aurkezten dira:

## 6.1 ADDILAN

ADDILAN enpresak [ADDILAN, 2021] 3+2-ardatzeko makina bat merkaturatzen du (II-15. irudia) mahai kulunkari batekin. Makina horrek GMAW teknologian, PAW teknologian eta GTAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuak biltzen ditu Makina hori gauza ezberdin askotarako erabili daiteke bere arkitektura bereziagatik eta CNC software irekiagatik. Makina honek, piezak material erreaktiboetan, titanioa kasu, fabrikatzea ahalbidetzen duen kamera inerte eta itxi bat ere badu. Piezak fabrikatzeko eraikuntza ingurunea 1300 x 900 x 500 mm-koa da eta gehieneko pisua 300 kg-koa.




*II-15. irudia. ADDILAN v.0.1 makina [ADDILAN, 2021]*

## 6.2 GEFERTEC

GEFERTEC enpresa alemaniarrak [GEFERTEC, 2021], 3DMP® (WAAM teknologia) fabrikazio-teknologia txertatuz, bere GTarc AM machine (II-16. irudia) makina seriea aurkeztu zuen. Serie horren barruan, 3 ardatzeko makinek gehienez 3 $m^3$-ko piezak eta 3.000 kg-koak egin ditzakete eta 5 ardatzeko makinek, berriz, 0,8 $m^3$-tik gorako piezak egin ditzakete gehienez 500 kg-ko pisuarekin.



*II-16. irudia. WAAM GTArc603 makina [GEFERTEC, 2021]*

### 6.3 AML3D

AML3D konpainiak [AML3D, 2021] ARCEMY izeneko GMAW prozesuan oinarritutako bere WAAM makina merkaturatu du (II-17. irudia). Makina honek osagai metalikoak fabrikatzeko berariaz diseinatutako errailetan muntatzen diren robot bat edo bi integratzen ditu. Gainera, haria eta gas babeslea biltegiratzeko sistemak ere baditu. Azkenik, fabrikazio-espazioa luzatu daiteke bezeroaren beharren arabera.




*II-17. irudia. ARCEMY makina GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez piezak fabrikatzeko [AML3D, 2021]*

### 6.4 RAMLAB

RAMLAB Herbehereetako enpresa taldeak [RAMLAB, 2021] 6 ardatzeko robot batean eta bi beso mugikorretan oinarritutako WAAM sistema bat garatu du 2 x 2 x 2 m arteko piezak fabrikatzeko (II-18. irudia). Metalezko inprimagailu handian, bi besoek pieza manipulatzen dute, robot antropomorfikoak WAAM teknologia bidez materiala ezartzen duen bitartean. Konfigurazio eta eragiketa modu hori bakarra da munduan. Gainera, enpresa horrek MaxQ monitorizazio- eta kontrol-sistema ere merkaturatzen du.




*II-18. irudia. RAMLAB makina Damen Shipyard taldearentzat itsasontzi baten helizearen fabrikazio-prozesuan [RAMLAB, 2021]*

### 6.5 Lincoln Electric

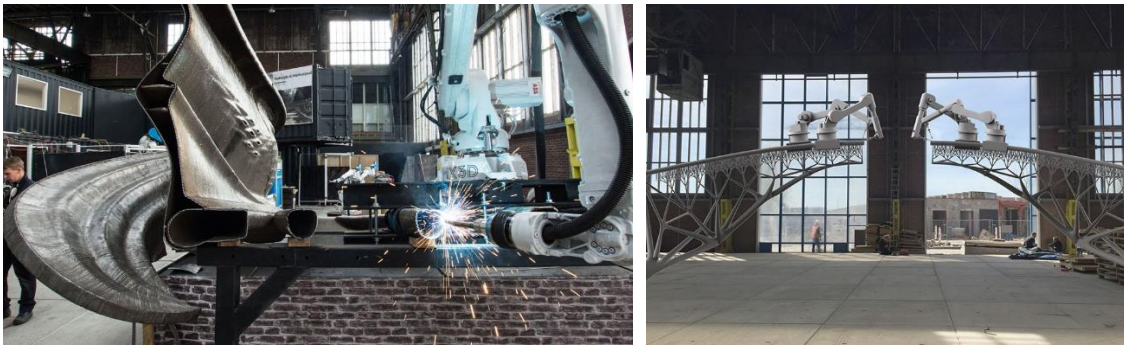
Lincoln Electric [Lincoln Electric Additive, 2021] konpainia, Wolf Robotics eta Lincoln Electric Additive Solutions enpresen bidez, WAAM teknologiaz ekipatutako robot antropomorfikoetan oinarritutako soluzio industrialak merkaturatzen ari da (II-19. irudia). Zehazki, robot antropomorfiko bat eta mahai mugikor bat dituen sistema bat garatu dute.




*II-19. irudia. Lincoln Electric enpresaren sistema robot antropomorfiko batean oinarritua* [*Lincoln Electric Additive, 2021]*

### 6.6 MX3D

MX3D enpresak [MX3D, 2021] hainbat urte daramatza ingeniaritzaren eta eraikuntzaren sektoreko enpresa garrantzitsuekin lankidetzan, WAAM teknologiadun soluzio robotikoak garatzeko (II-20. irudia). Horrez gain, Metal XL softwarea merkaturatzen du eta WAAM bidez piezak fabrikatzen ditu enkarguz.



*II-20. irudia. Eraikuntzaren sektorean MX3D enpresaren aplikazioen adibideak [MX3D, 2021]*

### 6.7 Cranfield unibertsitatea

Cranfieldeko Unibertsitatea WAAM teknologian munduko erreferente nagusienetakoa da. WAAMMat programaren barnean [WAAMMAT, 2021], WAAM teknologiari buruzko ikerketa eta garapen proiektu ugari egin dituzte,

hainbat materialetan lan eginez (aluminioa, altzairuak, titanioa, Inconel-a, etab.), ikuskapen, monitorizazio eta postprozesu aurreratuetan bidea irekiz. Makinen ikuspegitik, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan zentratutako proiektu gehienak robot antropomorfikoekin burutu dituzte, II-21. irudian ikusten den bezala. Irudian agertzen den proiektuan, konkretuki, zelula robotiko bat garatu zuten bi errailen gainean muntatutako bi robot sinkronizaturekin, tamaina handiko pieza metalikoak fabrikatzeko.



*II-21. irudia. WAAM zelula robotikoa, GMAW prozesuan oinarritua, paraleloan lan egiten duten 2 robotekin produktibitatea handitzeko [WAAMMAT, 2021]*

## 7 WAAM prozesuaren monitorizazioa eta kontrola

DED teknologietan egindako azken ikerketetan, teknologia hauetarako erabilitako makina eta sistemetan prozesua monitorizatzeko eta kontrolatzeko sistemak txertatu dira eta materialaren ezarpen-prozesuan zehar kontrola ahalbidetuko duten kontrol-algoritmoak garatu dira. Hau da, ezarpen fidagarri eta eraginkor bat lortzeko, prozesuaren barruan begizta itxiko kontrol-sistemak sartu dira, erregistratutako datuen arabera parametro nagusien gainean jardun eta automatikoki egokitzeko.

Hori funtsezkoa da piezen kalitatea ziurtatzeko eta akatsak saihesteko. GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez fabrikatutako piezetan aurkitzen diren akats nagusiak honakoak dira: poroak (batez ere aluminioan), urtu gabeko eremuak, deformazioak (hondar-tentsioak limite elastikoaren eta haustura-tentsioaren artean daudenean gertatzen dira), arrakalak (hondar-tentsioak haustura-tentsioaren gainetik daudenean gertatzen dira) [Horgar, 2018], delaminazioa [Vimal, 2020], zipriztinak eta WAAM prozesuari inerenteak diren eta materialak nekearen aurrean izango dituen propietateak zehazten dituzten berotze- eta hozte-ziklo errepikakorrek eragindako hondar-tentsioak.

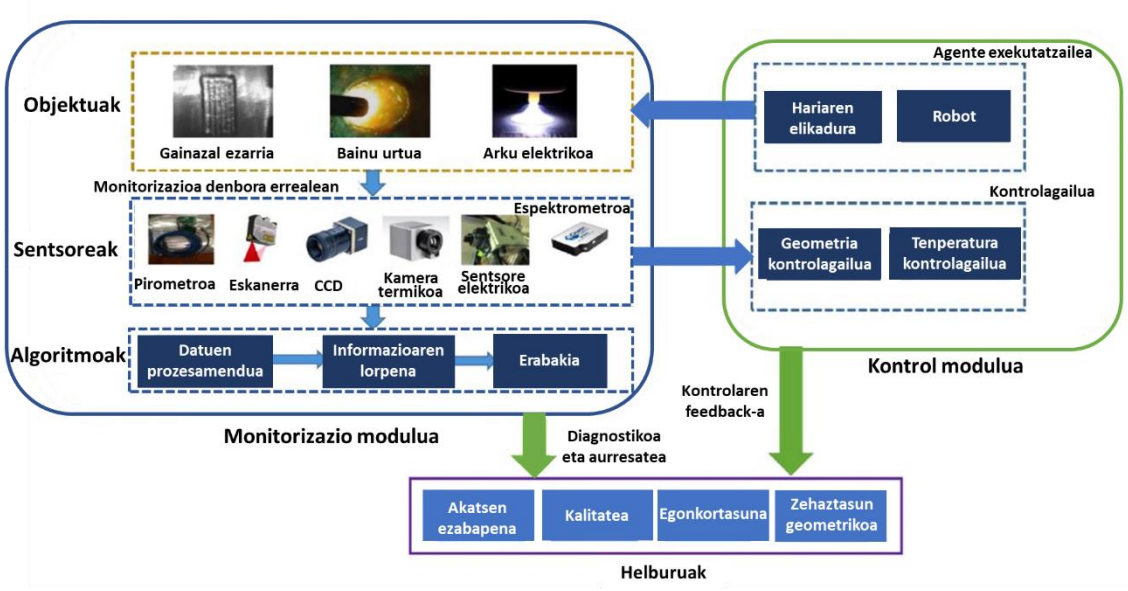
Hondar-tentsio hauek piezan distortsioa sor dezakete eta tolerantziak ere murriztu ditzakete [Rodrigues, 2019-b],

Prozesu-parametro egokiak aukeratuta eta prozesua une oro monitorizatuta eta kontrolatuta, errore horiek murriztu daitezke. Gainera, hondar-tentsioa kontrolatzeko, ondorengo tratamendu termikoak [Bermingham, 2018], ezarpen-estrategien egokitzapena [Mughal, 2005], in situ berotzeko/hozteko mekanismoak [Lu, 2018] [Denlinger, 2015] eta hotzean deformatzeko teknikak [McAndrew, 2018] ere erabili dira hainbat ikerketatan.

Horregatik guztiagatik, funtsezkoa da monitorizazio- eta ikuskapen-sistemak izatea WAAM prozesua kontrolatzeko [Everton, 2016]. Hala, WAAM prozesua oso sentikorra da prozesu-parametroen aldaketekiko. Beraz, parametroak monitorizatzea eta begizta itxian kontrolatzea funtsezkoa da piezak fabrikatzen diren bitartean prozesua zuzentzeko. Horrela, piezaren hondar-tentsioak eta akatsak murriztu daitezke.

Gaur egun, oraindik ere, WAAM prozesuaren monitorizazio- eta kontrol-sistemak garapen faseetan daude, eta horiei buruzko ikerketak kasu sinpleenetarako burutzen dira, hala nola, kordoi bakarreko hormen fabrikaziorako. Gainera, kasu gehienetan, konponbide hauek soldadura prozesuen monitorizazioan oinarritzen dira. Horregatik, merkatuan une honetan ez dago prozesuaren barne-seinaleak eta instalatutako kanpoko sentsoreek jasotako seinaleak eskuratu eta horien arabera erabakiak hartzen dituen algoritmo bat biltzen duen monitorizazio- eta kontrol-sistema integral askorik. Algoritmo horiek WAAM prozesurako berariaz sortutako software batean sar daitezke. Software horrek hasierako diseinutik prozesuaren monitorizazio eta kontrolerako etapa guztiak kontuan hartuko lituzke eta horrek prozesua erabat automatizatzea ahalbidetuko luke. Gainera, automatizazio hori funtsezkoa izango litzateke WAAM prozesua Industria 4.0 kontzeptuaren barnean sartzeko. Gaur egun, ordea, merkatuan ez dago helburu hauek lortzeko heldutasun nahikorik duen software soluziorik.

II-22. irudian modu eskematikoan laburbiltzen da orain arte egile ezberdinek aztertu dituzten WAAM prozesuaren kontrol- eta monitorizazio-sistemak.




*II-22. irudia. WAAM prozesurako monitorizazio- eta kontrol-sistemak ([Xia, 2020] lanetik egokitua)*

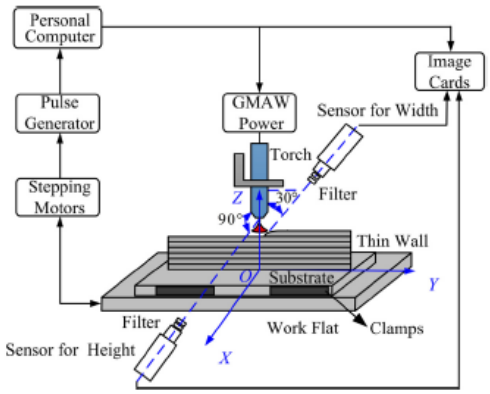
WAAM prozesua monitorizatzeko, alde batetik, ohiko soldadura-prozesuetan bezala, barne-seinaleak eskuratzen dira: intentsitatea, tentsioa, hariaren elikatze-abiadura, sistema mugikorraren aitzinamendu-abiadura, etab. [Artaza, 2017]. Adibidez, Wang et al.-ek [Wang, 2017] soldadura-prozesuetarako, prozesuan zehar monitorizatutako tentsio elektrikoaren seinalearen arabera arkuaren luzera doitzeko egokitzapen-kontrol bat sortu zuten, prozesuaren egonkortasuna areagotuz eta zipriztinak murriztuz.

Bestalde, prozesua kontrolatzeko seinale termikoak, akustikoak, espektralak, elektrikoak eta espektro ikusgarriko irudiak ere monitorizatu daitezke [Xia, 2020]. Oro har, ohikoena eta eraginkorrena espektro ikusgarriko irudiak eta seinale termikoak jasotzea da. Hainbat azterlanetan, seinale- eta irudi-mota horiek eskuratzeko, hainbat kanpo-sentsore jarri dira.

**-Espektro ikusgarriko irudien jasotzea:**

Irudiak jasotzea monitorizazio-metodorik zuzenena da eta horien bidez ezarritako materialaren gainazalaren morfologia monitorizatu daiteke. Zentzu honetan, esan beharra dago, ezarritako materialaren forma geometrikoa prozesuaren kontrolerako berebiziko garrantzia duen aspektu bat dela. Horretarako, bi sistema ezberdin daude: prozesuan zeharreko kontrola (*online*) eta prozesutik kanpoko kontrola (*offline*). Prozesuan zeharreko kontrolari (*online*) dagokionez, iragazkidun CCD kamerak erabiltzen dira, prozesuaren argi biziak sortzen duen soldadura eremuaren argitasunaren muturreko aldakuntza gainditzeko. He et al.-ek [He, 2016] CCD kamerei esker, juntura baten betetze prozesuan soldadura bidez ezarritako kordoien forma geometrikoa monitorizatu zuten. Horretarako,

CCD kamera bat ezarri zuten juntaren zeharkako sekzio harrapatzen zuela eta hala, prozesuan zehar ezarritako materialaren geometria determinatu ahal izan zen. WAAM prozesuan teknologia bera sartuz, Xiong et al.-ek [Xiong, 2013] [Xiong, 2016] prozesuan zehar ezarritako kordoi bakoitzaren zabalera eta altuera zehazteko iragazki egokiak dituzten bi CCD kamera erabiliz neurtu zituzten eta jasotako datuen arabera TS egokitu zuten, II-23. irudian ikus daitekeen bezala.




*II-23. irudia. WAAM prozesurako CCD kameretan oinarritutako kontrol-sistema baten diagrama eskematikoa [Xiong, 2016]*

Bestalde, prozesutik kanpoko kontrolari (*offline*) dagokionean, geruza bakoitza ezarri ondoren eskaner laser baten bidez eskaneatuz gero, ezarritako soldadura-kordoiei buruzko hiru dimentsiotako informazioa lor daiteke puntu-hodei moduan. Puntu-hodei horren bidez, momentura arte ezarritako materiala irudikatzen duen hiru dimentsioko irudi bat sor daiteke. Hala, irudi horren bidez ezarpen-estrategia zuzendu daiteke. Ma et al.-ek [Ma, 2019] eskaner laser bat erabili zuten fabrikatzen ari ziren piezaren altuera nahi zena zen eta mekanizazio-etapara igaro zitekeen zehazteko. Azkenik, Hausser et al.-ek [Hauser, 2020] maiztasun handiko kamerak erabili zituzten zuziaren inklinazioek GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan dituzten efektuak zehazteko. Horretarako, digitalki kalkulatu zituzten izendatutako kamerarekin lortutako bideoetatik bai geruzaren altuera eta bai bainu urtuaren dimentsioak. Datu horien arabera, zuzi-inklinazio jakin batekin ezarritako horma egokia izango den ala ez determina daiteke.

**- Seinale termikoak jasotzea:**

WAAM bidez fabrikatutako piezen historia termikoak, eragina izan dezake lortutako propietate mekanikoetan eta fabrikatutako piezen zehaztasun geometrikoan. Hala, ziklo termiko horiek aurresateko eta aurrez ezagutzeko konplexuak dira. Horregatik, seinale termikoak prozesuan zehar (*online*) jasotzea

oso garrantzitsua da prozesua kontrolatzeko. Jasotze horri dagokionez, orain arte egindako ikerketetan bi ildo nagusi jorratu dira.

Alde batetik, utzitako piezaren tenperatura neurtu da, tenperatura-eremua zehazteko. Aurreko ikerketetan, adibidez, Yang et al.-ek [Yang, 2017] kamera termografiko infragorri bat erabili zuten WAAM bidez egindako hormen tenperatura-eremua neurtzeko eta geruzen arteko hozte-denborak hormen gainazaleko ondulazioan duen eragina zehazteko. Metodo hau hozte-denbora optimoa zehazteko eta kontrolatzeko ere erabil daiteke. Beste ikerketa batean, pirometro baten bidez, prozesuan zehar bainu urtuaren tenperatura monitorizatu zen eta honen bidez geruzen arteko hozte-denborak zehaztu ziren [Artaza, 2017]. Funtzio bererako termopareak ere erabil daitezke.

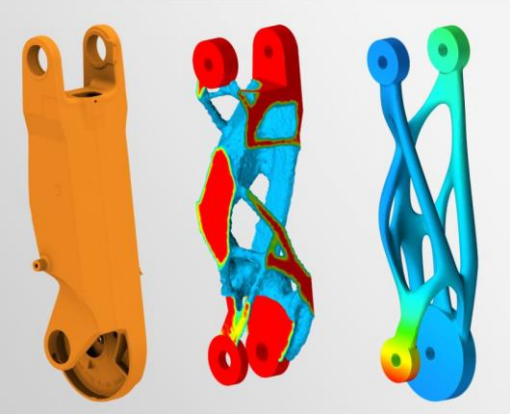
Beste aldetik, bainu urtuaren dinamika monitorizatzen da, egon daitezkeen akatsak detektatzeko eta prozesuaren egonkortasuna neurtzeko. Horretarako, bainu urtuaren neurriak zehazten dira, ondoren kontrolatu ahal izateko. Adibidez, Abe et al.-ek [Abe, 2020] WAAM prozesuan sartutako tentsioa kontrolatu zuten tenperatura erradiazio-termometro baten bidez neurtuz eta bainu urtuaren neurriak simulatuz. Hala, ezarpen-prozesu egonkorragoa lortzen zuten.

# 8 WAAM teknologiarako CAD diseinua eta ezarpen-ibilbideen diseinua

Fabrikazio-gehigarri metalikoa, eta zehazki, WAAM teknologia, diseinu berriak fabrikatzeko gai da, formei, egitura saretuei (*lattice*) eta barne-egiturei dagokienez. Honen adibide dira, Yili et al.-ek [Yili, 2018] fabrikatu zuten 10 hodiko konektorea edo itsasontziko helize bat egiteko Ya eta Hamiltonek [Ya, 2018] proposatu zituzten lau diseinu aukerak. Beraz, WAAM teknologiaren bidez, ia diseinu-askatasun osoa duten geometriak lor daitezke. Horregatik, optimizazio topologikoa bezalako tresnak [Ponche, 2014] fabrikazio-gehigarriko teknologien bidez fabrikatuko diren piezen diseinu berriak egiteko edo diseinu zaharrak birdiseinatzeko erabil daitezke. Optimizazio topologikoan piezen diseinu geometriko optimoa zehazten da, beharrezko eskakizunak betez pisua ahalik eta gehien murriztuz eta beraz, erabilitako lehengai kopurua minimizatuz. Horrela, fabrikazio-sistema konbentzionalek ezartzen dituzten diseinu-mugak ez dira bete behar eta eskakizunak kontuan hartuta bakarrik diseina daitezke piezak.

Zehatzago esanda, optimizazio topologikoaren helburu nagusia osagaien egitura arintzea da, haren funtzionaltasun mekanikoak mantenduz. Horri dagokionez, karga mekanikoak topologikoki optimizatutako diseinuak sortzeko sarrerako datuak dira. Hau da, pieza bat topologikoki optimizatzeko, zirriborro-fasean dagoen 3D eredu bat sortzetik hasten da. Eredu horretan, hainbat karga

aplikatzen dira eta piezei aplikatutako tentsioak kalkulatzen dira. Maila horretan, piezen geometria birmoldatu egiten da, egiturazko ikuspegitik beharrezkoak diren eremuak mantenduz, eta gainerakoak ezabatuz. Horrela, mekanika- eta diseinu-baldintzak betetzen dituen azken geometria lortzen da. Gainera, prozesua amaitzean, baliteke iragarpen-softwareak behar izatea piezaren eskakizun mekanikoak beteko direla ziurtatzeko [Greer, 2019]. Adibidez, II-24. irudian, ondoren, WAAM teknologiaren bidez fabrikatu zen beso robotiko baten optimizazio topologikoa ikus daiteke.



*II-24. irudia. Beso robotiko baten birdiseinua optimizazio topologikoaren bidez [MX3D, 2021]*

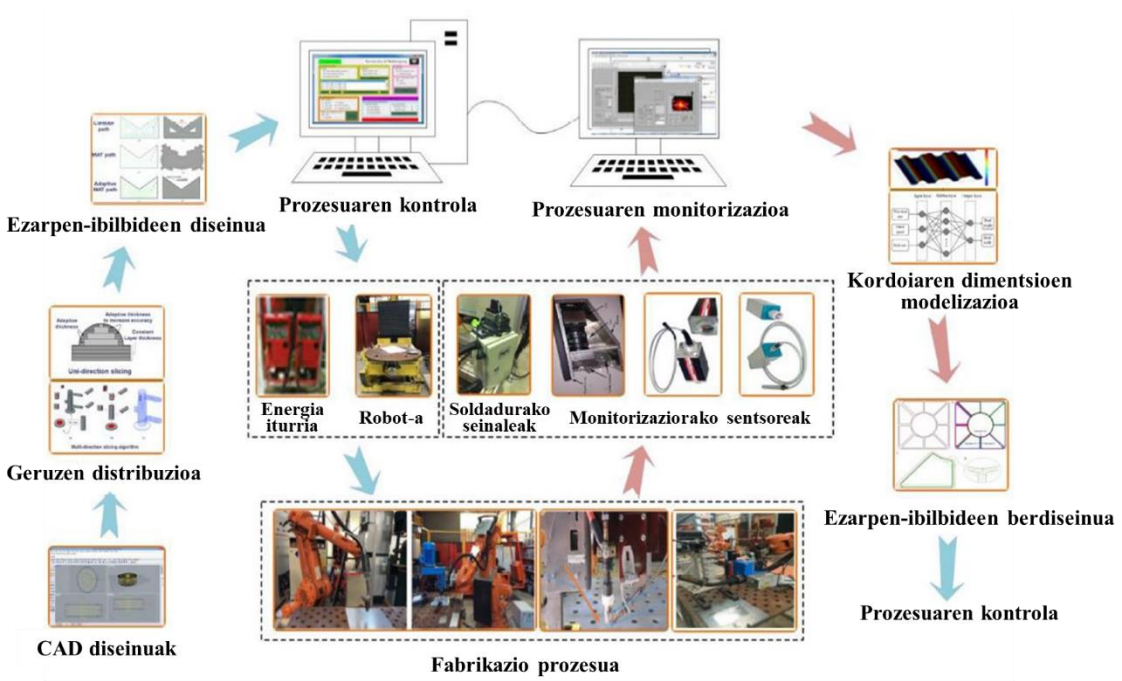
Bestalde, diseinu konbentzional bat WAAM bidez fabrikatzeko, nahiz eta birdiseinu osoa ez egin, piezen diseinuei beti gehitu beharko zaizkie ondoren mekanizatu ahal izateko demasiak.

Teknologia gehigarrien bidez fabrikatzeko diseinua definituta dagoenean, softwareak edo ordenagailuen bidez lagundutako prozesuak planifikatzeko ereduak (*Computer Aided Manufacturing, CAM*) erabiltzen dira ezarpen-sekuentzia eta ibilbideak zehazteko eta beharrezko makina-kodea sortzeko. Siemens NX empresaren softwareak, esaterako, diseinutik inprimaketarainoko edo inprimaketaren ondorengo balidaziorainoko soluzio bat eskaintzen du sistema integratu bakar batean. Horrela, Siemens NX enpresak fabrikazio-gehigarria industrializatzen du, prototipoak fabrikatzeaz gain produktu iraultzaileak fabrikatu ahal izateko teknologia berritzaileak erabiliz [González, 2017]. Bestalde, gaur egun, Autodesk enpresak ere, bere PowerMill softwarean, atal gehigarri bat sortu du, DED teknologietarako ezarpen-ibilbideak eta makina edo robotetara bidaltzeko kodeak sortzeko. Fabrikatutako piezaren geometriaren eta hautatutako ibilbide motaren arabera (raster, sigi-saga, kiribila, ingurukoa, etab.) piezak barne-akatsik gabe fabrikatuko dira, hala nola, betetze-faltarik edo homogeneotasun ezik gabe [Michel, 2019] [Jafari, 2021].

Ezarpen-ibilbide horiek programatzeko, ezinbestekoa da aukeratutako parametro-multzo bakoitzarekin ezarritako kordoien ezaugarri geometrikoak

jakitea. Horregatik, WAAM teknologiarekin fabrikatutako kordoi sinpleen zabalera eta altuera modelizatzeak berebiziko garrantzia du. Adibidez, ezarpen parametro multzo bakoitzarekin lortutako kordoien zabalera funtsezko parametroa da kordoien arteko gainjartze distantzia zehazteko. Halaber, kordoien altuera funtsezkoa da geruzen hazkundea kontrolatzeko. Beraz, egun arteko literaturan soldadura-kordoien geometria iragartzeko ereduak ikerketa-lerro aztertua izan dira [Li, 2020-b] [Dinovitzer, 2019].

II-25. irudian ikusten denez, WAAM prozesua, oro har, fabrikatu beharreko piezaren 3D diseinutik abiatuko litzateke, diseinu hori WAAM teknologiarako birdiseinatuko litzatekeelarik. Ondoren, diseinua geruzatan banatuko litzateke eta geruza bakoitzaren ezarpen-ibilbideak sortuko lirateke CAM software baten bidez, aurresandako soldadura-kordoien dimentsioak aintzat hartuta. Ibilbideak determinatu ondoren, prozesuaren parametroak zehaztuko lirateke eta pieza robot edo Gantry makina batean fabrikatuko litzateke. Fabrikatu bitartean, prozesuaren barne-parametroak eta makinan instalatutako sentsoreenak monitorizatzen dira. Denbora errealean monitorizatutako datuen bidez, prozesua kontrolatuko da eta lortutako kordoien dimentsioak modelizatuko dira, CAM softwarean balio horiek ondo txertatu ez balira ere, ezarpen-ibilbideen birdiseinua burutzeko.




*II-25. irudia. WAAM sistema integralaren kontzeptua ([Wu, 2018-b] lanetik egokitua)*

# *III. KAPITULUA*

# III. KAPITULUA: ALTUERA KONTROLA DARAMAN GMAW TEKNOLOGIAN OINARRITUTAKO WAAM PROZESURAKO SISTEMA ROBOTIKO BATEN GARAPENA

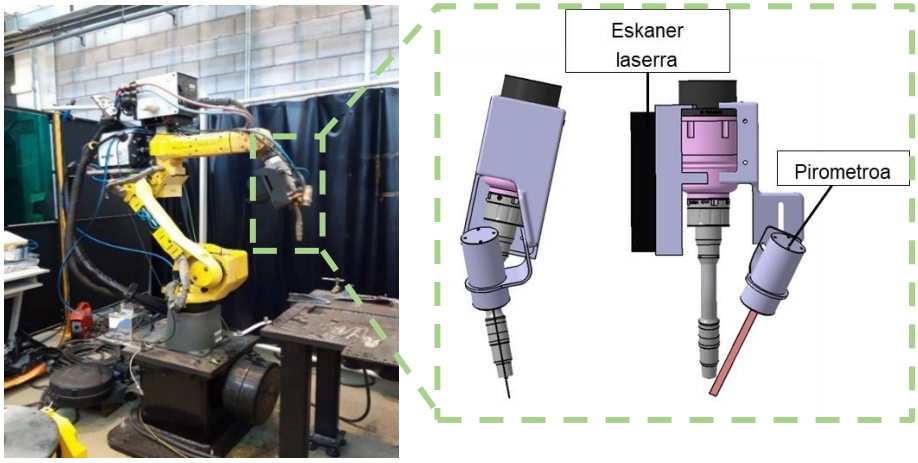
## 1 Sarrera

GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidezko fabrikazio-gehigarrian beharrezkoa da zinematika jakin bat duen makina baten bidez manipulatuko den soldadura-iturri bati konektatutako zuzi bat edukitzea. Makina hori makina-erreminta kartesiar batean oinarritutako sistema bat nahiz sistema robotiko bat izan daiteke. Doktore-tesi honetan, konkretuki, esperimentazio guztia aurrera eramateko sistema robotiko bat garatu da.

Hala, kapitulu honen helburu nagusia sistema robotikoa garatzeko erabilitako prozedura azaltzea izan da. Sistema horrek monitorizazio- eta kontrol-sistemak (altuera kontrola) barne hartzen ditu, izan ere, Artearen Egoeran aztertu den bezala, oso garrantzitsuak dira prozesua modu automatizatu eta kontrolatuan gauzatu ahal izateko. Horretarako, lehenik eta behin, erabilitako ekipamendua zehaztu da, eta prozesua modu egokian exekutatu ahal izateko instalazio robotikoari gehitu zaizkion monitorizazio- eta komunikazio-sistemak deskribatu dira. Bigarrenik, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren parametro nagusiak zehaztu dira, eta Titan XQ 400 AC puls (EWM) soldadura-iturriaren funtzionamendu-moduak aztertu dira. Azkenik, prozesuaren exekuzio kontrolaturako berebiziko garrantzia duen altuera kontrola garatu eta instalatu da.

## 2 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesurako sistema robotikoaren deskribapena

Garatutako sistemaren konfigurazioa mahai finkodun soldadura sistema robotiko batean oinarritzen da, III-1. irudian ikus daitekeen bezala eta tesi honetan egindako esperimentazio guztian zehar erabili da. Sistema honetan, Titan XQ 400 AC puls (EWM, Alemania) GMAW soldadura-iturriak iSTM ABIROB W soldadura-zuzia elikatzen du. Zuzia hau aldi berean Fanuc Arc Mate 100-iC (FANUC, Japonia) beso robotiko antropomorfikoan muntatzen da geruzaz geruza piezak egin ahal izateko. Set-up horrek M drive 4 Rob5 XR RE (EWM, Alemania) haria elikatzeko gailua eta babes-gasaren sistema ere baditu. Babes-gasa, ezarpen-prozesuan zehar, biltegiratze-bonbonetatik zuziraino igarotzen da, bainu urtua babes dezan.




*III-1. irudia. Erabilitako robot antropomorfikoa eta soldadura-zuziaren errepresentazio zehatza (Set-up)*

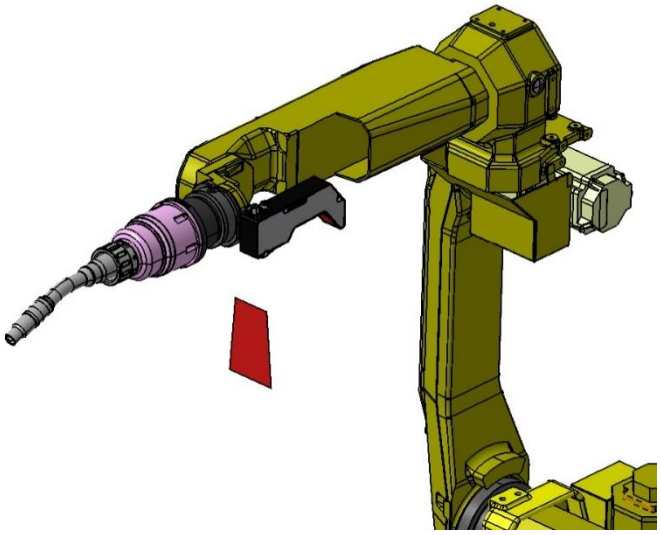
Sistema horretan, hari-bobina robotaren behealdean dagoen euskarri batean jartzen da eta hariari tira egiten zaio haria elikatzeko gailuaren bidez, ondoren abiadura jakin batekin prozesuan sartzeko. Haria elikatzeko gailutik zuzira pasatzeko, sierga deritzon tutu antzeko baten barnetik pasatzen da. Altzairuaren kasuan, altzairuzkoak izaten dira sirga horiek eta aluminioaren kasuan, aldiz, tefloizkoak. Gainera, material bakoitzerako haria elikatzeko gailuaren arrabolak ere desberdinak dira. Aluminio-aleazioetarako “U” motako juntura duten arrabolak erabiltzen dira eta altzairuetarako, berriz, “V” motako juntura duten arrabolak.

GMAW teknologiak zuzia materialaren hazkundearen norantzan orientatzeko aukera ematen badu ere, doktore-tesi honetan egindako esperimentazio guztietan soldadura-zuzia posizio bertikalean kokatu da, hau da, oinarri-materialarekiko perpendikularrean. Hala, etorkizunean aztertu beharreko eta ezarpena edozein norantzatan egitea ahalbidetuko lukeen konfigurazio bat lortu dezakeen aldagaia kendu da prozesutik. Prozesuan babes-gasa behar bezala sartzeko erabilitako toberaren diametroa, aldiz, 20 mm-koa izan da kasu guztietan.

Gainera, prozesua kontrolatzeko, bi tresna osagarri ezarri dira soldadura-zuzian (III-1. irudia). Alde batetik, bainu urtura begira Optris CT (Optris GmbH, Alemania) pirometroa instalatu da, uneoro ezarritako materialaren tenperatura neurtzeko eta kordoien arteko hozte-denborak zehaztu ahal izateko. Hozte-denbora horiek, tarte ez produktiboak dira, geruzen artean beharrezkoak direnak pieza behar bezala hazteko eta gehiegizko beroaren ondorioz pieza ez kolapsatzeko. Horretarako, hozte-denboraren kontrolean, pirometroaren instalazioak langileak hozte-tenperaturaren balioa sartzea ahalbidetzen du eta robotak balio hori markatu arte itxarongo da hurrengo geruza ezarri aurretik. Pirometroak markatzen duen gainazaleko tenperatura langileak adierazitakoa baino txikiagoa

denean, berriz hasiko da ezarpen-prozesua eta hala, ez da beharrezkoa izango hozte-denbora konstante bat ezartzea, horren ordez ezarritako materialaren tenperaturaren arabera determinatuko da denbora hori. Gainazaleko tenperatura neurtzeko, hornitzaileak emandako gomendioei jarraiki, 0,5 balioko emisibitatea ezarri da aleazio baxuko altzairuen eta aluminio-aleazioen kasuan.

Beste aldetik, eskaner laser bat, Laser Scanner Quelltech Q4-120 serie (Quelltech, Alemania), ere erabili da III-2. irudian ikus daitekeen robotaren posizioan ezarritako materialaren geometria eskaneatzen duelarik kapa bakoitza ezarri ondoren. Hala, ezarritako geruzen zeharkako forma geometrikoa irudikatzen duten puntu-hodeiak lortzen dira. Puntu hodei horiei esker, datuak monitorizatzeaz gain, langileak eskaneatutako profila ikusi eta hurrengo geruzarako z posizioa erabaki dezake. Gainera, modu horretara geruzako hazkundea ere kontrola daiteke eta kapa bakoitzarentzat programatutako altuera doitu daiteke. Xehetasun gehiagorako, laser honek 244 puntu neurtzen ditu profil bakoitzeko eta doktore-tesi honetan diseinatutako sistemarekin aurreratutako 2 mm-ko profil bat jaso da.



*III-2. irudia. Robotaren eskaneatze posizioa*

Diseinatutako sistema robotikoa osatzen duten ekipamenduen arteko komunikazioak kontrolatu eta kontrol-arauak integratu ahal izateko, PC aplikazio bat sortu da. Aplikazio honek, alde batetik, laserraren eta pirometroaren bidez eskuratutako datuak monitorizatzen ditu eta soldadura-iturriaren eta robotaren barne-seinaleak jasotzen ditu: intentsitatea, tentsioa, hariaren elikatze-abiadura eta aitzinamendu-abiadura. Robotaren ardatz nagusiekiko posizioak eta ardatz aktiboekiko eskumuturraren angeluak ere monitorizatzen ditu. Monitorizazio hori 2 Hz-ko maiztasunarekin burutu da. Bestalde, PC aplikazioak prozesua kontrolatzen du eta etapa bakoitzean jarraitu beharreko urratsak zehazten ditu.

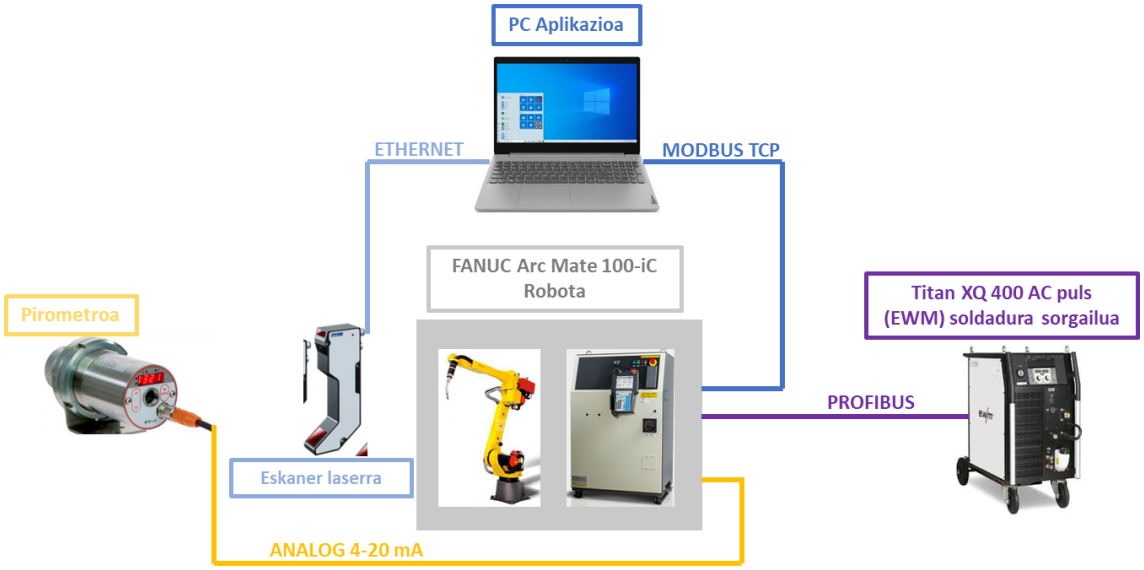
Hala, robota, PCa, laserra eta pirometroa behar bezala komunikatu ahal izateko, III-3. irudian ikus daitezkeen gailuen arteko komunikazio-sistema ezarri da:

• Laser-PC: komunikazio horren bidez, aplikazioak laserra kontrolatzen du eta laserrak neurketak ematen dizkio ordenagailuari. Komunikazio hori Ethernet bidez egiten da.

• Pirometro-Robota: komunikazio honen bidez, pirometroaren neurketak robotaren erregistro batean idazten dira denbora errealean. Komunikazio hori seinale analogikoen bidez egiten da.

• PC-Robota: komunikazio-protokolo propioa garatu da ezarpen parametroak bidaltzeko, ezarpen posizioak idazteko, eragiketak idazteko eta irakurtzeko, zenbakizko erregistroak idazteko, etab. Komunikazio hori Modbus TCP bidez gauzatzen da.

• Robota-Soldadura-iturria: Soldadura-iturriari aginduak emateko eta soldadura-iturriak itzultzen dituen seinaleak irakurtzeko eta PCra bidaltzeko balio du. Komunikazio hori Profibus bidez egiten da.




*III-3. irudia. Garatutako sistema robotikorako erabilitako komunikazio-protokoloaren eskema*

## 3 GMAW sinergikoan oinarritutako WAAM prozesuaren parametro doigarriak

Gaur egun, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren hainbat parametro doitu daitezke prozesuaren zenbait alderdi kontrolatzeko. III-1. taulan prozesu horren parametro nagusiak laburbiltzen dira.

*III-1. taula. GMAW sinergikoan oinarritutako WAAM prozesuaren parametro nagusiak*

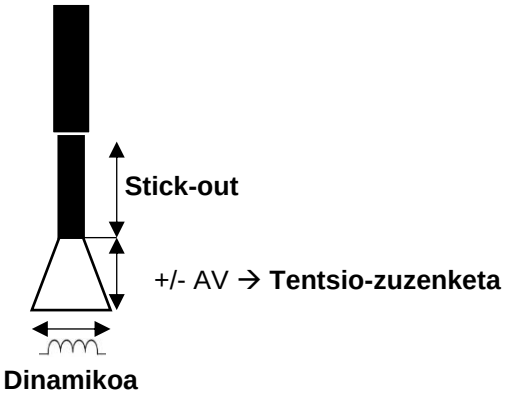
| **Parametroak** | |
|---|---|
| ***Funtzionamendu-modua***<br>***Materiala***<br>***Hariaren diametroa [mm]***<br>***Babes-gas mota*** | ***Job*** *(soldadura-iturri bakoitzaren araberakoa)* → Estandarra / Pultsatua |
| ***Hasiera eta amaierako arrapalak*** | ***Bi denbora***<br>Arrapalarik ez |
| | ***Bi denbora berezi***<br>Arrapalak bai |
| ***Stick-outa [mm]*** | Zuziaren ahotik haria irteten den distantzia |
| ***Arkuaren zabalera*** → aldaketa → ***Dinamikoa*** | |
| ***Arkuaren altuera*** → aldaketa → ***Tentsio-zuzenketa*** | |
| ***Babes-gasaren emaria*** | [l/min] |
| ***WFR*** → | ***DR*** *(1. ekuazioaren araberakoa)* |
| ***TS*** | [mm/min] |
| ***Ezarpen estrategia*** | Gainjartzea, oszilazioa, matriziala, etc. |
| ***Input termikoa*** | Beroaren ezarpena [J/mm] |

Lehenik eta behin, soldadura-iturri bakoitzean eskuragarri dauden funtzionamendu-moduetatik (GMAW, Cold Arc, Force Arc, etab.) bat aukeratzen da. Funtzionamendu-modu horiek antzekoak izan ohi dira hainbat fabrikatzaileren soldadura-iturrietan (EWM, Fronius, etab.), nahiz eta izen desberdinekin aurkeztu, eta bakoitzaren artean aldaketa txikiak izan. Funtzionamendu-modua aukeratu ondoren, materialaren, hariaren diametroaren eta babes-gas motaren arabera jarduteko modu jakin bat aukeratuko da (Job konkretu bat). Job hori erabilitako soldadura-iturriaren barneko datu-basean programatuta dago, eta bertan zehazten dira, hariaren elikatze-abiadura maila desberdinetarako, soldadura-harian sartuko diren intentsitate-seinaleen forma eta ezaugarriak (oinarri-intentsitatea, gailur-intentsitatea, maiztasuna, etab.) Horregatik, soldadura-iturri sinergiko bakoitzak bere datu-base propioak izango ditu, eta, beraz, lan-modu, material, hariaren diametro eta babes-gas mota konbinazio bakoitzerako, intentsitate-seinale zehatzak sortuko ditu. Soldadura-iturria sinergikoa ez bada, datu-base horiek ez dira existituko. Alderdi hori zehatzago azalduko da hurrengo atalean. Behin Job-a aukeratuta, prozesua pultsukakoa edo estandarra izango den erabaki beharko da. Honela, Job bererako, soldadura-harian sartutako intentsitate-seinaleak pultsuak dituen ala ez zehaztu daiteke.

Gainera, bi denborako prozesua edo bi denbora bereziko prozesua egin nahi den ere aukeratu beharko da. Gaur egun erabiltzen diren soldadura-iturri askok bi aukera hauek dituzte soldadura-kordoien hasiera eta amaiera kontrolatzeko. Bi denborako prozesuan ez da hasiera eta amaiera arrapalarik aplikatzen

intentsitate-seinaleetan; beraz, material gehiegi agertzen da hasieran, eta falta amaieran. Alderdi hori hobeto kontrolatzeko, bi denbora bereziko aukera asmatu zen, harian ezarritako intentsitate-seinaleei hasierako eta amaierako arrapala parametrizagarriak gehitzen dizkiena, kordoiaren luzera osoan kordoi homogeneo bat lortzeko. Doktore-tesi honetan egindako esperimentazio guztirako bi denborako prozesuak erabiltzea erabaki da. Aukera hau egin da entseatu beharreko parametroen kopurua murrizteko eta a priori itxurazko abantailarik ez duela ekarriko uste delako. Hala ere, etorkizuneko ikerketetan bi denbora bereziko prozesuak aztertu beharko direla aurreikusten da, material bakoitzerako arrapala parametro egokienak zehaztuz.

WAAM prozesuan zehaztu beharreko beste parametro garrantzitsu batzuk Stick-outa, arkuaren luzera eta arkuaren zabalera dira. III-4. irudian ikus daitezke horien definizioak. Stick-outa, zuziaren ahotik haria irteten den distantzia da. . Distantzia hori robotaren altuerak kontrolatzen du, eta lotura estua du arkuaren altuerarekin; zenbat eta handiagoa izan bata, orduan eta txikiagoa da bestea. Arkuaren luzera eta zabalera zertxobait alda daitezke soldadura-iturritik. Arkuaren zabalera eta altuera aldatzeko soldadura-iturrian erregulatu behar diren parametroei "dinamikoa" eta "tentsio-zuzenketa" esaten zaie. Eskuzko soldadura prozesuetan oso ohikoa izaten da langileak balio horiek doitzea soldadura kalitate ezin hobeko kordoiak lortzeko. Hala eta guztiz ere, doktore-tesi honetan sistema robotiko bat garatu da WAAM prozesurako, soldadura automatikoko prozesu bat era laburrean azalduta eta beraz, bai arkuaren zabalera eta bai luzeraren aldaketak, hau da, “dinamikoa” eta “tentsio-zuzenketa”, baliogabe mantenduko dira burututako esperimentazio guztian.




*III-4. irudia. Stick-outaren, arkuaren luzeraren eta arkuaren zabaleraren definizioa*

Azkenik, WAAM prozesuaren produktibitatea kuantifikatzeko asko erabiltzen da ezarpen-tasa (*Deposition Rate, DR*) terminoa eta 1. ekuazioaren arabera kalkulatuko litzateke, WFR hariaren elikatze-abiadura izanik, d hariaren diametroa eta ρ materialaren dentsitatea.

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

# 4 Titan XQ 400 AC puls (EWM) soldadura-iturriaren funtzionamendu-modu sinergikoak

GMAW soldadura sinergikoa, GMAW soldadura arruntaren aldaera bat da eta gaur egun, soldadura-iturri aurreratuetan gehien erabiltzen den metodoa da. GMAW soldadura-iturri sinergikoek (doktore-tesi honetan Titan XQ 400 AC puls iturria) digitalki manipulatutako energia-iturri bat dute eta honek arku elektrikoa sortzeko soldadura-harietan sartzen diren intentsitate-seinaleak sortzen ditu. Aipatu bezala, intentsitate-seinale horiek pultsatuak edo estandarrak izan daitezke. Pultsatuak badira pultsu horietako bakoitzean, haritik oinarri-materialera, material tanta berdin bat askatzen da (III-6. irudia), hariaren diametroaren araberako bolumenarekin [Kah, 2013]. Pultsu horiek, prozesuko parametroen arteko erlazio berezi batekin konbinatuta, hariaren fusio egonkor bat ziurtatzen dute. Aldiz, GMAW prozesuan, intentsitateak ezarritako tentsio-seinalea balio konstante batetik gertu mantentzen da.

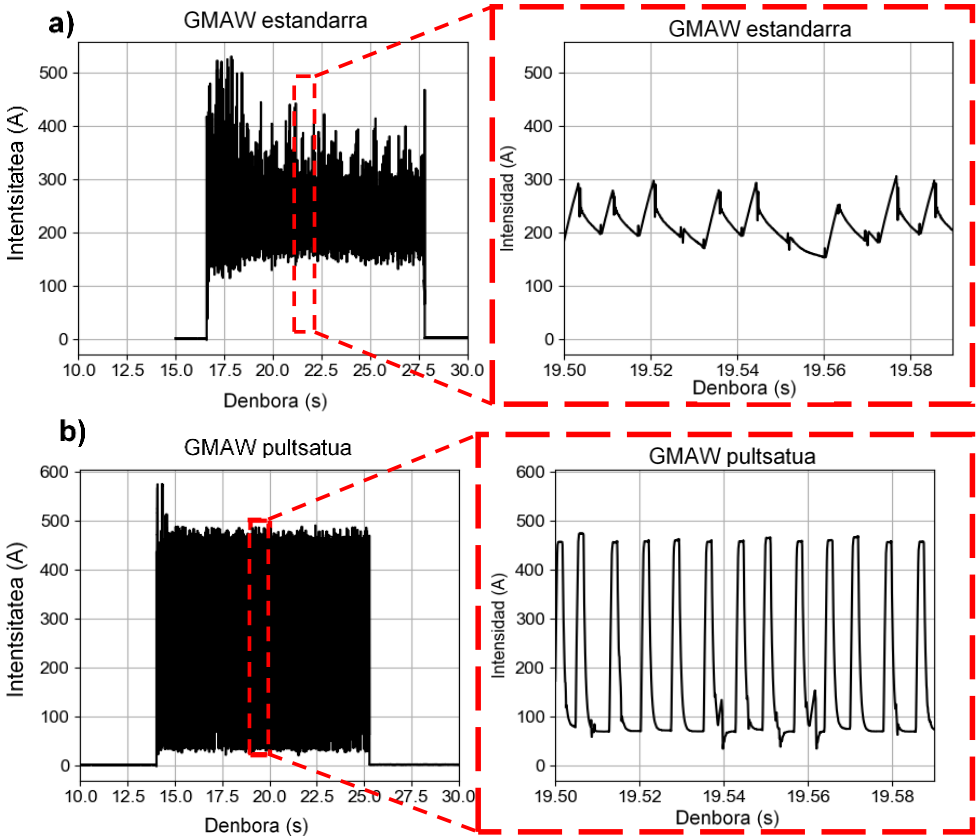
Aukeratutako funtzionamendu-moduaren arabera, GMAW soldadura-iturri sinergikoek soldadura-harian sartzen diren uhin-forma desberdindun intentsitate-seinaleak sortzen dituzte. Intentsitate-seinalearen ezaugarriak ez dira aukeratutako funtzionamendu-moduaren araberakoak soilik, materialaren, gas babeslearen eta hariaren diametroaren araberakoak ere badira. Horrela, aipatutako funtzionamendu-modua eta parametroak ezarrita, Job-a zehazten da. Aldez aurretik aipatu den bezala, aukeratutako Job-aren arabera, soldadura-iturri sinergikoek barneko datu-baseak dituzte, eta berauetan zehazten dira, hariaren elikatze-abiadura maila desberdinetarako, harian sartzen den intentsitate-seinalearen ezaugarriak. Ezaugarri horien artean daude oinarri-intentsitatea, gailur-intentsitatea, maiztasuna, etab. Adibidez, altzairuetan GMAW funtzionamendu-moduarekin, %20 $CO_2$ - %80 Ar babes-gasarekin eta 1,2 mm-ko hari-diametroarekin erabili beharreko Job-a 9a izango litzateke. Job ezberdinak, laburbilduz soldadura-iturrien barneko datu-baseak direnak eta prozesuan sartutako materialean aplikatu beharreko intentsitate-seinalearen formaren ezaugarriak jasotzen dituztenak, zenbakien bidez izendatzen dira. Hala, soldadura-iturrien fabrikatzaile bakoitzak iturri bakoitzean erabilgarri dauden Job-en zerrenda ematen du. Behin Job-a zehaztuta dagoenean, arku elektrikoa sortzeko soldadura-harian sartu beharreko intentsitate-seinalearen forma soilik ezarritako hariaren elikatze-abiaduraren araberakoa izango da. Hau da, hariaren elikatze-abiaduraren arabera automatikoki aldatuko dira sartutako

intentsitate-seinalearen ezaugarrien (oinarri- intentsitatea, gailur-intentsitatea, maiztasuna, etab.) balioak.

Ezaugarri horiek hariaren elikatze-abiaduraren arabera automatikoki hautatzeko prozesua algoritmo baten bidez egiten da. Algoritmo horrek ezarri nahi den materialari buruzko informazioarekin kalkulu-errutinak eta datu-base bat barne hartzen ditu. Horrek esan nahi du soldadura-iturriak sinergikoak direla, hau da, datu-baseak dituztela sartutako zehaztapenen arabera (Joba eta WFRa) intentsitate-seinalearen forma zehazteko.

Pultsuaren ezaugarrien kontrol sinergiko horrek soldadura-kordoiaren profil eta penetrazio uniformeak bermatzen ditu. Alderaketan, multzo ez-sinergikoen desabantaila nagusia hariaren elikatze-abiadura bakoitzerako pultsuaren ezaugarrien konfigurazio indibiduala behar dutela da. Horrela, Titan XQ 400 AC puls (EWM) soldadura-iturriak lau funtzionamendu-modu nagusi ditu, bakoitza aplikazio zehatz baterako materialaren transferentzia egokiarekin: GMAW estandarra/pultsatua, Cold Arc, Force Arc estandarra/pultsatua eta AC pultsatua.

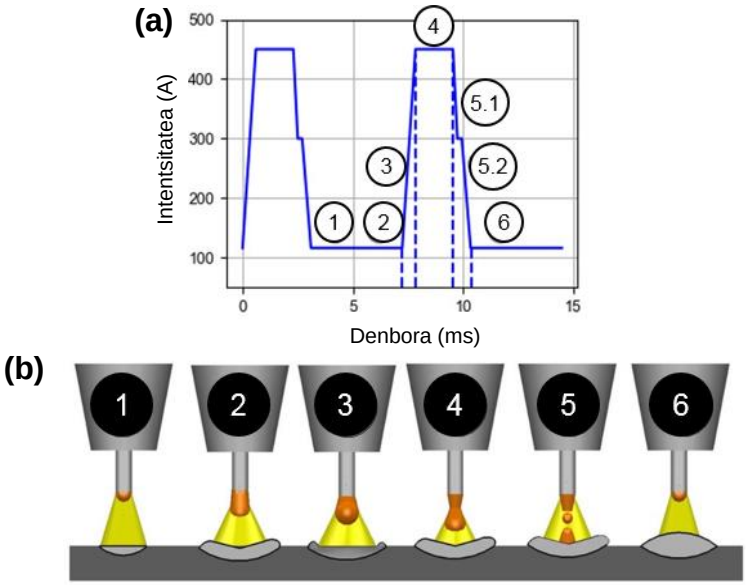
Alde batetik, GMAW estandar eta pultsatua funtzionamendu-moduak ohikoak eta oso erabiliak dira, ezarpen-tasa altuak ahalbidetzen dituztelarik (altzairuetarako, adibidez, posible dira 1,5 eta 16 m/min arteko hariaren elikatze-abiadura balioak). GMAW modu estandarrerako, altzairuetan, %20 $CO_2$ - %80 Ar babes-gasarekin, 1,2 mm-ko hari-diametroarekin (Job 9) eta 5 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin lortutako intentsitate-seinalea III-5. irudian ikus daiteke. Seinale horrek eta doktore-tesi honetan agertzen diren gainerako maiztasun handian jasotako seinaleak Oros OR35 (Oros, Grenoble, France) eskuratze-sistemaren eta NVGate softwarearen bidez bildu dira 12,8 kHz-tara.




*III-5. irudia. GMAW a) estandarraren eta b) pultsatuaren intentsitate-seinaleak, %20 $CO_2$ - %80 Ar babes-gasa erabilita altzairuetan, 1,2 mm-ko hari-diametroarekin (Job 9) eta 5 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurekin*

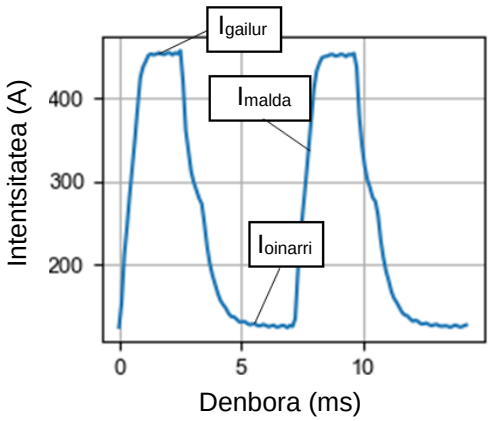
GMAW estandarrak materiala modu erratikoan transferitzen du transferentzia globularraren eta Spray-aren arteko eskualdeetan. Aldiz, GMAW pultsatuaren intentsitate-seinalea maiztasun handiko pultsuez osatuta dago eta horien ondorioz, material urtuzko tanta bat modu kontrolatuan transferitzen da haritik bainu urtura pultsu bakoitzean. Horrek bero-ekarpen txikiagoa eta zipriztin gutxiago sortzen ditu. Beraz, doktore-tesi honetan eta etorkizuneko azterlanetan gomendatzen da beti GMAW teknologian oinarritutako WAAM fabrikazio-prozesuetan modu pultsatuak erabiltzea, materialaren transferentzia-prozesuaren kontrol handiagoa lortu ahal izateko.

Adibidez, III-6. irudiak EWMk diseinatutako datu-baseko datuak interpolatuz lortzen den intentsitate-seinalearen forma teorikoa erakusten du, GMAW pultsatu funtzionamendu-moduarentzat, %20 $CO_2$ - %80 Ar babes-gasa duten altzairuetan, 1,2 mm-ko hariaren diametroarekin (Job 9) eta 8 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin. Kasu honetan, tantak sortzeko maiztasuna 138,2 Hz-koa da (EWMren datu-basetik ateratako datua). Irudi honek tantak sortzeko prozesua eta intentsitate-seinalearekin prozesu honek duen korrelazioa erakusten ditu.



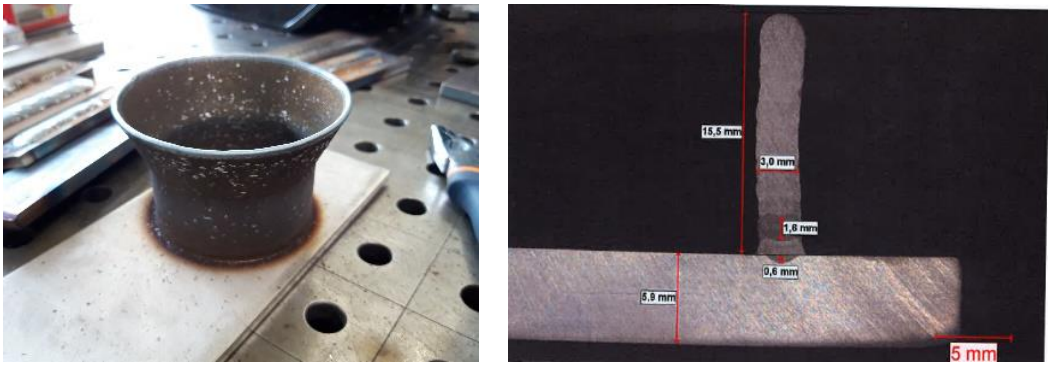

*III-6. irudia. (a) GMAW pultsatu funtzionamendu-moduaren intentsitate-seinale teorikoaren forma, %20 $CO_2$ - %80 Ar babes-gasarekin altzairuetan, hariaren diametroa 1,2 mm-koa (Job 9) eta hariaren elikatze-abiadura 8 m/min-koa denean; (b) Material urtuaren tanta bat eratzeko prozesua eta intentsitate-seinalearekin prozesu honek duen korrelazioa*

Parametro berberekin, soldadura-iturritik zuzenean frekuentzia altuan hartutako seinalea erreala III-7. irudian ikus daiteke. Ikus daitekeenez, intentsitateak gora egiten du malda kontrolatuarekin, tanta eratzen den gailur-intentsitatera iritsi arte; jarraian intentsitate hori jaitsi egiten da eta tarteko intentsitate batean gelditzen da denbora labur batez, tantak askatzen den oinarri-intentsitatera iritsi arte. Uhinaren periodoa seinale honetan 7,23 ms-koa da, 138,2 Hz-ko tantak eratzeko maiztasuna eragiten duena. Prozesutik jasotako seinale hau soldadura-iturritik datu-basearen bidez interpolatutakoaren (III-6. irudia) antzekoa da.



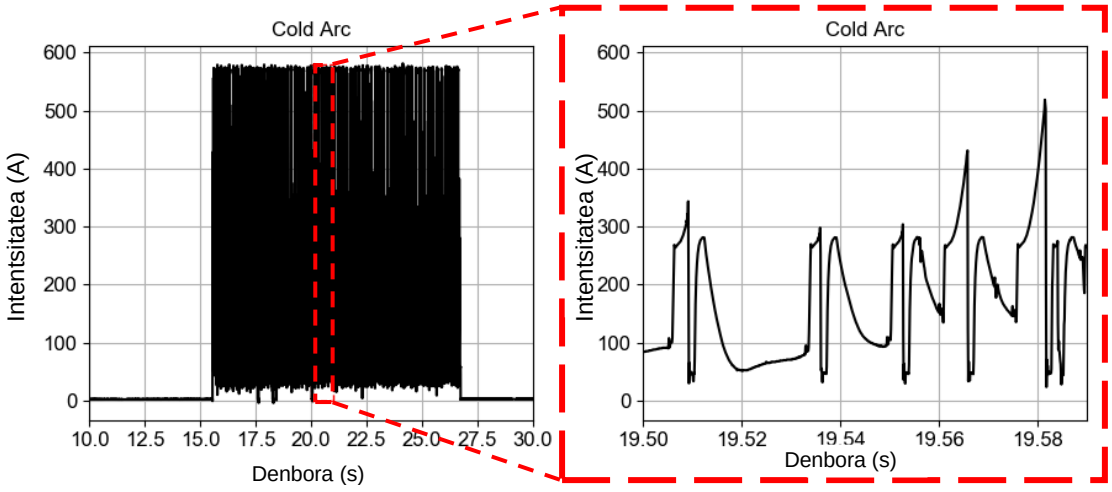

*III-7. irudia. Intentsitate-seinale erreala GMAW pultsatu funtzionamendu-modurako altzairuentzat 20% $CO_2$ - 80% Ar gasarentzat, 1,2 mm-ko hariaren diametroarekin (Job 9) eta 8 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin*

Bestalde, EWM enpresak diseinatutako eta aurkeztutako Cold Arc moduak materiala modu kontrolatuan transferitzen du zirkuitu laburreko prozesuen bidez. Ezarpen-tasa txikiko prozesua da, hariaren elikatze-abiadura baxuak onartzen dituelarik, adibidez, 1 m/min eta 5 m/min bitartekoak altzairuen kasuan. Hala, prozesu erraz bat lortzen da bero-ekarpen baxuarekin. Horregatik, egokia da III-8. irudian ikusten dena bezalako oso horma finak dituzten piezak fabrikatzeko.




*III-8. irudia. 3 mm-ko lodiera duen edalontzia Cold Arc moduarekin fabrikatua altzairu herdoilgaitzean, 1 mm-ko hari diametroarekin.*

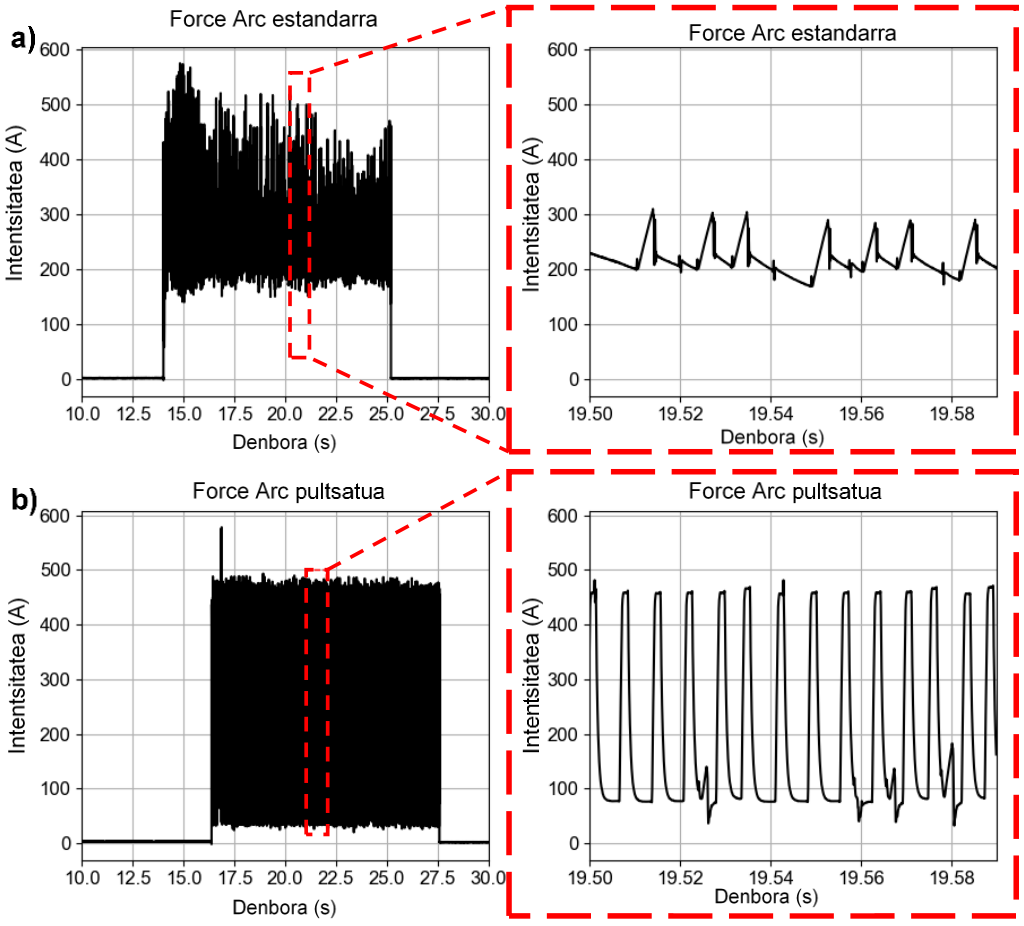
Cold Arc prozesuak pultsua jada barnean darama eta beraz, ez da pultsuaren aukera gaitu behar. Gaitzen bada, jada ez da Cold Arc prozesua izango, baizik eta GMAW prozesu pultsatua. III-9. irudian, altzairuetan %20 $CO_2$ - %80 Ar babes-gasarekin, 1,2 mm-ko hariaren diametroarekin, Cold Arc funtzionamendu-moduaren (Job 194) intentsitate-seinalea ikus daiteke 5 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarako.




*III-9. irudia. Cold Arc moduaren intentsitate-seinalea, altzairuetan, %20 $CO_2$ - %80 Ar babes-gasarekin, 1,2 mm-ko hariaren diametroarekin (Job 194) eta 5 m/min hariaren elikatze-abiadurarekin*

Force Arc estandar edo pultsatu funtzionamendu-moduak, bestalde, ezarpen-tasa altuetarako erabiltzen dira (altzairuen kasuan, hariaren elikatze-abiadura

balioak 1,5 eta 18 m/min artekoak izan daitezkeelarik) presio handiko arku voltaikoarekin. Hala, modu horretan arkuaren direkzio-egonkortasun handia eta penetrazio sakona eta kontzentratua lortzen dira. Force Arc modua ez da egokia WAAM prozesurako, gehiegizko bero-ekarpena sartzen duelako eta hori dela eta, soldadura prozesuetarako edo WAAM bidez fabrikatutako lehen geruzetarako soilik erabiliko da penetrazio handia behar den kasuetan. GMAW estandar eta pultsatu funtzionamendu-moduen kasuan bezala, kasu honetan ere komenigarria da pultsukako modua erabiltzea prozesuaren kontrol handiagoa izateko. III-10. irudian Force Arc estandar eta pultsatu moduen intentsitate-seinaleak ikus daitezke altzairuetan, %20 $CO_2$ - %80 Ar babes-gasarekin, hariaren 1,2 mm-ko diametroarekin (Job 180) eta 5 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarako.



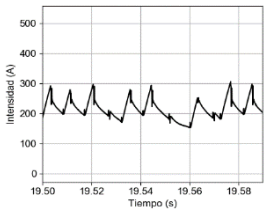
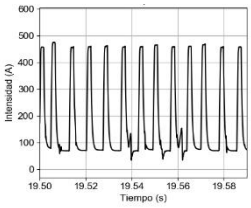
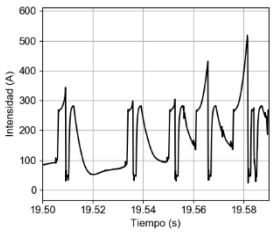
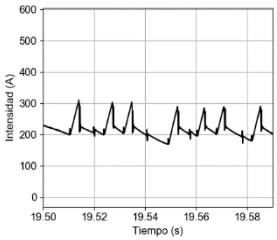
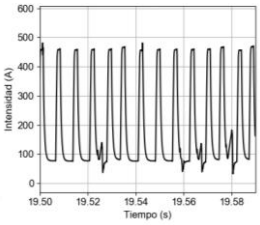

*III-10. irudia. Force Arc a) estandarraren eta b) pultsatuaren intentsitate-seinaleak altzairuetan %20 $CO_2$ - %80 Ar babes-gasarekin, 1,2 mm-ko hariaren diametroarekin (Job 180) eta 5 m/min hariaren elikatze-abiadurarekin*

Azkenik, pultsukako AC moduan, intentsitate-seinaleak polaritate aldakorra du, eta ezarpen-tasa handiak baimentzen ditu. Prozesu hori aluminiozko ezarpenetarako soilik da egokia eta modu pultsatuan egingo da beti. Titan XQ 400 AC puls (EWM) soldadura-iturriko modu honek 2 eta 12 m/min arteko

hariaren elikatze-abiadurak baimentzen ditu aluminiozko Al-Mg aleazioetarako. Modu hori V. kapituluan jorratuko da sakonki.

Amaitzeko, III-2. taulan Titan XQ 400 AC puls (EWM) soldadura-iturrian altzairuetarako erabiltzen diren funtzionamendu-modu nagusien laburpena aurkezten da.

*III-2. taula. Titan XQ 400 AC puls (EWM) soldadura-iturrian altzairuetarako erabiltzen diren funtzionamendu-modu nagusiak*

| Funtz.-modua | Materiala | Gas mota | Hari Ø | Job-a | Estandarra | Pultsatua |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **GMAW** | Altzairua | %20 $CO_2$ - %80 Ar | 1,2 | 9 |  |  |
| **Cold Arc** | | %20 $CO_2$ - %80 Ar | 1,2 | 194 |  | - |
| **Force Arc** | | %20 $CO_2$ - %80 Ar | 1,2 | 180 |  |  |

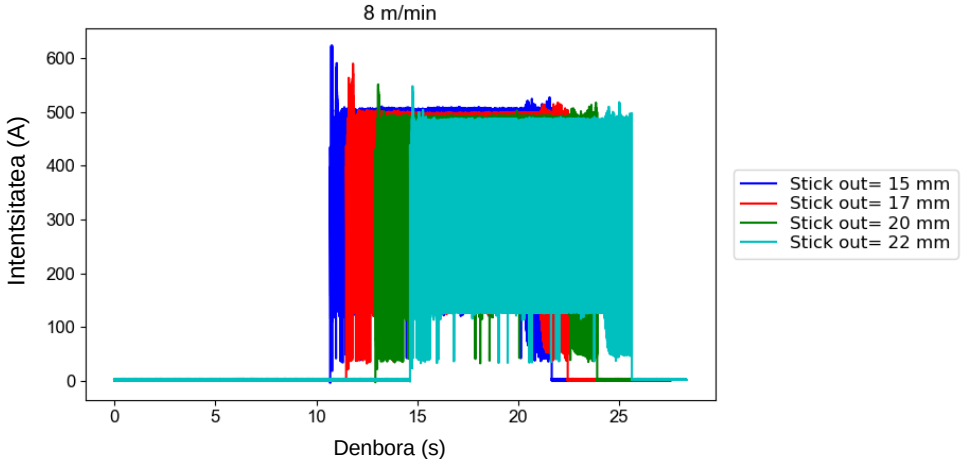
## 5 Altuera kontrolaren garapena

GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan, zuzitik fabrikatu beharreko piezara dagoen distantziak berebiziko garrantzia du; izan ere, altuera horrek eragina izango du lortutako intentsitate-balioetan eta arkuaren egonkortasunean eta egokitasunean. Eragin hori aurretik egin diren eta aurrekari gisa jarraian azaltzen diren hiru ikerketari esker ondorioztatu da. Hiru azterlan horietan material bezala ER70S-6 altzairua (IV. kapituluan WAAM teknologiaren bidez material honen ezarpena sakon aztertuko da) eta GMAW pultsatu funtzionamendu-modua erabili dira.

Distantzia hori kontrolatzeko, robotaren altuera doitzen duen altuera kontrol bat garatu da, prozesuan ezartzen den intentsitatea nahi den intentsitatea izan dadin. Kontrolik aplikatzen ez bada, material bakoitzaren geruzako hazkundea oso ondo ezaugarritu beharko litzateke parametro-multzo bakoitzarekin. Hala, kontrola erabiliz materialaren egokitasun metalurgikoa ziurta daiteke eta baita akatsak (betetze-faltak edo porositatea) izateko probabilitate txikiagotu ere. Gainera, fabrikatu beharreko piezen programazioa askoz errazagoa izatea ahalbidetzen du kontrol honek, ez baita beharrezkoa erabilitako parametroekin material bakoitzaren geruzako hazkundearen ezagutza zehatza izatea.

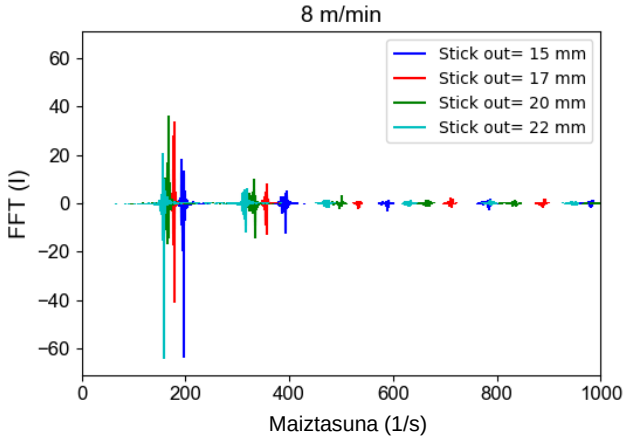
## 5.1 Aurrekariak

Lehenik eta behin, Stick-outak ezarpen-prozesuan eragin handia zuela susmatzen zenez, ikerketa bat egin da alderdi hori aztertzeko. WFR ezberdinekin, 8 m/min eta 16 m/min eta Stick-out desberdinekin (15, 17, 20, 22 mm) soldadura-kordoiak fabrikatu dira. TSren balioa kasu guztietan 650 mm/min-koa izan da. III-11. irudian, 8 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarako eta hainbat Stick-out ezberdinetarako maiztasun handian jasotako intentsitate-seinaleak ikus daitezke.



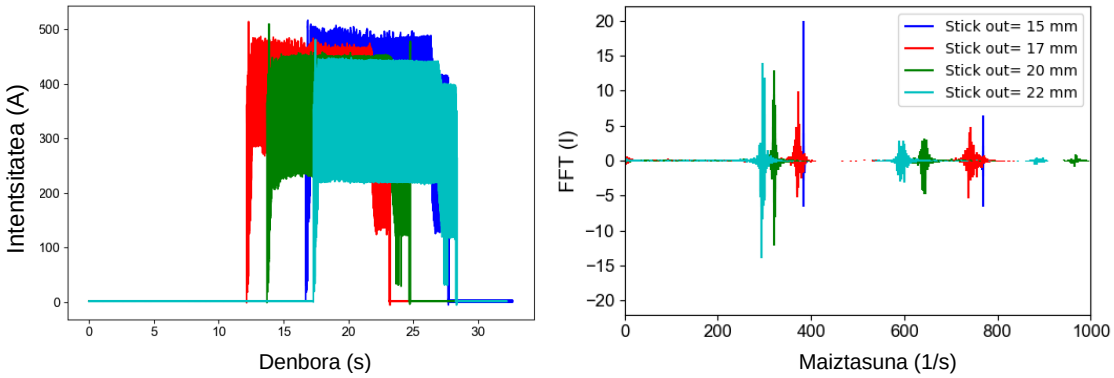

*III-11. irudia. WFR = 8 m/min eta Stick-out desberdinak dituzten kordoien fabrikazioan zehar jasotako intentsitate-seinaleak*

Argi ikusten denez, intentsitate-pultsuen gailur-balioak handitu egiten dira Stick-outa jaisten denean. Halaber, intentsitate-seinalearen maiztasuna ere aldatu egiten da Stick-outaren arabera. III-12. irudian ikusten den bezala, zenbat eta txikiagoa izan Stick-outa handiagoa da maiztasuna.



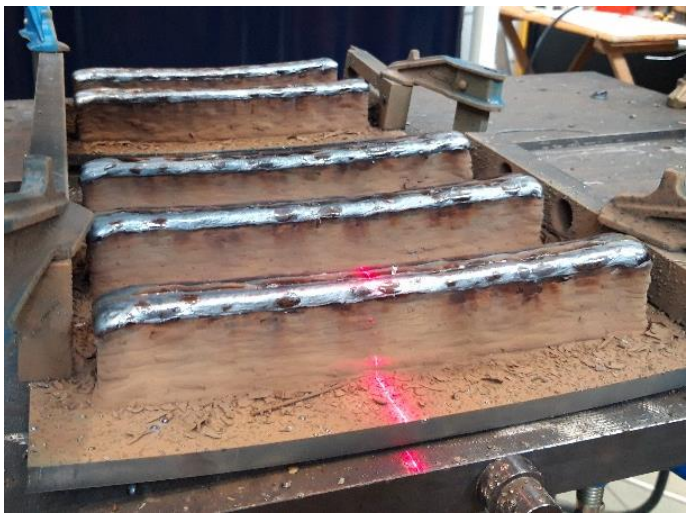

*III-12. irudia. WFR = 8 m/min eta Stick-out desberdinak dituzten kordoien fabrikazioan zehar jasotako intentsitate-seinaleen FFT grafikak*

Efektu berberak hautematen dira 16 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin fabrikatutako kordoietan jasotako seinaleetan, III-13. irudian ikus daitekeen bezala.



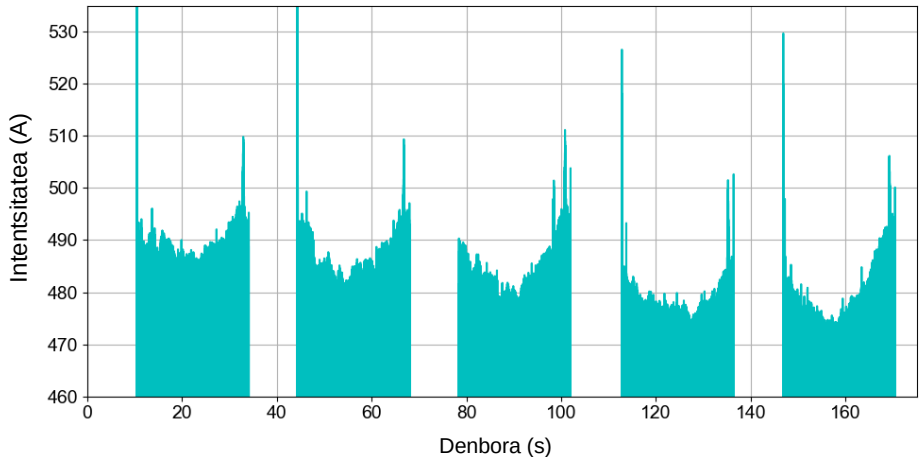

*III-13. irudia. WFR = 16 m/min eta Stick-out desberdinak dituzten kordoien fabrikazioan zehar jasotako intentsitate-seinaleak eta euren FFT grafikak*

Bigarrenik, aldi berean fabrikatu dira 230 x 23 x 105 mm-ko eta 60 geruzako 5 horma gainjarri hirukoitz. Fabrikazio honek dirauen bitartean intentsitate-seinaleak maiztasun handian jaso dira eta III-14. irudian ikus daitekeen bezala, fabrikazioan zehar hormetan metatutako beroaren ondorioz oinarri-materialean ondulazio bat sortu da. Ondulazio honek Stick-outaren aldaketa eragiten du, hormaren muturretan erdian baino Stick-out txikiagoa geratzen delarik.



*III-14. irudia. 5 hormen fabrikazioan zehar oinarri-materialaren ondulazioa*

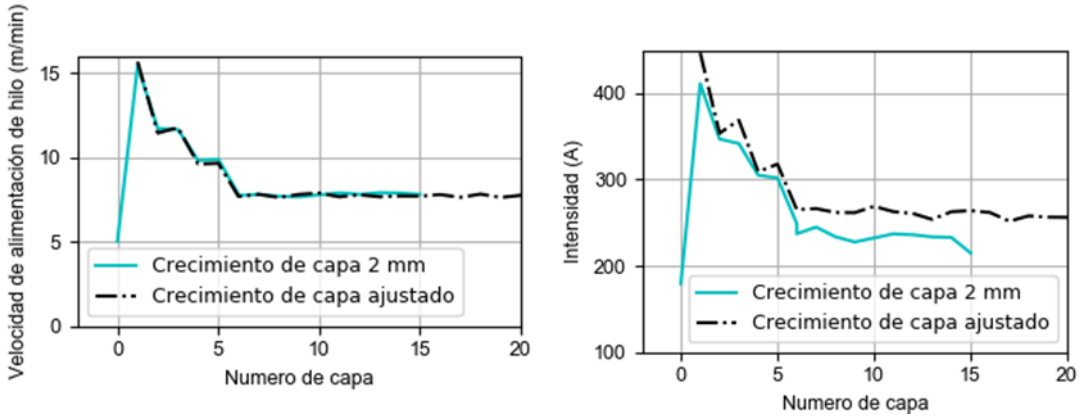
Stick-outaren murrizketak intentsitatearen gailur-balioa eta pultsuen maiztasuna handitzen ditu. III-15. irudian, 23. geruza ezartzen den bitartean jasotako intentsitate-seinalea irudikatzen da eta ikus daitekeen tontor bakoitzak soldadura-kordoi bat adierazten du. Ikusten den bezala, kordoi bakoitzaren muturretan gailur-intentsitatearen balioak handiagoak dira eta erdialdean, aldiz, txikiagoak, Stick-outa txikiagoa baita muturretan erdian baino.




*III-15. irudia. Gainjarritako hiru kordoi dituzten 5 hormen 23. geruzaren fabrikazioan zehar eskuratutako intentsitate-seinalearen zati bat*

Azkenik, ustezko geruzako hazkundea gaizki aukeratzeak sor lezakeen akatsa ikusi ahal izateko, bi horma sinple fabrikatu dira. Batean 2 mm-ko geruzako hazkundea konstantea ezarri da eta bestean, aldiz, geruzako hazkundea doitzen da soldadura-zuzian dagoen eskaner laserraren bidez neurtutako hazkunde errealaren arabera. Azken kasu horretarako, geruza bakoitza egin ondoren, horma eskaneatu egiten da, lortutako datuak irudikatzen dira eta langileak hurrengo geruza non jarriko duen aukeratzen du. Lehenengo horman, aldiz, 2 mm-ko geruzako hazkunde konstantea ezartzen da horma osorako.

Lortutako emaitzetan ikus daitekeenez (III-16. irudia), hariaren elikatze-abiadura 8 m/min-ra jarri ondoren, intentsitatea egonkortu egiten da geruzako hazkundea eskaner laserraren bidez doitzen den hormaren kasuan. Hazkuntza konstanteko hormaren kasuan, berriz, intentsitatea txikituz doa, zuzitik azken geruzarainoko distantzia gero eta handiagoa baita, hau da, Stick-out gero eta handiagoa baita.




**(a)** **(b)**

*III-16. irudia. Bi hormetako geruza bakoitzeko soldadura-kordoien erdiko %60an (a) hariaren elikatze-abiaduraren eta (b) intentsitate-seinaleen batez besteko balioak*

## 5.2 Altuera kontrolaren deskribapena

Hiru adibide horiekin agerian geratzen da altuera kontrolaren beharra, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez piezak erraz programatzeko eta fabrikazioa kontrolatzeko. Kontrol horrek sistema mugikorraren altuera doituko luke, prozesuan zehar izango den intentsitatea, parametro eta material multzo bakoitzerako kontsignatutako intentsitatearen antzekoa izan dadin. Kontrolik aplikatzen ez bada, material bakoitzak parametro multzo bakoitzarekin izango duen geruzako hazkundea oso ondo ezaugarrituta egon beharko da. Hala, kontrolarekin piezak programatzea errazagoa da eta gainera, materialean akatsak izateko aukera txikiagoa da, hala nola, poroak, betetze-akatsak, etb.

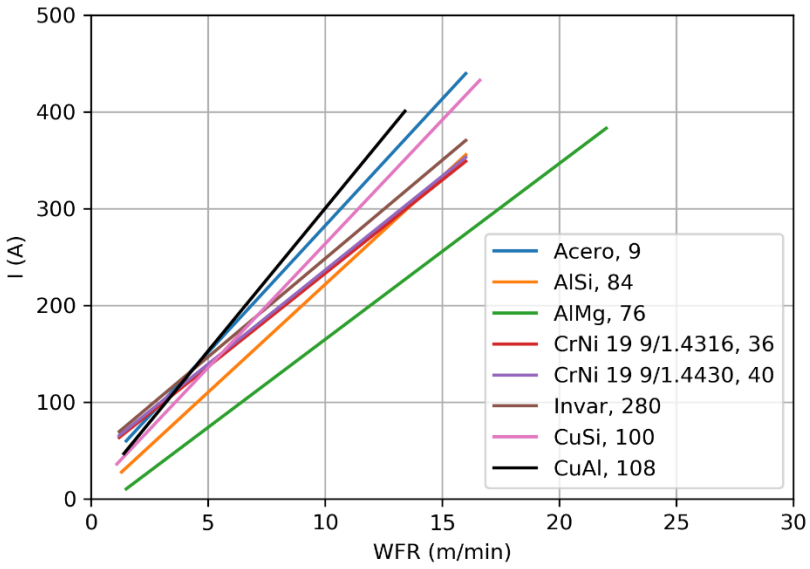
Horregatik, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesurako doktore-tesi honetan garatu den sistema robotikoari altuera kontrola gehitu zaio. Kontrol horrek, kontsignatutako intentsitate baten arabera, robotaren altuera doitzen du, ezarpena optimoa izan dadin. Altuera kontrola, Fanuc-en robotaren posizioak denbora errealean zuzentzea ahalbidetzen duen *Dynamic Path Modification* (DPM) kontrolagailuaren bidez egiten da. Instalatutako kontrol mota kontrol proportzionala da eta robotak daraman erramintaren (*tool*-aren) altuera zuzentzen du ibilbidean zehar.

Horretarako, ezarpen prozesuan zehar intentsitatearen batez besteko balioak 10 baloreko buffer batean biltegiratzen dira eta horien batez bestekoa ateratzen da. Batezbesteko hori kontsignatutako intentsitatearekin alderatzen da eta batez besteko intentsitatea kontsignatua baino handiagoa edo txikiagoa bada, robotaren altuera doitzen da 2. ekuazioaren arabera:

$$z_{zuzenketa} = \frac{I_{kontsigna} - I_{batez\ bestekoa}}{20} * kp \qquad (2)$$

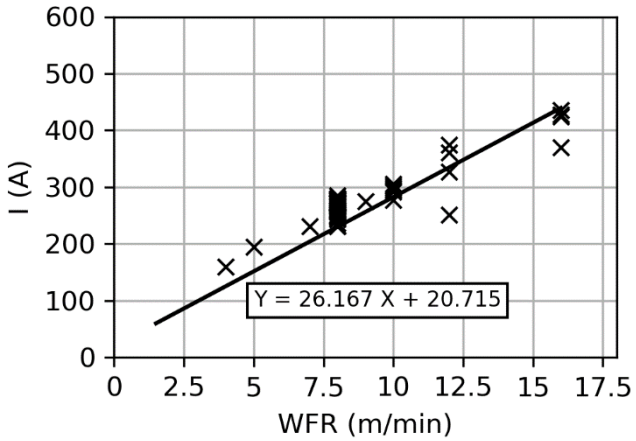
non, kp irabazi proportzionala den, $I_{kontsigna}$ kontsignatutako intentsitatea eta $I_{batez\ bestekoa}$ 10 baloreko bufferrean biltegiratutako intentsitate balio instantaneoen batez bestekoa. Buffer horretan, materialaren ezarpena aurrera doan heinean, datuak freskatzen joaten dira eta batez bestekoa berriz kalkulatzen da kontsignatutako intentsitatearekin alderatzeko, prozesua modu jarraituan eginez.

Kontsignatutako intentsitatearen balioa aukeratutako Job-aren eta hariaren elikatze-abiaduraren araberakoa izango da. Lehenik eta behin, ezarri beharreko materialaren, erabilitako hariaren diametroaren, babes-gas motaren eta funtzionamendu-moduaren arabera, soldadura-iturriko Job jakin bat aukeratzen da. Ondoren, hariaren elikatze-abiadura ezartzen da. Hala, aukeratutako Job-aren eta hariaren elikatze-abiaduraren arabera, intentsitate-seinalearen forma ezarrita geratzen da ekipamendua sinergikoa delako, hau da, ekipamenduak intentsitate-seinalearen ezaugarriak (forma) zehaztuko dituzten datu-baseak eta barneko kalkulu-arauak dituelako. Horregatik, intentsitate-seinale honen batez besteko balio teorikoa ere ezaguna da. Horrela, Job bakoitzerako batez besteko intentsitatea adierazten duten grafiko teorikoak lor daitezke, ezarritako hariaren elikatze-abiaduraren arabera (III-17. irudia).




*III-17. irudia. GMAW pultsatu funtzionamendu-modua erabiltzen duten Job-etan eta material desberdinetan hariaren elikatze-abiaduraren eta intentsitatearen arteko erlazioa. Kontuan izan legendan materiala eta Job-a laburbiltzen direla*

Grafiko horiek teorikoak direla esaten da, fabrikazio-prozesu errealetan faktore batzuen arabera (gehienbat Stick-outa) intentsitate-seinalea zertxobait alda baitaiteke eta beraz, baita haren batez besteko balioa ere. III-18. irudian, 9. Job-aren grafiko teorikoa eta hariaren elikatze-abiadura ezberdinekin egindako kordoi bakarretan lortutako intentsitate balio errealak ikus daitezke. Ikus daitekeenez, balio horiek zuzen teorikora egokitzen dira, baina zertxobait mugituta daude fabrikazio errealari dagozkion hainbat alderdiren ondorioz.

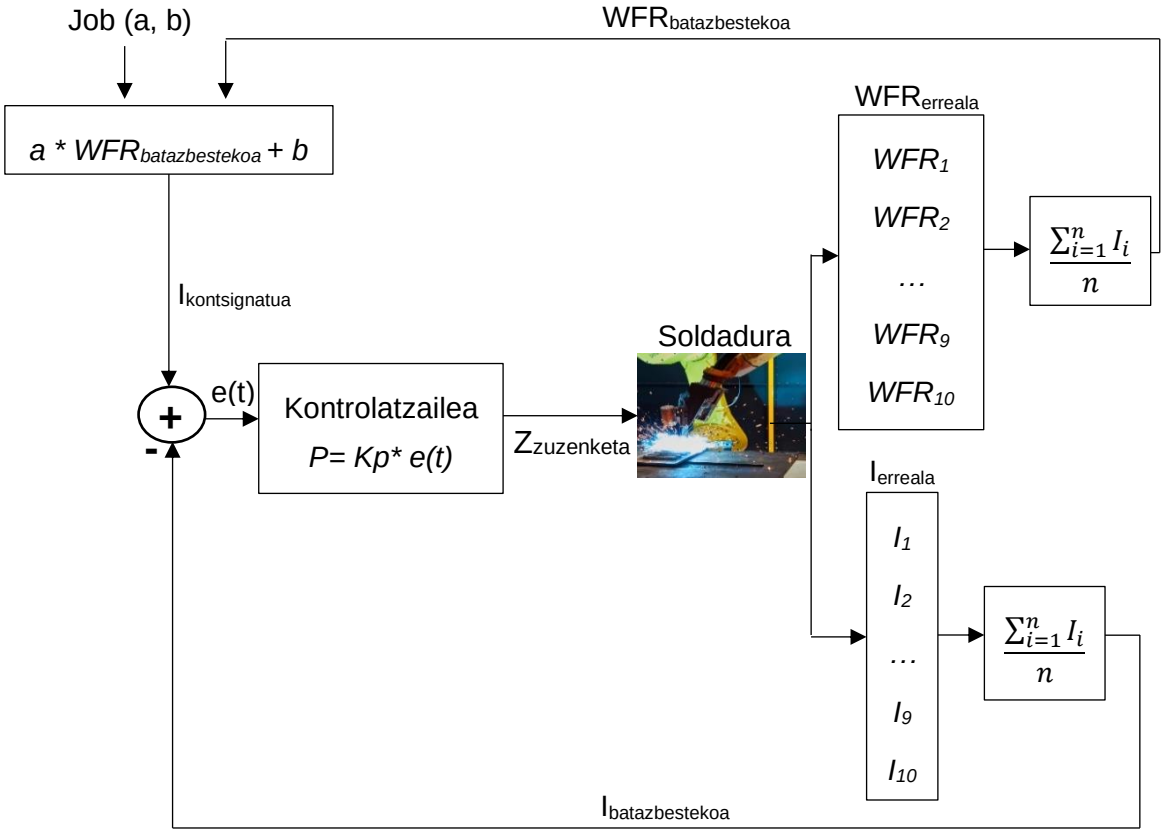



*III-18. irudia. 9. Job-aren zuzen teorikoa eta Job honekin fabrikatutako kordoi bakarretan intentsitatearen batez besteko balio errealak*

Grafiko teoriko horietatik hasita eta erregresio lineala erabiliz, erlazio hau adierazten duten lehen mailako ekuazioak lortzen dira (ikus III-18. irudiko

ekuazioa). Hala, altuera kontrolak, WAAM prozesurako egokiak diren eta Titan XQ 400 AC puls (EWM) soldadura-iturriaren Job ezberdinentzat hariaren elikatze-abiadura eta batez besteko intentsitatea erlazionatzen dituzten ekuazio horiek biltzen ditu.

Horrela, ezarpen-prozesua hastean, 10 baloreko beste buffer batean, hariaren elikatze-abiadura instantaneoak biltegiratzen dira (100 ms-tik behin balio bat biltegiratzen da). Jarraian, balio horien batez bestekoa ateratzen da. Batezbesteko hori aukeratutako Job-erako lortutako ekuazioan sartzen da eta altuera kontrolak jarraitu beharko duen intentsitate kontsignatua kalkulatzen da. Hariaren elikatze-abiaduren Buffer-a, materiala ezarri ahala, datuak freskatzen joaten da eta batez bestekoa behin eta berriz kalkulatzen da kontsignatutako intentsitatearen balioa eguneratzeko. Hau da, adibidez, prozesuan zehar aukeratutako hariaren elikatze-abiadura aldatzen bada, buffer-aren balioak eguneratzen joango dira, horien batez bestekoak aukeratutako balio berria eman arte. Balio berri honekin, altuera kontrolarentzat kontsignatutako intentsitatea birkalkulatuko da eta horrela, robotak kontsignatutako intentsitate berri honen arabera altuera doitzen jarraituko du. Kontrol honen diagrama III-19. irudian ikus daiteke.



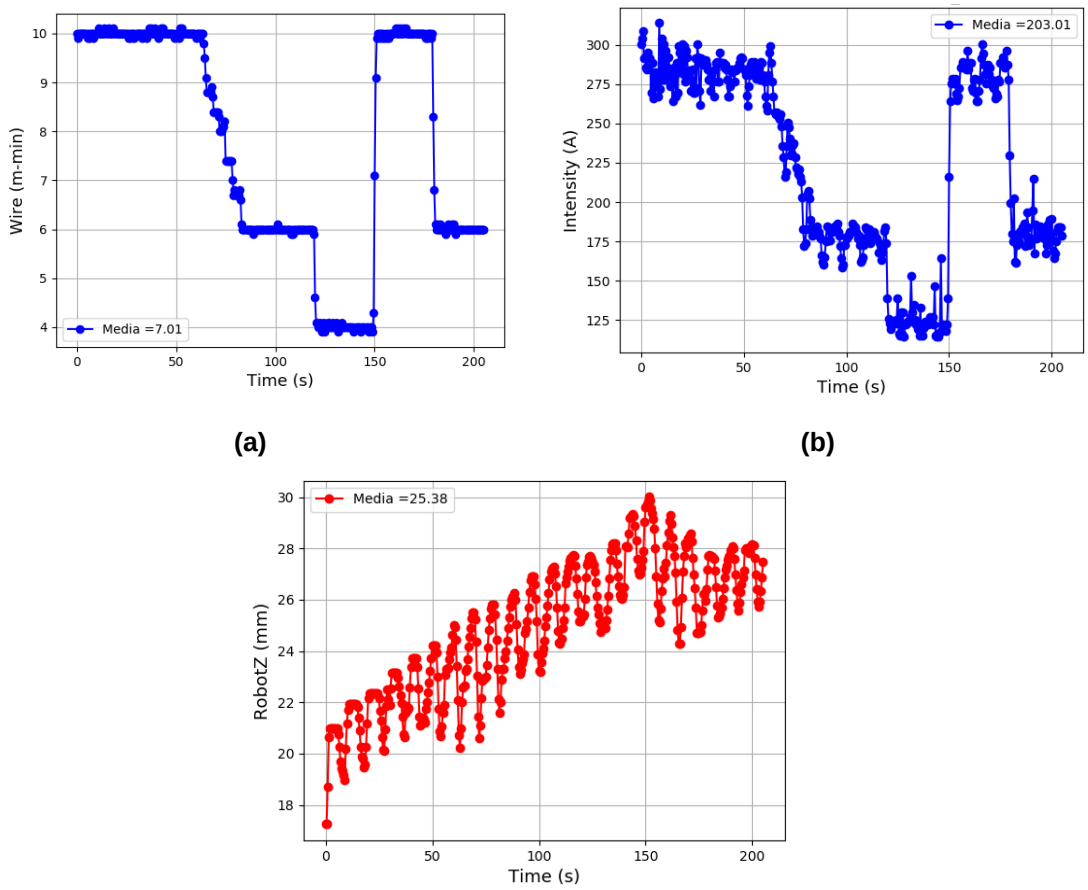

*III-19. irudia. Altuera kontrolaren diagrama*

## 5.3 Altuera kontrolaren balioztatzea: edalontzi sinple baten fabrikazioa

Altuera kontrola balioztatzeko, edalontzi sinple bat fabrikatu da ER70S-6 altzairuzko 1,2 mm-ko diametroko haria erabiliz eta oinarri-material gisara 12 mm-ko S235JR altzairuzko plaka lauak erabili dira. Aukeratutako funtzionamendu-modua GMAW (Job 9) pultsatua izan da eta babes-gasa %20 $CO_2$ -%80 Ar, 17 l/min-ko emariarekin. Stick-outa 15 mm-koa izan da eta aitzinamedu-abiadura berriz, 1740 mm/min-koa. Edalontzia modu jarraian ezarri da, hozte-geldialdirik eta antzekorik gabe.

Edalontzi honen fabrikaziorako, lehen geruzaren ibilbidea baino ez da programatzen eta ondoren, ibilbide hori behin eta berriz errepikatzen da jasotzen den intentsitate-seinalearen araberako kontrolak kalkulatzen duen altuerarekin. Kontrol horretan, segurtasun-arrazoiengatik robota dagoen puntutik hurrengo puntura gehienez 3 mm igotzeko muga jartzen da geruza bakoitzerako eta horrela, edalontzi infinitu bat fabrika daiteke, robotak muga hori inoiz gaindituko ez duen ziurtasunarekin. Beraz, kontrol horrekin, ezarpenak burutu daitezke geruza bakoitzeko hazkundea a priori erabaki beharrik gabe, kontrolak erabakitzen baitu robota puntu bakoitzetik hurrengora zenbat igotzen den, hautatutako Job-aren arabera kalkulatutako intentsitatea mantentzeko. Esperimentazioaren bidez, erabilitako robot antropomorfikoa kontrolatzeko irabazi proportzional (kp) egokia -0,3 dela ondorioztatu da.

Gainera, edalontziaren fabrikazioan kontrolaren funtzionamendu egokia ziurtatzeko, hariaren elikatze-abiadura 10 m/min-tik 6 m/min-ra aldatu da eta ondoren 4 m/min-ra, III-20 a. irudian ikus daitekeen bezala. Ondorioz, intentsitatea modu berean aldatzen da (III-20 b. irudia). III-20 c. irudian ikus daiteke zer bilakaera izan duen robotak Z ardatzean edalontziaren fabrikazioak zirauen bitartean. Robotak prozesuan zehar gertatzen diren hariaren elikatze-abiaduraren aldaketen arabera eta ondorioz, intentsitatearen aldaketen arabera, altuera kontrolari esker bere altuera doitzen du.




*III-20. irudia. Altuera kontrola balioztatzeko egin den edalontziaren fabrikazioan zehar monitorizatutako (a) hariaren elikatze-abiadura, (b) intentsitate eta (c) robotaren altuera balioak*

Beraz, kontrolari esker, III-21. irudian ikus daitekeen, edalontzi egoki bat egin da modu infinituan, aurrez geruzako hazkundearen ezagutzarik izan gabe. Horrek, piezen ezarpen-ibilbideen diseinuari dagokionez egin beharreko lana nabarmen murriztu lezake. Gainera, kontrol horren bidez, ezarritako materialaren kalitatea ziurtatu daiteke.



*III-21. irudia. Altuera kontrola balioztazeko fabrikatutako edalontzia*

# 6 Ondorioak

Kapitulu honetan, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez piezak fabrikatzeko sistema robotiko baten garapena deskribatu da. Hasieran, erabilitako Set-upa eta osagai ezberdinen artean sartutako komunikazio-sistemak zehaztu dira. Ondoren, baita ezarpen-parametroen monitorizazio-sistemak ere. Bigarrenik, GMAW prozesuaren parametro doigarriak definitu dira, eta Titan XQ 400 AC puls (EWM) soldadura-iturriaren funtzionamendu-modu nagusiak aztertu dira: GMAW estandarra/pultsatua, Cold Arc, Force Arc estandarra/pultsatua eta AC pultsatua. Azkenik, doktore-tesi honetan erabili eta garatutako sistema robotikoarentzat altuera kontrola diseinatu da. Hauek izan dira garapen honetatik atera diren ondorio nagusiak:

- Garatutako sistema robotikoa baliagarria da piezak GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez fabrikatzeko. Horretarako, robot antropomorfiko baten aukeraketa interesgarria da duen moldagarritasunagatik eta kostu ekonomiko murritzagatik. Gainera, soldadura-zuzian instalatutako kontrol- eta monitorizazio-tresnak (pirometroa eta eskaner laserra) behar bezala instalatu dira eta langileak erraz erabiltzeko moduko sistema bat sortu da. Azkenik, sortutako sistemaren bidez, prozesuko datu nagusiak eta kontrol-tresnen bidez eskuratutakoak monitorizatzea posible da ondoren aztertzeko.
- Soldadura-iturri sinergiko baten funtzionamendua definitu da. Soldadura-iturri sinergikoek barneko datu-baseen, kalkulu-arauen, determinatutako Job-aren (aldi berean, materialaren, babes-gas motaren, hariaren diametroaren eta aukeratutako funtzionamendu-moduaren araberakoa dena) eta hariaren elikatze-abiaduraren arabera, intentsitate-seinaleak sortu eta soldadura-harian ezartzen dituzte piezak fabrikatzeko arku elektrikoak sortzeko. Intentsitate-seinale horien forma aurretik aipatutako guztiaren menpekoa da eta behin Job-a zehaztuta, soilik hariaren elikatze-abiaduraren bidez gobernatzen da. Horrela, ez da intentsitate-seinalearen forma parametrizatu behar parametro konbinazio posible guztietarako eta soldadura-kordoiaren profil eta penetrazio uniformeak ziurtatzen dira.
- Doktore-tesi honetan erabilitako soldadura-iturriak, Titan XQ 400 AC puls (EWM), lau funtzionamendu-modu nagusi ditu. Beste konpainia batzuetako beste soldadura-iturri batzuek lan egiteko modu apur bat ezberdinak izango dituzte baina antzekoak.
    - ❖ Lehenik eta behin, GMAW prozesu pultsatua ezarpen-tasa handiko prozesua da, pultsu bakoitzean urtutako materialaren tanta bat modu kontrolatuan haritik bainu urtura transferitzen duena.

Konparazioan, GMAW prozesu estandarrak modu erratikoan transferitzen du materiala transferentzia globularraren eta Spray-aren arteko eskualdeetan. Beraz, doktore-tesi honetan eta etorkizuneko ikerketetan, GMAW teknologian oinarritutako WAAM fabrikazio-prozesuetan modu pultsatuak erabiltzea gomendatzen da beti, prozesuaren kontrol handiagoa lortu ahal izateko. Amaitzeko, GMAW pultsatua, oro har, hainbat materialetan WAAM fabrikaziorako modu egokiena da, aluminio-aleazioetan izan ezik.

- ❖ Bestalde, ezarpen-tasa baxuko Cold Arc moduak materiala zirkuitu laburren bidez transferitzen du eta bero-ekarpen baxuko prozesu bat lortzen du. Produktibitate arrazoiengatik, oso horma finak dituzten piezak egiteko baino ez da egokia.
- ❖ Force Arc estandar edo pultsatu moduak, bestalde, presio altuko arku voltaikoarekin ezarpen-tasa altuak behar diren kasuetarako erabiltzen dira. Hala, arkuaren direkzio-egonkortasun handia lortzen da eta penetrazioa sakona eta kontzentratua izaten da. GMAW estandar eta pultsatu moduetan bezala, kasu honetan ere, komeni da modu pultsatua erabiltzea, prozesuaren kontrol handiagoa izateko. Laburbilduz, Force Arc modua ez da egokia WAAM prozesurako, bero-ekarpen handiegia sortzen duelako. Hala, soldadura-prozesuetarako edo lehen geruzetan penetrazio altua behar den WAAM prozesuetarako soilik erabiliko litzateke.
- ❖ Azkenik, AC prozesu pultsatuan, intentsitate-seinaleak polaritate aldakorra du ezarpen-tasa altuekin. Prozesu hori aluminio-aleaziozko piezak eta soldadurak fabrikatzeko baino ez da egokia, lortzen dituen materialaren propietate egokiengatik (funtzionamendu-modu hau V. kapituluan xehetasunez aztertuko da).

- GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan, intentsitatea zuziaren eta piezaren arteko distantziaren bidez kontrola daiteke. Kontrol horri altuera kontrola deitzen zaio eta zehazki, ezarpen-prozesurako kontsigna intentsitate egokia izanda, intentsitate horri jarraitzeko robotaren altuera doitzen du.
- Kontrol horretan, ezarritako hariaren elikatze-abiaduraren eta Job-aren arabera, prozesuak eskatzen duen kontsigna intentsitatea kalkulatzen da eta robotaren altuera denbora errealean doitzen da intentsitate-balio hori izateko. Horretarako, kontrolean hainbat Job-entzako hariaren elikatze-abiadurak intentsitatearekin lotzen dituen ekuazioak sartu dira.
- Kontrolean ezarritako irabazia, hau da, Kp-a, kontrola instalatzen den makinaren erreaktibotasunera egokitu beharko da. Kasu honetan, robot

industrial antropomorfiko batentzat, kalkulatutako irabazia Kp = -0,3 izan da.

# *IV. KAPITULUA*

# IV. KAPITULUA: GMAW TEKNOLOGIAN OINARRITUTAKO WAAM PROZESUA: ER70S-6 ALTZAIRUA

## 1 Sarrera

Kapitulu honen helburu nagusia ER70S-6 altzairu gozorako GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua garatzea izan da. Alde batetik, kordoi sinpleak fabrikatuko dira GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren parametro nagusien eta altzairuetarako egokiak diren funtzionamendu-moduen (GMAW pultsatua, Cold Arc eta Force Arc) eragina aztertzeko. Bigarrenik, horma sinple bat metalurgikoki eta geometrikoki aztertuko da eta azkenik, oszilazio-estrategia eta gainjartze-estrategia alderatuko dira. Gainera, lortutako emaitzak balioztatzeko, WAAM teknologia eta aurreko kapituluan garatutako sistema robotikoa erabiliz material horretan bi balioztatze-pieza fabrikatuko dira.

## 2 Materialak eta metodoak

### 2.1 Materialak

Ezarpen material gisara 1,2 mm-ko diametroa duten hari metaliko komertzialak erabili dira ER70S-6 altzairu gozoan (EN ISO 14341-A - G 42 3 M21 3Si1) GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua erabiliz. Hornitzaileak emandako hariaren oinarrizko konposizioa IV-1. taulan ikus daiteke. Oinarri-material gisara, berriz, S235JR (DIN ST37-2) altzairuzko plaka lauak erabili dira, lodiera ezberdinetakoak egin beharreko esperimentazioaren arabera. Bestalde, lehengaiaren hornitzaileak emandako gomendioei jarraiki, esperimentazio osoan babes-gas bezala %20 $CO_2$ - %80 Ar nahastea erabili da 17 l/min-ko emariarekin.

*IV-1. taula. ER70S-6 altzairuzko hariaren konposizio kimikoa pisuan (%)*

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

Altzairu mota horiek, karbono gutxi dutenez, egokiak dira WAAM bidezko ezarpenerako eta gainera, kostu txikia dute. Zehazki, zenbat eta handiagoa izan manganeso (Mn) ehunekoa, orduan eta handiagoa da erresistentzia mekanikoa. Aldiz, silizioak (Si) ezkerrerantz mugiarazten du altzairuaren hozte-kurba, martensitaren eraketa zailduz. Gainera, silizioak antioxidatzaile lana ere egiten du, hau da, soldadura prozesuan oxigenoarekin erreakzionatzen du eta hau ez da altzairuan sartzen. Horrek silizio oxidozko geruza bat sortzen du ezarritako

materialaren gainazalean, herdoil-geruza izenekoa, eroalea ez dena eta horregatik soldadurako arkua pizteko arazoak sortzen dituena.

## 2.2 Ekipamendua

Kapitulu honetan egindako esperimentazio osoa III. kapituluan garatu eta zehaztu den sistema robotikoan burutu da.

## 2.3 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren parametro eta funtzionamendu-modu nagusien analisia: Kordoi sinpleak

Ezarpen-parametro nagusiek ezarpen prozesuan eta lortutako materialaren geometrian duten eragina ezagutzea oso garrantzitsua da, horri esker kordoi egokiak eta metalurgikoki zuzenak lor baitaitezke. Horregatik, atal honen helburu nagusia parametro nagusien eta funtzionamendu-modu ezberdinen eragina aztertzea da kordoi sinpleetan. Ezarpen-parametro nagusiak hariaren elikatze-abiadura, aitzinamendu-abiadura eta Stick-outa dira. Aldiz, altzairuentzako funtzionamendu-modu nagusiak GMAW pultsatua, Cold Arc eta Force Arc dira. ER70S-6 altzairuzko kordoi sinpleetan egindako esperimentazio guztia 10 mm-ko lodierako oinarri-materialetan egin da.

### 2.3.1 Intentsitate- eta tentsio-seinaleetan hariaren elikatze-abiaduraren (WFR) eta Stick-outaren eraginaren analisia

Hariaren elikatze-abiadura eta Stick-out delakoen eragina ikusteko, sei kordoi egin dira hiru funtzionamendu-modu nagusietako bakoitzarekin: GMAW pultsatua, Cold Arc eta Force Arc. Zehazki, 3 hariaren elikatze-abiadura maila eta 2 Stick-out maila aukeratu dira. Funtzionamendu-modu bakoitzerako hariaren elikatze-abiaduraren mugak ezberdinak direnez, muga horien barruan hiru maila aukeratu dira. Aitzinamendu-abiadura kordoi guztietan 650 mm/min izan da (IV-2. taula). Kordoiak 60 mm luzekoak izan dira. Kordoi horietan, aztertutako parametroekiko intentsitateak eta tentsioak duten bilakaera aztertu da.

*IV-2. taula. Hariaren elikatze-abiaduraren eragina ikusteko fabrikatutako soldadura-kordoien parametroak*

| Kordoi zenbakia | Funtzionamendu-modua | Job-a | WFR (m/min) | Stick-out (mm) |
|---|---|---|---|---|
| **1.1** | GMAW pultsatua | 9 | 4 | 15 |
| **1.2** | | | | 22 |
| **1.3** | GMAW pultsatua | 9 | 8 | 15 |
| **1.4** | | | | 22 |
| **1.5** | GMAW pultsatua | 9 | 16 | 15 |
| **1.6** | | | | 22 |
| **1.7** | Force Arc | 180 | 4 | 15 |
| **1.8** | | | | 22 |
| **1.9** | Force Arc | 180 | 8 | 15 |
| **1.10** | | | | 22 |
| **1.11** | Force Arc | 180 | 18 | 15 |
| **1.12** | | | | 22 |
| **1.13** | Cold Arc | 194 | 1 | 15 |
| **1.14** | | | | 22 |
| **1.15** | Cold Arc | 194 | 3 | 15 |
| **1.16** | | | | 22 |
| **1.17** | Cold Arc | 194 | 5 | 15 |
| **1.18** | | | | 22 |

### 2.3.2 Lortutako kordoien geometrian aitzinamendu-abiaduraren (TS) eraginaren analisia

Bestalde, GMAW pultsatu funtzionamendu-moduarekin aitzinamendu-abiaduraren eragina zehazteko kordoiak fabrikatu dira. Funtzionamendu-modu hori soilik aukeratu da, lortutako emaitzak beste funtzionamendu-moduetara estrapolatu daitezkeelako. Zehazki, 50 mm-ko kordoi bakarrak egin dira hiru hariaren elikatze-abiadura maila erabiliz (4, 8, 16 m/min). Stick-outa 15 mm-koa izan da eta kordoi bakoitza hiru aitzinamendu-abiadura ezberdinekin fabrikatu da (300, 650, 800 mm/min) sortutako efektua behatu ahal izateko. Kordoi horiek garatutako sistema robotikoaren zuzian instalatutako eskaner laserrarekin eskaneatu eta neurtu dira.

### 2.3.3 Penetrazioan, diluzioan, mikroegituran eta gogortasunean funtzionamendu-modu nagusien eraginaren analisia

Funtzionamendu-modu bakoitzak kordoien penetrazioan, diluzioan eta mikroegituran duen eragina zehazteko, kordoi sinpleak egin dira hiru funtzionamendu-modu nagusiekin (IV-3. taula). Horretarako, modu bakoitzaren mugen artean dauden bi hariaren elikatze-abiadura mailekin kordoiak fabrikatu dira. GMAW Pultsatu eta Force Arc moduetarako, aitzinamendu-abiadura 650 mm/min-koa izan da eta Cold Arc-erako, aldiz, 300 mm/min-koa. Stick-outa 15 mm-koa izan da kasu guztietan.

*IV-3. taula. Funtzionamendu-modu bakoitzaren mikroegitura, diluzioa eta penetrazioa aztertzeko egindako kordoien fabrikazio-parametroak*

| Kordoi zenbakia | Funtzionamendu -modua | Job-a | WFR (m/min) | TS (mm/min) | Stick-out (mm) |
|---|---|---|---|---|---|
| **3.1** | GMAW pultsatua | 9 | 8 | 650 | 15 |
| **3.2** | GMAW pultsatua | 9 | 16 | 650 | 15 |
| **3.3** | Force Arc | 180 | 8 | 650 | 15 |
| **3.4** | Force Arc | 180 | 16 | 650 | 15 |
| **3.5** | Cold Arc | 194 | 3 | 300 | 15 |
| **3.6** | Cold Arc | 194 | 5 | 300 | 15 |

## 2.4 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez fabrikatutako horma sinplearen analisia

Kordoi bakarreko horma bat fabrikatu da, lortutako makroegitura, mikroegitura eta gogortasunak aztertzeko. Horma honek 45 geruza ditu. Lehenengo bi geruzak 16 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin egin dira, hurrengo biak 12 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin, hurrengo biak 10 m/min-koarekin eta gainerakoak 8 m/min-koarekin. Izan ere, prozesuaren hasieran, oinarri-materiala hotza dago eta ondorioz, kordoi finagoak lortzen dira. Hori dela eta, lehen geruzetan material gehiago sartu behar da horma geometrikoki homogeneoa izateko. Oinarri-material gisara 10 mm-ko plaka lauak erabili dira, Stick-outa 15 mm-koa izan da, aitzinamendu-abiadura, berriz, 650 mm/min-koa eta geruzen artean 60 s itxaron dira.

## 2.5 Oszilazio- eta gainjartze-estrategien alderaketa GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan

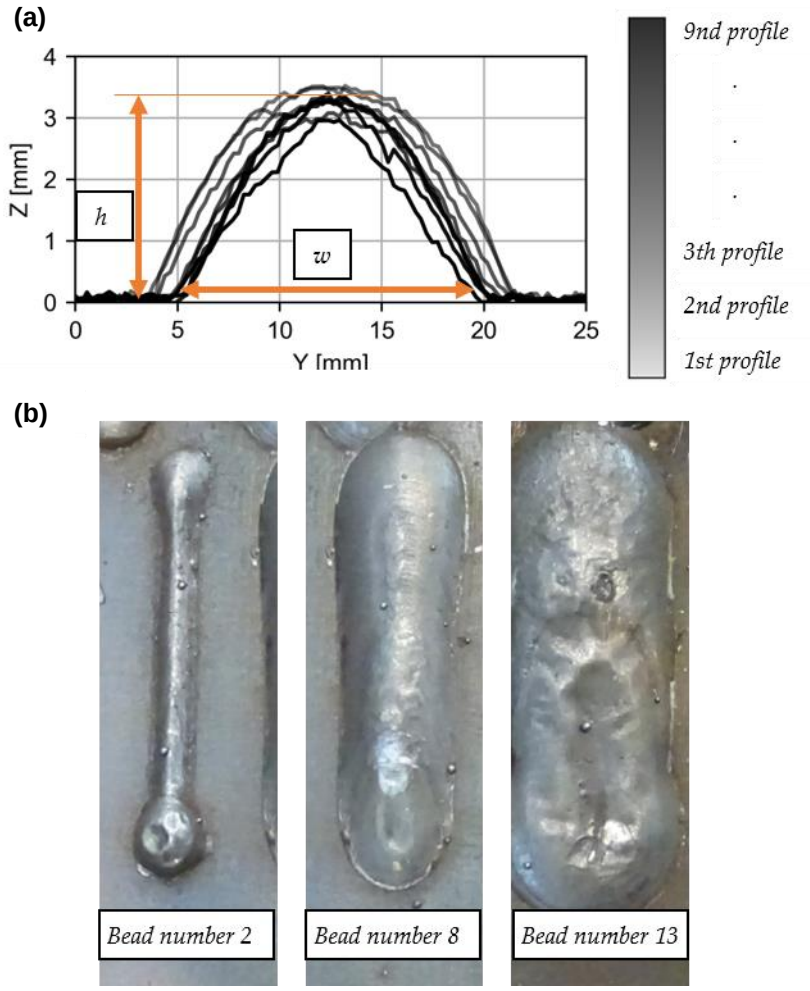
### 2.5.1 Parametroen aukeraketarako aurretiazko ikerketa

Aurretiazko ikerketa bat egiten da, pultsatutako GMAW funtzionamendu-modua erabiliz oszilazio- eta gainjartze-estrategiekin horma sinpleak fabrikatzeko prozesu-parametro optimoak hautatzeko. Horretarako, kordoi sinplez osatutako saiakuntza-sorta bat fabrikatu da eta kordoi horiek eskaner laserraren bidez eskaneatu dira. Aurretiazko ikerketa hori diseinatzeko, IV-4. taulan ikus daitekeen bezala, hariaren elikatze-abiadura posibleen artean 5 maila aukeratu dira eta faktorial oso bat egitea erabaki da hiru aitzinamendu-abiadura maila hautatuz. Gainjartze- eta oszilazio-estrategietan egindako esperimentazio guztia 8 mm-ko lodierako oinarri-materialetan egin da.

*IV-4. taula. ER70S-6 altzairuan oszilazio- eta gainjartze-estrategiak erabilita hormak fabrikatzeko parametroak hautatzeko entsegua*

| **Parametroak** | **Unitateak** | **Kodifikatutako balioa** | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | -2 | -1 | 0 | +1 | +2 |
| WFR | [m/min] | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 |
| TS | [mm/min] | | 300 | 650 | 1000 | |

Kordoiak fabrikatu ondoren, euren homogeneotasuna, jarraitutasuna eta forma geometrikoa aztertu dira. Forma geometrikoari dagokionez, kordoien zabalera eta altuera neurtzeko eskaner laserraren emaitzak erabili dira, hain zuzen ere, IV-1. irudikoak bezalako profilak.




*IV-1. irudia. (a) Eskaner laserraren bidez neurtutako 7. kordoiaren profilak, non kordoiaren altuera (h) eta zabalera (w) ikus daitezkeen; (b) 2, 8 eta 13. kordoien itxura*

Zehazki, eskaneatze bakoitzean laserrak neurtutako bederatzi profil eskuratu dira. Profil hauek kordoi bakoitzaren zeharkako geometria erreproduzitzen duen puntu-hodei bat sortzen dute (IV-1 a. irudia). Kordoien zabalera eta altuera profil horietako bakoitzean kalkulatzen dira eta balio horien batez bestekoak ($w_{avg}$ y $h_{avg}$) IV-5. taulan aurki daitezke. Gainera, IV-5. taulan, kordoien altuera eta zabaleren desbideratze estandarren alderantzizko biderkadurak ere ikus daitezke. Alderantzizko balio hauek ezaugarri geometriko (EG) bat dira. EGak kordoien homogeneotasun- eta jarraitutasun-maila adierazten du eta 3. ekuazioari jarraituki kalkulatzen da.

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

non,

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

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

Bestalde, IV-5. taulan ikus daitekeen bustidura angeluaren balioa 4. ekuazioari jarraituz kalkulatzen da:

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

*IV-5. taula. Neurtutako eta kalkulatutako kordoien geometria definitzeko balioak*

| Kordoi zenbakia | WFR | TS | $w_m$ (mm) | $h_m$ (mm) | EG | Bustidura angelua (º) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | -2 | -1 | 7,30 | 2,69 | 12,27 | 36,37 |
| 2 | -2 | 0 | 4,62 | 1,69 | 49,45 | 36,19 |
| 3 | -2 | +1 | Ez jarraia | | | |
| 4 | -1 | -1 | 11,28 | 2,91 | 8,23 | 27,29 |
| 5 | -1 | 0 | 7,96 | 2,41 | 18,14 | 31,15 |
| 6 | -1 | +1 | 4,43 | 2,18 | 34,32 | 44,59 |
| 7 | 0 | -1 | 15,26 | 2,98 | 8,22 | 21,34 |
| 8 | 0 | 0 | 7,88 | 2,25 | 63,50 | 29,73 |
| 9 | 0 | +1 | 5,52 | 1,95 | 15,65 | 35,21 |
| 10 | +1 | -1 | 15,05 | 3,39 | 29,40 | 24,25 |
| 11 | +1 | 0 | 8,73 | 2,93 | 11,21 | 33,89 |
| 12 | +1 | +1 | 7,69 | 2,63 | 25,51 | 34,39 |
| 13 | +2 | -1 | 17,21 | 4,19 | 6,86 | 25,94 |
| 14 | +2 | 0 | 10,88 | 3,24 | 27,58 | 30,78 |
| 15 | +2 | +1 | 8,38 | 2,60 | 10,33 | 31,86 |

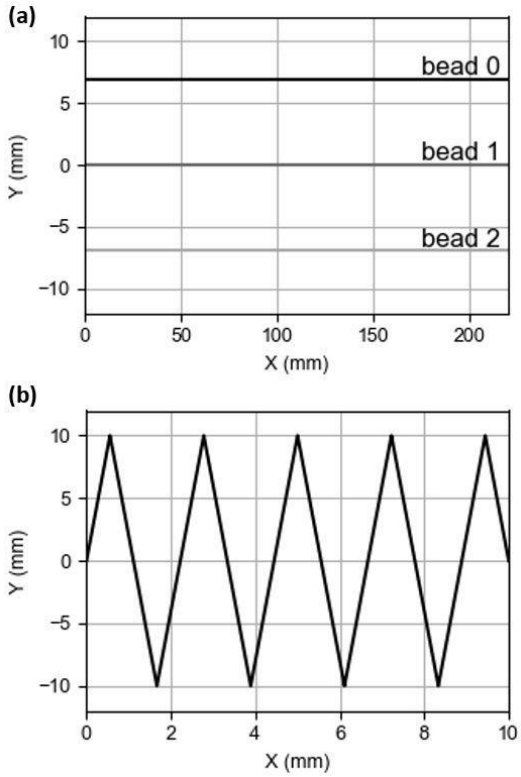
Fabrikatutako kordoi guztiak laserraren bidez neurtu ondoren, ezarpen-parametro optimoak zehaztu dira, gehieneko EG balioa eta bustidura angelu desiragarria kontuan hartuta [Dinovitzer, 2019]. Aurretiazko literaturan, fabrikazio-gehigarriko prozesuetarako bustidura angelua egokia 30º-koa dela

dokumentatu da. Beraz, 8. kordoian erabilitako parametroak gainjartze- eta oszilazio-estrategiekin hormak fabrikatzeko egokienak direla erabaki da.

### 2.5.2 Hormak fabrikatzeko parametroak

Horma oszilatua eta gainjarria GMAW pultsatu funtzionamendu-modua erabilita fabrikatu dira. Hormek l: 220 mm-ko luzera, w: 20 mm-ko zabalera eta z: 70 mm-ko altuera dituzte. Bi ezarpen-estrategia erabilita fabrikatu dira: 1. horma, estrategia gainjarriarekin eta 2. horma, estrategia oszilatuarekin. IV-2. irudiak aztertutako bi estrategietarako programatutako ibilbideak biltzen ditu. Bi kasuetan, txandakako geruzak kontrako norantzan ezarri dira zehaztasun geometrikoari eusteko eta Zhang et al.-ek [Zhang, 2002] euren horma angeluzuzenetan ikusitako efektua ekiditeko. Beste era batera esanda, bi norantzatako zuziaren mugimenduekin egin da ezarpena. 1. horman, hiru kordoi gainjarri dira geruza bakoitzean, kordoi zuzen bakar batekin ezinezkoa baita 20 mm-ko horma zabalerak lortzea. Kasu honetan, gainjartze distantzia kordoi bakarraren zabaleraren %65-ekoa izan da (6,9 mm). Bestalde, 2. horman, 1. hormaren zabalera bera lortzeko, mugimendu triangeluar oszilatzailedun estrategia bat egin da, 10 mm-ko zabalerakoa (erditik muturrera), soldadura pasoaren zabaleraren erdia balio duen erramintaren konpentsazio batekin eta 1,5 Hz-ko maiztasunarekin.

Bi hormetan, jarraian ezarritako kordoien artean, pirometroak 400 ºC-tik beherako tenperatura irakurri arteko itxaron-denbora bat ezarri da, pieza gehiegi ez berotzeko. Beraz, oszilazio-estrategian, geruza bakoitzean hozte-denbora bakarra izango da; gainjarritako horman, aldiz, geruza bakoitzeko hiru hozte-denbora izango dira. Bestalde, eskaner laserrari esker, bi geruzatik behin fabrikatutako hormak eskaneatu dira, hormen geometria irudikatzea posible eginez. Hala, posible izango da irudikapen horren arabera hurrengo geruzak bi estrategietan izango duen ibilbiderako Z posizioa langileak eskuz zehaztea.



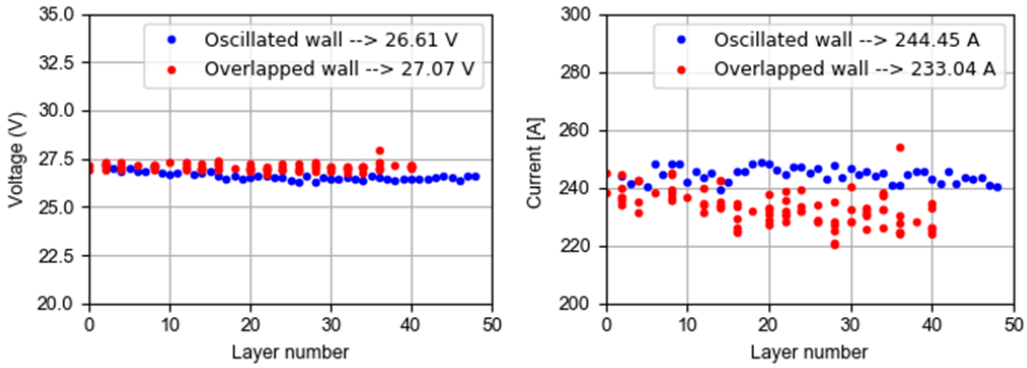

*IV-2. irudia. (a) Gainjartze-estrategiaren ibilbidea; (b) Oszilazio-estrategiaren ibilbidea*

Bi kasuetan, Stick-outaren luzera 15 mm-koa izan da. Gainera, ikerketa honetan prozesu egonkor bat lortu nahi izan denez, kordoien penetrazio egoki batekin, IV-6. taulan agertzen dira erabili diren bi hormen fabrikazio-parametro nagusiak. Parametro horiek parametroak hautatzeko egindako aurretiazko azterketaren bidez hautatu dira. Aukeratutako aitzinamendu-abiadurei dagokienez, ondorengo analisi zinetikoan ikus daitekeen bezala, bi hormetakoak alderagarriak dira. Ondorengo analisi horretan, helburu den hormaren X norabidean 200 mm estaltzeko egin beharreko ibilbidearen luzera bi hormetan alderatzen bada, zuziak 627,6 mm egiten ditu estrategia gainjarrian (3 x iraganaldi bakoitzeko 200 mm eta mugimendu inaktiboak) eta 200 mm oszilazio-estrategiaren kasuan. Erabilitako aitzinamendu-abiadurak kontuan hartzen baditugu (650 mm/min gainjarritako hormarako eta 200 mm/min oszilaturako) ezartze-denborak alderagarriak dira bi kasuetan (1 min).

*IV-6. taula. Horma oszilatuaren eta gainjarriaren fabrikazio-parametroak*

| Horma | WFR (m/min) | I (A) | V (V) | Kordoi bakarraren zabalera (mm) | TS (mm/min) | DR (kg/h) | T itxaron (ºC) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Gainjarria** | 8 | 229 | 27,1 | 8 | 650 | 4,26 | 400 |
| **Oszilatua** | 8 | 244 | 26,6 | 8 | 200 | 4,26 | 400 |

Gainera, IV-3. irudian bi hormetako geruza zenbakiaren araberako batez besteko intentsitate eta tentsio balioak erakusten dira. Bi estrategietan balio horiek alderagarriak direla ikusten da eta beraz, bi balio hauen produktuak definitzen duen hornitutako energia berdina izango da bi kasuetan.

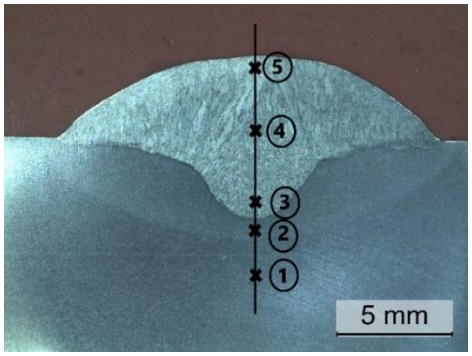



*IV-3. irudia. Bi fabrikazio-estrategietan geruza bakoitzeko bataz besteko intentsitate eta tentsio balioak*

## 2.6 Karakterizazio metalurgiko eta mekanikorako metodoak

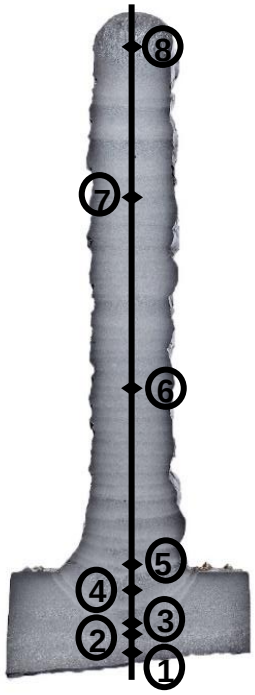
Bai kordoien eta bai hormen analisi metalografikorako, laginak, hurrenez hurren, zerra metaliko batekin ebaki, mekanikoki leundu eta %2-ko Nital soluzio batekin (azido nitrikoa eta etanola) errebelatu dira. Laginak prestatu ondoren, mikroegiturak eta makroegiturak Eclipse MA200 mikroskopioarekin (Nikon Metrology Inc, Belgika) behatu dira. Vickers gogortasunaren neurketak, aldiz, giro-tenperaturan egin dira Duramin A-300 (Struers, Danimarka) makina erabiliz, ISO 6507-1 [UNE- en ISO 6507-1] arauaren arabera.

Kordoien makroegitura, mikroegitura eta gogortasunak neurtzeko, horiek erdialdean zeharka moztu dira. Zehazki, IV-4. irudian ikus daitezkeen puntuetan mikroegiturari begiratu zaio eta gogortasunak neurtu dira.




*IV-4. irudia. Kordoi baten makrografia, gogortasunak neurtzeko eta mikroegitura behatzeko puntuak adierazita*

Horma sinplearen mikroegiturei eta gogortasunen neurketei dagokienez, hau ere zeharka moztu da eta gogortasunak neurtu eta mikroegitura behatu da, IV-5. irudian adierazitako puntuetan.

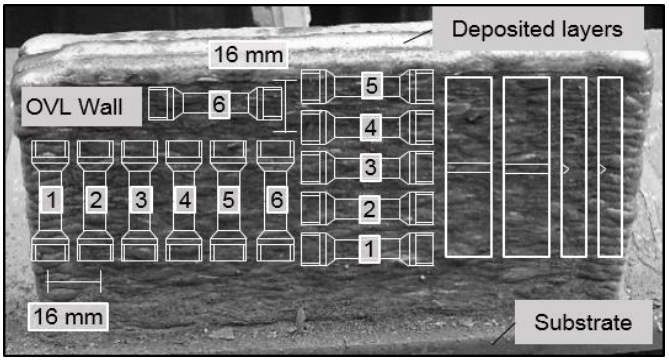



*IV-5. irudia. Horma sinplearen makrografia, gogortasunak neurtzeko eta mikroegitura behatzeko puntuak adierazita*

Azkenik, horma oszilatu eta gainjarriei dagokienez, mikrografiak eta Vickers gogortasunak zeharkako aurpegian neurtu dira, hormen erdialdean, hiru altueratan: goiko aldea, erdikoa eta behekoa. Gainera, horma hauetatik ateratako probetekin saiakuntza mekanikoak egin dira: trakzio-saiakuntza eta Charpy entsegua. IV-6. irudian ikusten denez, bi hormetan norabide bertikalean sei trakzio-probeta, norabide horizontalean sei trakzio-probeta eta Charpy

entsegurako lau probeta atera dira. Probeten antolamendu honekin probeten norabideak materialaren portaera mekanikoan duen eragina aztertu nahi izan da.

Trakzio-probeten neurriak ISO 6892-1 [UNE- en ISO 6507-1] arauaren araberakoak dira, 4 mm-ko diametro estuarekin, 22 mm-ko luzerarekin eta muturretan M-6ko hariak dituztelarik. Giro-tenperaturan, trakzio uniaxialeko saiakuntzak Instron 5585H makinan (Instron, Estatu Batuak) egiten dira. Makina honek gehienez 100 kN-ko karga du eta ukipen-estentsometro batez (Instron EX2620-602, Instron, Estatu Batuak) hornituta dago. Charpy entseguak, giro-tenperaturan, inpaktua probatzeko pendulu bat duen Ibertest PIB300 makinan (Ibertest, Espainia) egiten dira. Charpy entsegu probetak ISO 148-1 [UNE-EN ISO 148-1] arauak dioen bezala, 55 mm luze eta 10 mm lodi izan dira.




*IV-6. irudia. Horma oszilatuan eta gainjarrian propietate mekanikoak neurtzeko probeten banaketa*

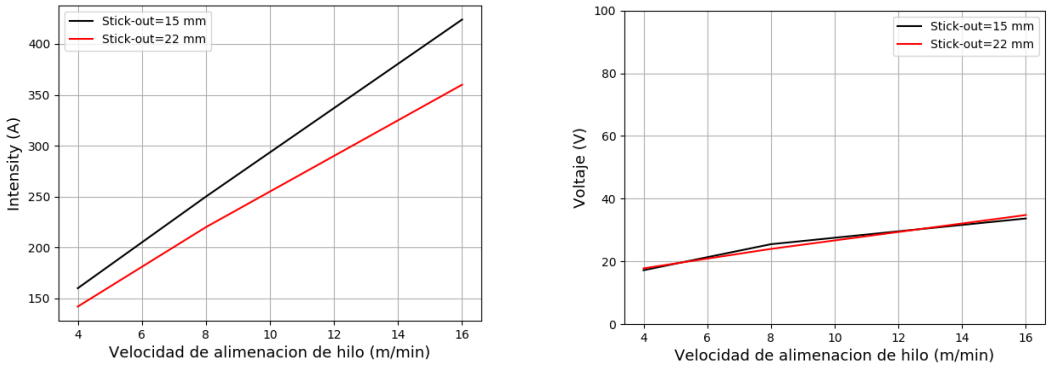
# 3 Emaitzak eta eztabaida

## 3.1 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren parametro eta funtzionamendu-modu nagusien analisia: Kordoi sinpleak

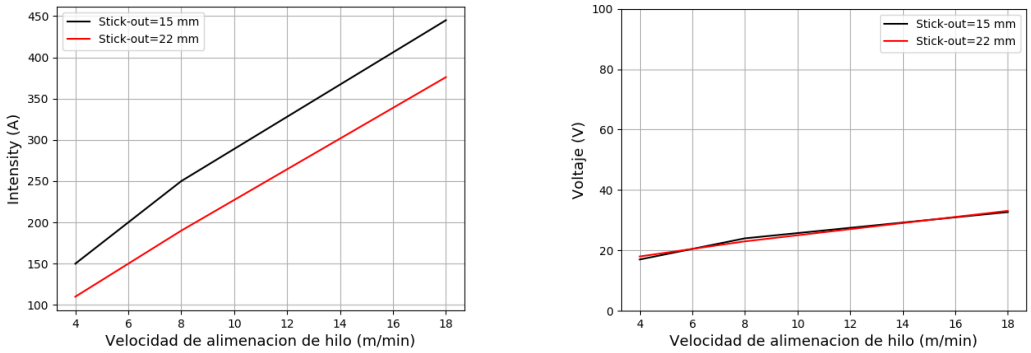
### 3.1.1 Intentsitate- eta tentsio-seinaleetan hariaren elikatze-abiaduraren (WFR) eta Stick-outaren eraginaren analisia

IV-7. irudian, hariaren elikatze-abiaduraren arabera kordoi horien fabrikazioan lortutako batez besteko intentsitate eta tentsioaren bilakaera ikusten da. III. kapituluan teorikoki planteatu den bezala, erabilitako soldadura-iturri sinergikoa denez, hariaren elikatze-abiaduraren eta aukeratutako funtzionamendu-moduaren arabera soldadura-iturriak automatikoki sortzen du harian aplikatu beharreko intentsitate-seinalearen forma. Hala, batez besteko intentsitatearen balioa linealki handitzen da sartutako material-kopuruaren (WFR) arabera eta aldiz, bataz besteko tentsioa pixka bat handitzen da, baina balio konstante batetik

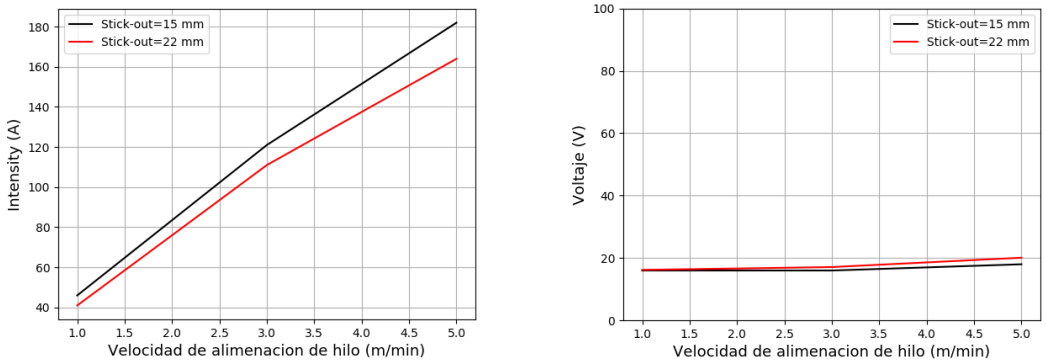
gertu dago. Stick-outari dagokionez, soldadura-iturri sinergikoa izan arren, batez besteko intentsitatearen balioari eragiten diola ikus daiteke. Stick-outa zenbat eta handiagoa izan, intentsitatea orduan eta txikiagoa da. Tentsioa, aldiz, konstante mantentzen da Stick-outaren aldaketen aurrean. Honek guztiak, esperimentalki, sistema sinergikoen funtzionamendua berresten du eta altuera kontrola garatzeko III. kapituluan zehatz-mehatz aztertutako Stick-outaren eragina ere erakusten du.




**(a)**




**(b)**




**(c)**

*IV-7. irudia. Hariaren elikatze-abiaduraren eragina intentsitatearen eta tentsioaren batez besteko balioetan a) GMAW pultsatu moduan, b) Force Arc moduan eta c) Cold Arc moduan*

Lan egiteko moduei dagokienez, ikusten da Cold Arc moduak, beste bi funtzionamendu-moduekin alderatuta, hariaren elikatze-abiadura txikiagoak onartzen dituela eta beraz, lortutako intentsitate balioak ere txikiagoak direla.

### 3.1.2 Lortutako kordoien geometrian aitzinamendu-abiaduraren (TS) eraginaren analisia

Aitzinamendu-abiaduren eragina zehazteko, IV-7. taulan GMAW pultsatu moduan fabrikatutako kordoien parametroak ikus daitezke. Hauetan berebiziko garrantzia du luzera-unitateko hornitutako energia instantaneoak, zeinak intentsitatea, tentsioa eta aitzinamendu-abiadura erlazionatzen baititu, 5. ekuazioaren arabera.

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

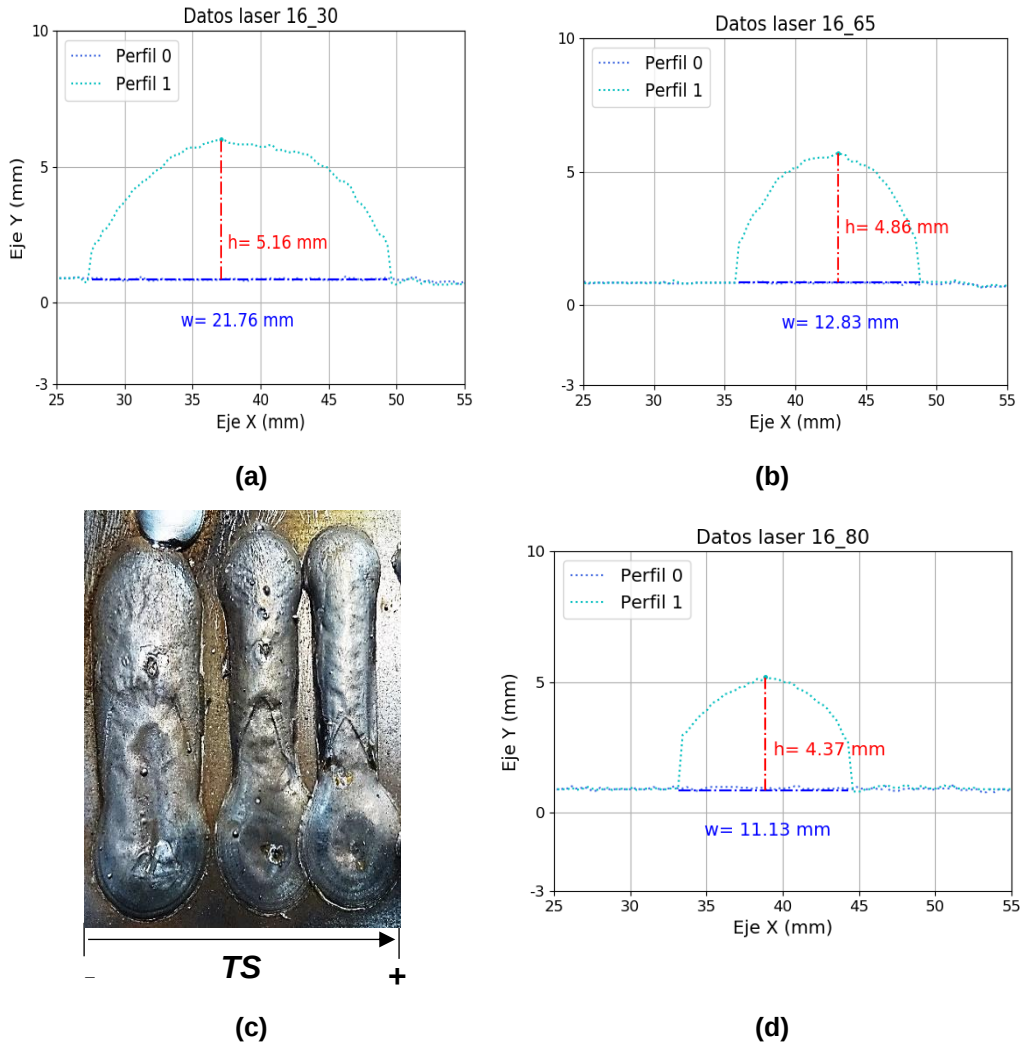
Alde batetik, IV-7. taulan ikus daitekeen bezala, ikusi da hariaren elikatze-abiadura handitzean, aitzinamendu-abiadura bererako, luzera-unitate bakoitzeko hornitutako energia handiagoa dela. Hori gertatzen da hariaren elikatze-abiadura handitzean intentsitatea linealki hazten delako, IV-7. irudian ikusi den bezala.

*IV-7. taula. Aitzinamendu-abiaduraren eragina zehazteko kordoiak fabrikatzeko erabilitako parametroak eta eskaner laserraren bidez neurtutako kordoien zabalera eta altuera balioak*

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

Bestalde, hariaren elikatze-abiadura berarekin, aitzinamendu-abiadura aldatzean, ez dago inolako eraginik intentsitatean, baina bai lortutako kordoiaren forman (zabalera eta altuera). Hau gertatzen da luzera-unitateko ezarritako material kopurua ezberdina delako eta hornitutako energia ere ez delako berdina (IV-7. taula). IV-8. irudian ikus daitekeenez, bertan ageri diren kordoi guztiak 16 m/min-ko hariaren elikatze-abiadura erabiliz fabrikatu dira, baina eskaner

laserrarekin eskuratutako datuak aztertuta, ondorioztatu da zenbat eta aitzinamendu-abiadura handiagoak izan orduan eta kordoi estuagoak lortzen direla, material gutxiago uzten baita luzera-unitate bakoitzeko. IV-8 a. irudian, aitzinamendu-abiadura 300 mm/min-koa da eta kordoia, berriz, zabalena. IV-8 b. irudian, aitzinamendu-abiadura 650 mm/min-koa da eta kordoia estuagoa da. Azkenik, IV-8 d. irudian, kordoia 800 mm/min-ra egina dago eta zabalerarik txikienekoa da. Laburbilduz, aitzinamendu-abiadurak ez die eragiten prozesuan sartutako intentsitateari eta tentsioari, baina bai luzera-unitate bakoitzeko hornitutako energia instantaneoari eta lortutako kordoien formari.




*IV-8. irudia. (a) 2.7 kordoiaren laser bidez eskuratutako puntu-hodeiaren irudikapen grafikoa; (b) 2.8 kordoiaren laser bidez eskuratutako puntu-hodeiaren irudikapen grafikoa; (c) 16 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin fabrikatutako soldadura-kordoiak (2.7, 2.8 eta 2.9 kordoiak) eta (d) 2.9 kordoiaren laser bidez eskuratutako puntu-hodeiaren irudikapen grafikoa*

### 3.1.3 Penetrazioan, diluzioan, mikroegituran eta gogortasunean funtzionamendu-modu nagusien eraginaren analisia

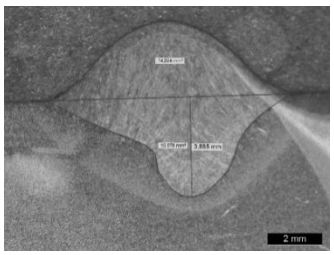
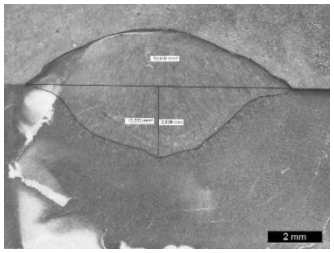
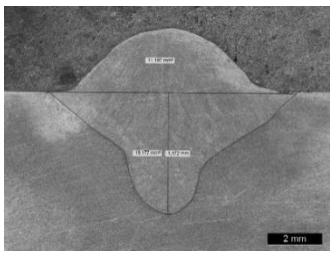
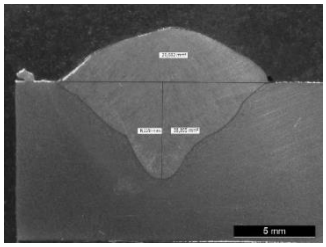
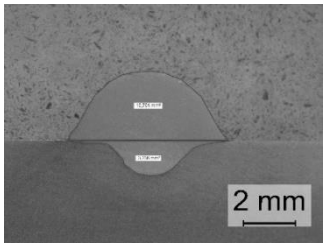
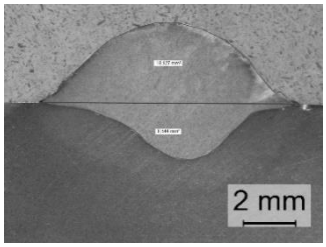
#### a) Diluzioa eta penetrazioa

Hiru funtzionamendu-modu nagusiekin kordoiak fabrikatu dira, modu bakoitzaren mugen arteko bi hariaren elikatze-abiadura aukeratuta. IV-8. taulan kordoien zeharkako makrografiak ikusten dira, non diluzioaren forma, diluzioaren ehunekoa eta penetrazioa ikus daitezkeen.

Diluzioa honela kalkulatzen da: oinarri-materialaren azpitik dagoen materialaren azaleraren ehunekoa, hau da, oinarri-materialean sartu den materialaren azaleraren ehunekoa, ezarritako materialaren azalera osotik (Ec. 6).

$$Diluzioa = \frac{A_{ezarria} - A_{penetratua}}{A_{ezarria}} * 100 \quad (6)$$

*IV-8. taula. Kordoien zeharkako makrografiak, diluzioa eta kordoien penetrazioa neurtuta funtzionamendu-moduaren eragina ikusteko*

| Kordoi zenbakia | Funtzionamendu-modua | Diluzioaren forma | Diluzioa (%) | Penetrazioa (mm) |
|---|---|---|---|---|
| **3.1** | **GMAW pultsatua** |  | 51,46 | 3,68 |
| **3.2** | |  | 50,30 | 5,27 |
| **3.3** | **Force Arc** |  | 63,14 | 4,47 |
| **3.4** | |  | 57,17 | 6,02 |
| **3.5** | **Cold Arc** |  | 23,12 | 1,30 |
| **3.6** | |  | 32,03 | 2,13 |

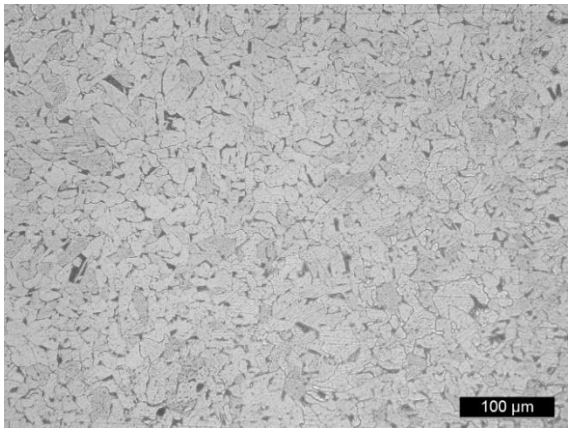
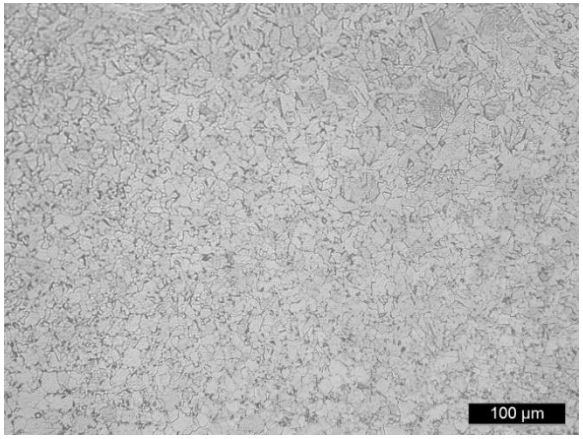
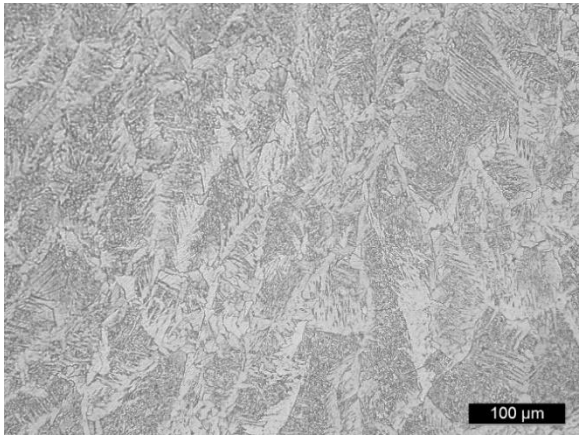
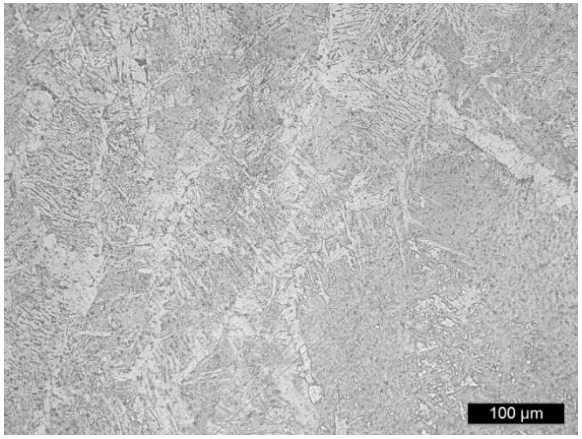
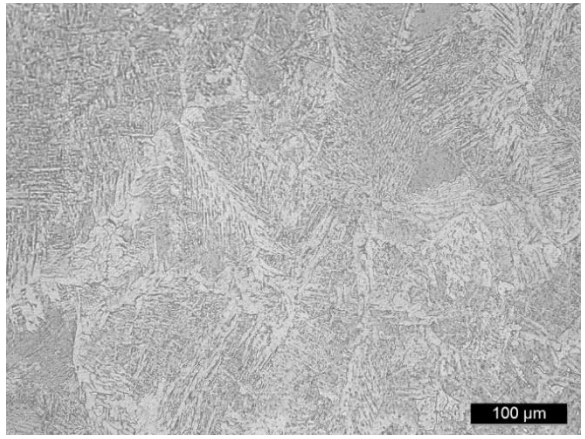
Aurreko datuetatik ondoriozta daiteke, pultsatutako GMAW moduarekin alderatuta, Force Arc moduak sakonera handieneko aztarnak lortzen dituela presio altuko arku elektrikoari esker. Hala, Force Arc moduan, arkuaren direkzio-egonkortasun handia lortzen da eta penetrazioa sakona eta kontzentratua izaten da. Horregatik, diluzioa ere handiagoa da. Cold Arc moduan, berriz, kontrakoa gertatzen da, ezarpen-tasa baxuek eta bero-ekarpen mugatuak penetrazio ez sakonak eta diluzio txikiak sortzen dituzte. Hori gertatzearen beste arrazoi bat, halaber, Cold Arc kordoietan ezarritako material kopurua (WFR) txikiagoa dela da, funtzionamendu-modu honetan hariaren elikatze-abiaduraren mugak txikiagoak baitira. Hala ere, ondoriozta daiteke Cold Arc funtzionamendu-moduak lan egin dezakeen hariaren elikatze-abiaduren mugen barruan ere, beste bi moduetan baino penetrazio eta diluzio balio txikiagoak lortzen direla.

Ondorioz, aurreko kapituluan aipatu den bezala, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesurako ez da gomendatzen lehen geruzatik harago Force Arc modua erabiltzea, presio handiko arku elektrikoarekin gehiegizko penetrazioak lortzen baitira eta piezaren kolapsoa ekar baitezake.

**b) Mikroegitura eta gogortasunak**

Lortutako kordoien mikroegiturari dagokionez, kordoi bakoitzean altuera desberdinetan dauden 5 puntutan (IV-4. irudian bost puntu horien definizioa ageri da) atera dira mikrografiak. Gainera, puntu berdinetan neurtu dira gogortasunak. IV-9. taulan 3.1 kordoiaren mikrografiak ikus daitezke. Hala ere, esperimentazio honetan funtzionamendu-modu ezberdinekin egindako kordoi guztietan emaitza antzekoak lortu dira.

*IV-9.taula. 3.1 kordoiaren mikrografiak, IV-4. irudian definitutako bost puntuetan eta puntu horiei dagozkien gogortasun balioak*

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

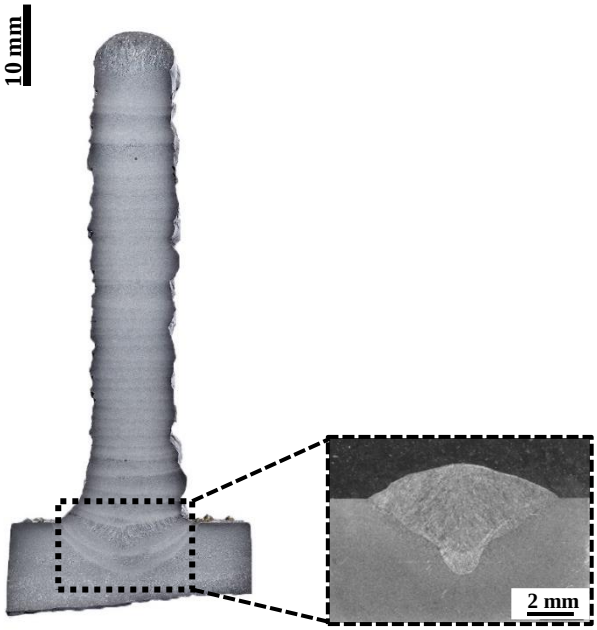
Lehen puntua oinarri-materialean dago eta ikus daitekeenez, ale poligonal ekiaxialen mikroegitura bat du, kordoiaren ezarpenak aldatu ez duena. Bigarren puntua oinarri-materialaren eremu termikoki kaltetuan dago (Heat Affected Zone, HAZ) eta ale poligonaleko mikroegitura du. Hala ere, kordoia ezartzean sortutako beroaren ondorioz ale tamaina lehenengo puntukoa baino txikiagoa da. Aldiz, 3., 4. eta 5. puntuetan, kordoiaren barruan daudenetan, ferrita azikularreko mikroegitura ikusten da. Mikroegitura hau oso ohikoa da altzairu gozoen soldadura-kordoietan, soldadura prozesuak sortzen dituen hozte abiadura handien ondorioz [Babu, 2004]. Gogortasunari dagokionez, ferrita azikularra duten kordoiaren puntuetan gogortasun balioak egitura poligonala duen oinarri-materialean baino handiagoak dira. Gainera, HAZ zonaldeko gogortasun balioak lehen puntukoak baino pixka bat handiagoak dira. Izan ere, bi eremuetan mikroegitura poligonala eduki arren, ale-tamaina txikiagoa da termikoki kaltetutako eremuan.

## 3.2 GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez fabrikatutako horma sinple baten analisia

### 3.2.1 Makrogituraren analisia

IV-9. irudian horma sinplearen makrografia ikus daiteke. Bertan, hormaren erdialdean, mikroegitura komun bat ikusten da eta desberdintasunak, berriz, goiko eta beheko zonaldeetan. Hormaren behealdean, lehen kordoia oinarri-materialean sartzen dela ikus daiteke ferrita azikularrezko egitura bat osatuz eta horren azpian, HAZa dago zirkuluerdi bat eratuz (kordoi bakarreko mikroegituren emaitza berdinak IV-9. taulan).

Hala ere, horma hazi ahala, ez da ferrita azikularraren egiturarik ikusten, ezarritako kordoiek ziklo termikoak jasaten baitituzte hurrengo kordoia ezartzean hornitutako beroaren ondorioz. Azkenik, hormaren goiko aldean, ezarritako azken kordoian, aurrez izendatutako ferrita azikularraren mikroegitura ikusten da berriro ere, kordoi honek ez baitu mikroegitura eraldatzeko behar den bero-ekarpena gehituko dion ondorengo kordoirik.

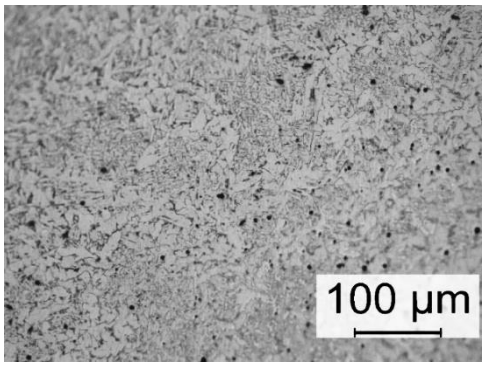



*IV-9. irudia. Horma sinplearen makrografia eta ezarritako lehen kordoiaren xehetasuna*

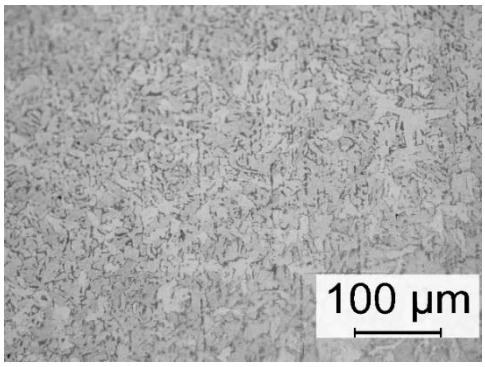
Bestalde, ez da ikusten erabilitako teknologiak sor litzakeen ohiko barneko akats makroskopikorik, hala nola, inklusiorik, pororik edo betetze-faltarik. Horrek esan nahi du fabrikatutako hormak egitura-osasun onargarria duela.

### 3.2.2 Mikroegituraren analisia

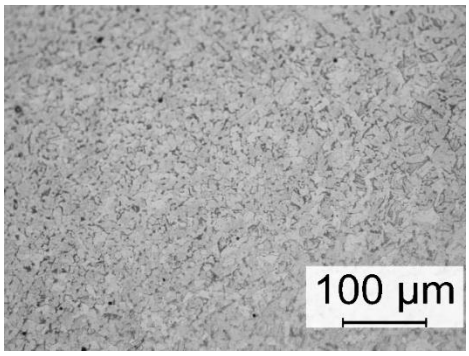
Fabrikatutako horma sinplearen mikroegitura zehatz-mehatz aztertzeko, 8 altueratan atera dira mikrografiak (IV-5. irudian zehazten den bezala). Mikrografia horiek IV-10. irudian daude ikusgai. Lehenengo puntua oinarri-materialean dago eta bigarrena, berriz, termikoki kaltetutako zonaldean. Bi puntu hauetan, ale poligonaldun mikroegitura ikus daitekeen. Hirugarren puntua, aldiz, lehen kordoiaren barnean dago eta ferrita poligonalaren egitura du baita. Laugarren puntuan, bigarren kordoiaren eta hirugarrenaren interfasean sortzen den ferrita azikularrezko mikroegitura aurkitzen da, eremu horri hurrengo kordoiak hornitutako beroa iristen ez zaiolarik. Hormaren gainontzeko puntuetan (5., 6. eta 7. puntuetan) ale poligonala lortzen da, horma osoan zehar hurrengo geruzak ezartzearen ondorio materiala termikoki kaltetzen baita. Azkenik, 8. puntuak ferrita azikularrezko egitura du, azken geruza denez ez duelako ondorengo geruzen ezarpenak sortutako bero-ekarpenik jasaten.



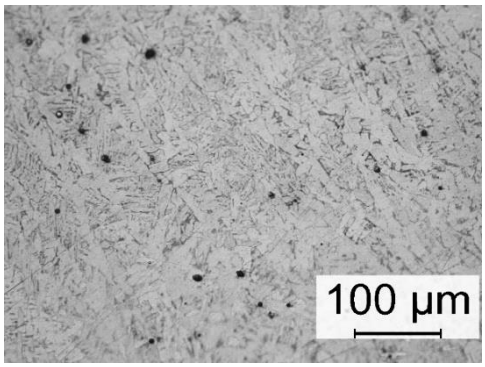

**(1)**



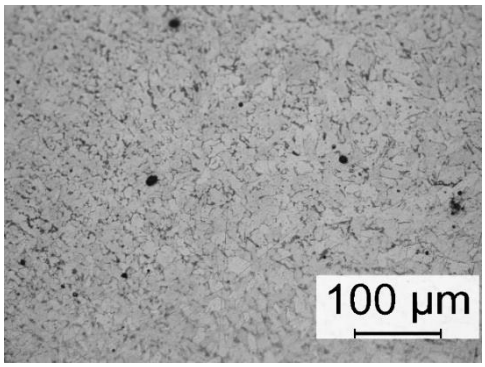

**(2)**



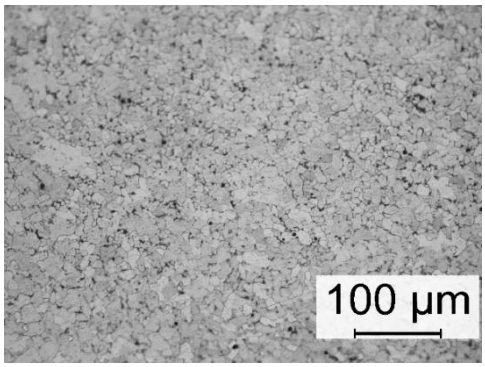

**(3)**



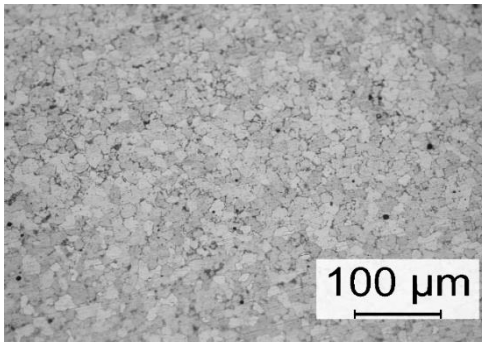

**(4)**



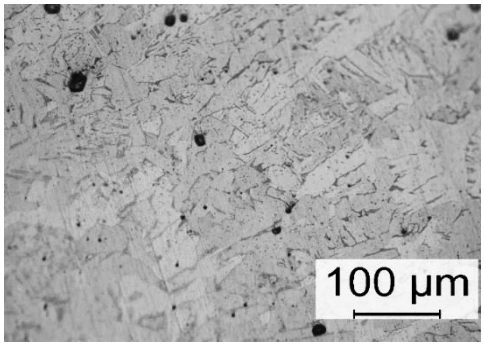

**(5)**




**(6)**




**(7)**



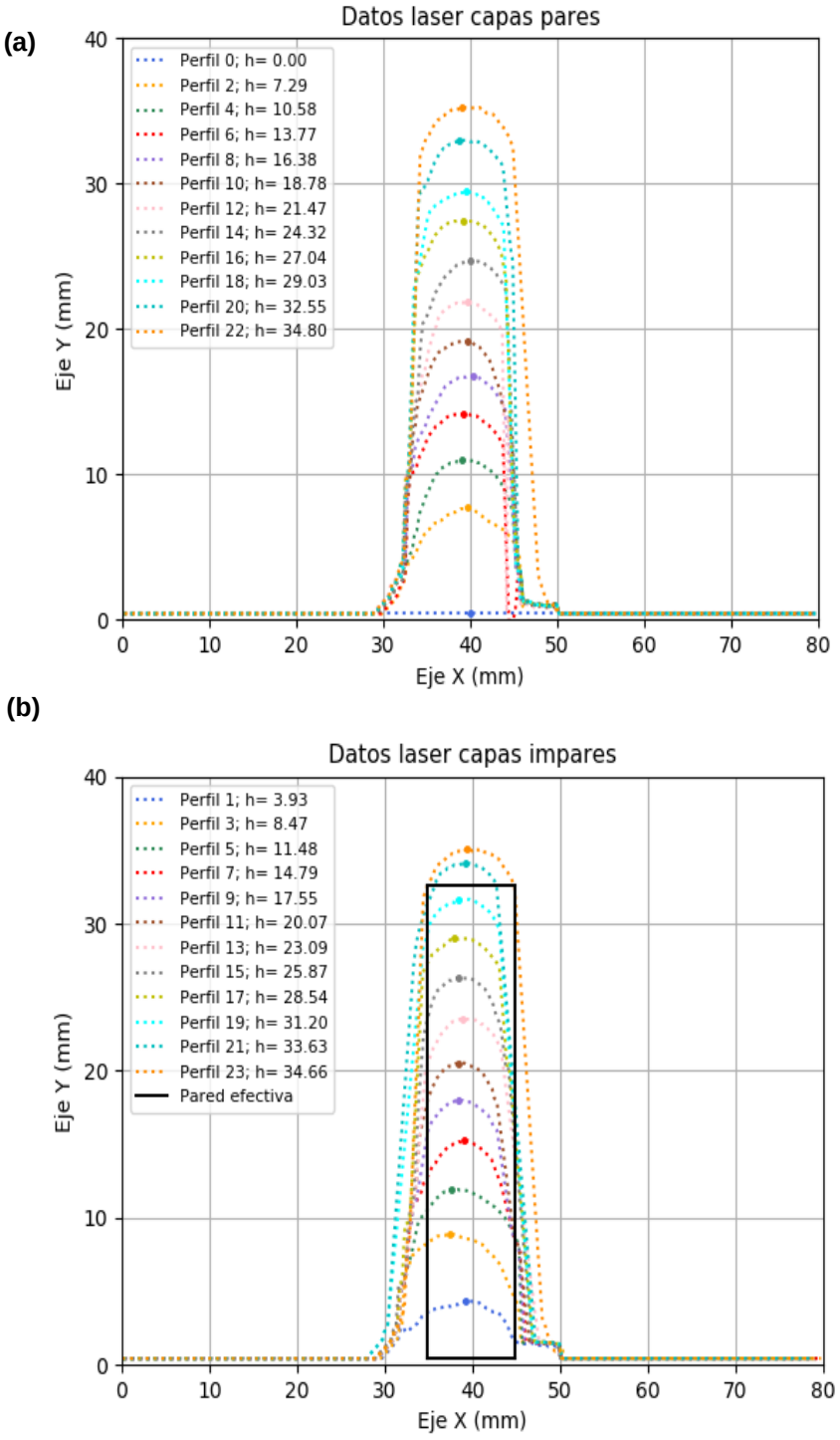

**(8)**

*IV-10. irudia. IV-5. irudian adierazitako horma sinpleko puntuetako mikroegiturak*

### 3.2.3 Geometriaren analisia

Hormen fabrikazioan zehar, kordoi bakoitzaren ezarpenaren ondoren, horma eskaner laserraren bidez eskaneatu da behin eta berriz, hormaren forma geometrikoari buruzko informazioa duen puntu hodei bat lortuz.

Informazio horri esker, puntu-hodei horiek grafikatu eta hormaren zabalera eta altuera kalkulatu dira kordoi bakoitzaren ezarpenaren ondoren. Gainera, hormaren zabalera eta altuera efektiboa ere lortu dira. Horma efektiboa nahi den aplikazioan erabili ahal izateko, WAAM bidez fabrikatutako horma originala mekanizatu ondoren izango den hormari deitzen zaio. Horma efektiboaren forma geometrikoa ezagutzea oso garrantzitsua da, WAAM bidez fabrikatutako piezek daukaten aplikaziorako behar geometrikoak beteko dituzten aurreikusteko. Hau da, WAAM bidez fabrikatu beharreko piezaren neurriak ezagutu ahal izango dira, mekanizatu ondoren lortuko dugun piezak ditugun behar geometrikoak beteko dituela ziurtatuz. Adibide gisara, IV-11. irudian, horma sinplea fabrikatzeko orduan ezarri diren lehen 22 kordoi bikoitien (IV-11 a. irudia) eta bakoitien (IV-11 b. irudia) forma geometrikoak ikus daitezke. Gainera, grafiko horietan, kordoi bakoitzarekin hormak hartu dituen altuerak zehazten dira. Azkenik, IV-11 b. irudian, 10,21 x 32,17 mm-ko neurriak dituen horma efektiboa ere irudikatu da. Horrela, frogatu da eskaner laserrak, ezarritako materialaren geometria monitorizatzen laguntzeaz gain eta langileari geruzako hazkundea definitzeko aukera emateaz gain, orain arte ezarritakoa ikusi ondoren, lortzen den horma efektiboa definitzen ere laguntzen duela.

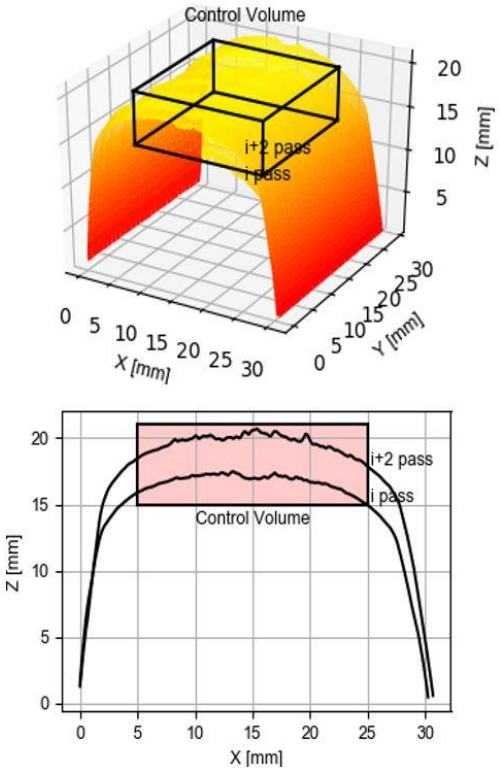



*IV-11. irudia (a) Kordoi bikoitien ezarpenaren ondoren laser bidez lortutako puntu-hodeien irudikapen grafikoa; (b) kordoi bakoitien ezarpenaren ondoren laser bidez lortutako puntu-hodeien irudikapen grafikoa eta lortutako horma efektiboa (beltzez)*

## 3.3 Oszilazio- eta gainjartze-estrategien alderaketa GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan

### 3.3.1 Materialaren ezarpena eta geruzako hazkundea

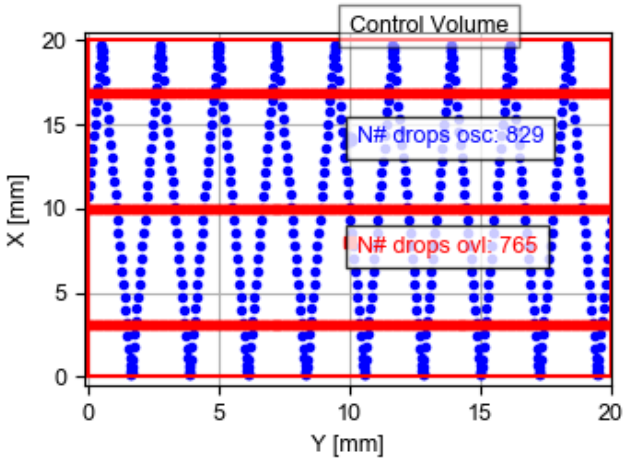
Oszilazio- eta gainjartze-estrategietan, materialaren ezarpena eta geruzako hazkundea aztertzeko, hiru dimentsioko kontrol-bolumena (Δx, Δy, Δz) definitu da bi hormetan, IV-12. irudian ikus daitekeen bezala. Oro har, kontrol-bolumen hori bolumenaren mende dauden parametroak, hala nola, materialaren ezarpena eta bero-ekarpena alderagarriak egiteko beharrezkoa den erreferentzia-bolumena da. Oraingo eta etorkizuneko ikerketa-lerroetan kontrol-bolumenaren kontzeptua erabiltzea gomendatzen da emaitza alderagarriak izateko. Kasu honetan, kontuan hartuta geometrikoki helburu-hormatik (hormaren zabalera 20 mm eta altuera 70 mm) ahalik eta gertuen dauden hormak lortu nahi direla, bi hormetako definitutako kontrol-bolumenak 20 mm zabal (Δx) eta 20 mm luze (Δy) den eremu batean ezarritako material guztia hartzen du barnean. Kontrol-bolumenaren altuera, berriz, ondoz ondoko bi geruzaren altueraren baliokidea litzateke, laserrak bi geruzatik behin eskaneatzen baitu.




*IV-12. irudia. Kontrol-bolumenaren definizioa*

Kontrol-bolumeneko materialaren ezarpenari dagokionez, bi estrategien materialaren ezarpena IV-13. irudian aurkezten da. Lehen aipatu bezala,

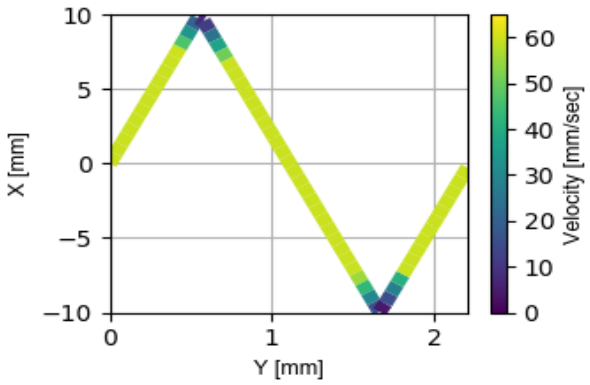
intentsitate pultsu unitarioko bakoitzean, GMAW prozesu sinergikoen barneko GMAW pultsatu funtzionamendu-moduak, tanta urtu ia berdin bat askatzen du haritik bainu urtura, III-6. irudian adierazten den bezala. Alderatzen hari diren bi hormetan erabilitako hariaren elikatze-abiadura berdina denez, tanta bakoitzeko material kantitatea ere berdina da.




*IV-13. irudia. Kontrol-bolumenaren barnean, horma oszilatuaren eta gainjarriaren fabrikazioan zuziak jarraitutako ibilbidea eta tanten ezarpena*

Hala ere, kontrol bolumenaren barruan, horma oszilatuan ezarritako tanta kopurua handiagoa da horma gainjarrian baino: 829 eta 765 tanta, hurrenez hurren.

Fabrikatutako hormetan beroaren horniduraren efektua zehazteko eta materialaren ezarpena kalkulatzeko, garrantzitsua da, lehenik eta behin, prozesuaren zinetika ulertzea. Horma gainjarriaren kasuan, soldadura-zuziaren aitzinamendu-abiadura konstantea da ibilbide osoan zehar eta beraz, ezarpena uniformea da. Bestalde, IV-14. irudian zuziak horma oszilatuan egindako ibilbidearen ziklo bat eta haren aitzinamendu-abiadura banaketa erakusten dira. Kasu honetan, abiadura txikiagoa da alboetan erdialdean baino, ertzetan baliogabetzen delarik, norabide-aldaketaren ondorioz. Beraz, materialaren ezarpena ibilbide osoan zehar ez da uniformea, tanta gehiago uzten baitira izkinetan erdialdean baino abiadura-eremua dela eta.




*IV-14. irudia. Zuziaren ibilbidea eta abiadura-eremua horma oszilatuaren fabrikazioan*

Aurreratutako milimetro bakoitzeko tanta kopurua kalkulatzeko, nahikoa izango litzateke abiadura instantaneoaren eta x eta y norabideetan egindako aurrerapenaren biderkadura integratzea. Horma gainjarriaren kasuan, kontuan hartu behar da hiru soldadura-kordoi gainjarri behar direla horma oszilatuaren zabalera bera lortzeko eta abiadura instantaneoa konstantea eta aitzinamendu-abiaduraren berdina dela (7. ekuazioa). Oszilazio bidez egindako hormaren kasuan, kontrolean erregistratutako zuziaren posizioaren (V (x, y)) araberako abiadura instantaneotik abiatuta, berau aurrerapen diferentzialekin eta maiztasunarekin biderkatzen da. Bi kasuetan, tantak uzteko maiztasuna hautatutako funtzionamendu-modurako soldadura-iturriak programatutako balioek ematen dute (f = 138,2 tanta/s). 8.ekuazioan, integrala kalkulatzeko, abiadura instantaneoaren eta monitorizazio-sistemaren bidez erregistratutako posizioen biderkaduren batura hartu da oinarri.

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

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

IV-10. taulan, bi estrategietan aurreratutako milimetro bakoitzeko ezarritako tanta-kopuruaren alderaketa erakusten da. Oszilazio mugimenduaren kasuan, aurreratutako mm bakoitzeko tanta gehiago ezartzen dira eta ibilbidearen arabera banaketa homogeneoagoa da.

Ezarritako materialaren bolumena ($V_{ezarri}$) 9. ekuazioa erabilita kalkula daiteke non DR ezarpen-tasa den, WFR hariaren elikatze-abiadura eta A hariaren zeharkako azalera. Lehen ikusi bezala, kontrol bolumenaren barruko tanta kopurua handiagoa da horma oszilatuan; horrela, metatutako bolumena ere handiagoa da horma honetan, tanta guztiek bolumen bera baitute, GMAW

prozesu sinergiko pultsatuari esker. IV-10. taulak kontrol-bolumenean (bi geruzatan) bi hormetarako kalkulatutako $V_{ezarri}$ balioak erakusten ditu:

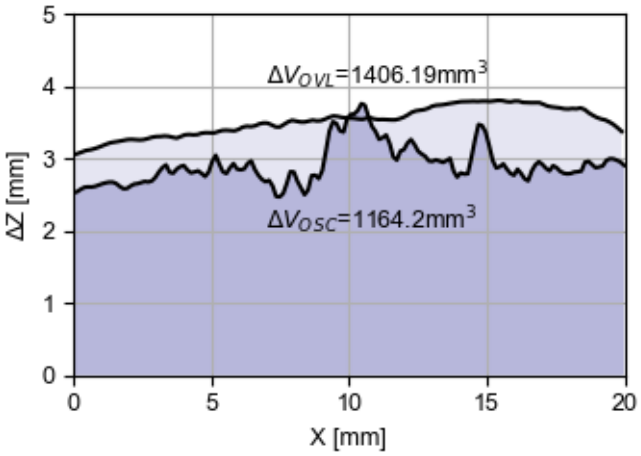
$$V_{ezarri} = \frac{DR*l}{TS*\rho}$$

non,

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

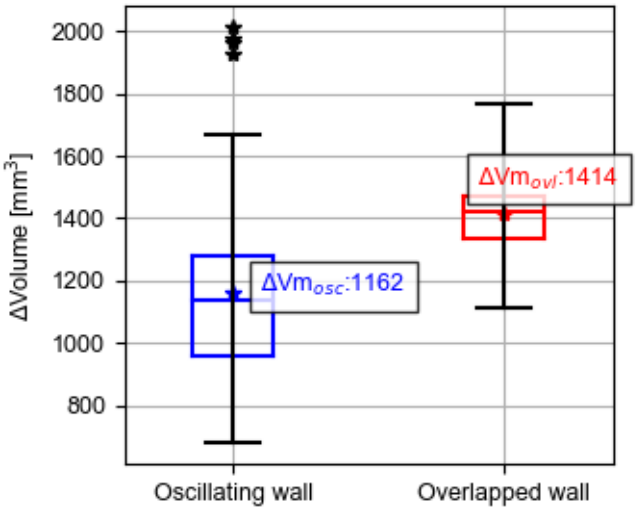
Gainera, WAAM prozesuko beste parametro garrantzitsu bat geruza bakoitzeko hazkunde bolumetrikoa (ΔV) da. Kontrol-bolumenaren barruko hazkunde hori kalkulatzeko, hormen zeharkako profilak irudikatzen dituzten puntu-hodeiak ($p(x)_i$) erabiltzen dira. Hain zuzen ere, datu horiek fabrikazio-prozesuan zehar eskaner laserraren bidez hormak bi geruzatik behin eskaneatuz lortzen dira. Adibidez, IV-15. irudiak bi hormetan, 25. eta 26. geruzen, geruzako hazkunde bolumetrikoa erakusten du. Hazkunde hori zehazteko, lehenik eta behin, segidako zeharkako bi profilen arteko kenketa kalkulatu eta irudikatzen da, IV-15. irudian erakusten den bezala. Kontuan izan, bi hormetan, irudikatutako kurbek 26. geruzako zeharkako profilaren eta 24. geruzako zeharkako profilaren arteko kenketa adierazten dutela. Segidan, kontrol-bolumenaren barruko geruzako hazkunde bolumetrikoa kalkulatzen jarraitzeko, kurbaren azpiko azalera kalkulatzen da. Prozesu hori 10. ekuazioaren bidez defini daiteke, non $p(x)_i$ eskaner laserrarekin eskaneatutako zeharkako profilak diren, Δx X ardatzaren norabideko luzera den—kasu honetan, kontrol bolumenaren zabalera 20 mm-koa da—eta Δy Y ardatzaren norabideko luzera den—kasu honetan, kontrol bolumenaren luzera 20 mm-koa da.

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



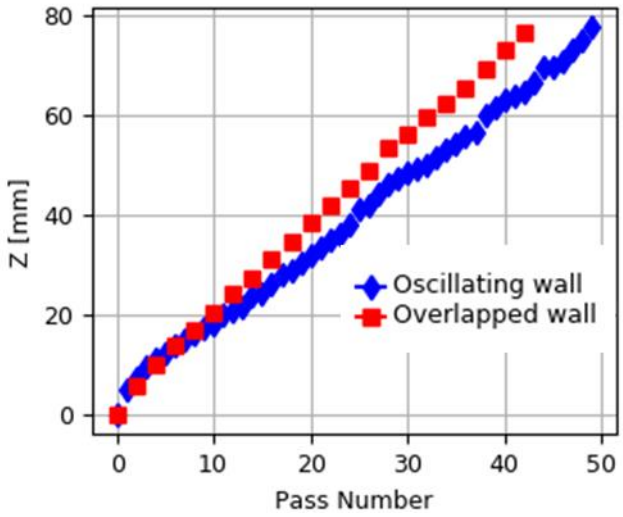

*IV-15. irudia. 25. eta 26. geruzen geruzako hazkunde bolumetrikoaren kalkulua bi hormetan*

Kontrol-bolumenaren barruan horma oszilatuan material tanta gehiago pilatu ziren arren, oszilazio-estrategiaren batez besteko geruzako hazkunde bolumetrikoa txikiagoa da estrategia gainjarrian baino —1162 $mm^3$ eta 1414 $mm^3$, hurrenez hurren—, IV-16. irudian erakusten den bezala. Hau, bi hormek jasaten duten eta diluzio tasa ezberdinak sortzen dituen bero-ekarpen ezberdinagatik gertatzen da.




*IV-16. irudia. Geruzako batez besteko hazkunde bolumetrikoa. Kontuan izan errore-barrek balio maximoak eta minimoak adierazten dituztela*

Puntu hori nabarmentzeko, IV-17. irudiak Z ardatzean hormaren hazkundearen bilakaera aurkezten du. Bilakaera hori zehazteko, hormaren altuera neurtu da bi estrategietan hormak ezartzen zihoazen heinean. Lehen geruzetan ikus daitekeenez, geruzako hazkundea handiagoa da horma oszilatuan horma gainjarrian baino hasieran oinarri-materiala giro-tenperaturan dagoelako eta energia-ekarpena eta hozte-denborak oraindik ez direlako egonkorrak. Lehen geruza horien ondoren, horma gainjarriak oszilatuak baino hazkunde handiagoa du eta beraz, nahi den altuera lortzeko behar diren geruzen kopurua horma gainjarrian murriztu egiten da, 40 geruza eta 48 geruza, hurrenez hurren. Oszilazio-estrategian beroa gehiago metatzen da horman eta honek diluzio handiagoa eragiten du. Hala, horma honetan geruza gehiago behar dira Z ardatzaren norabidean hazkunde bera izateko.




*IV-17. irudia. Hormen altuera Z ardatzean, bi hormetan geruzako hazkunde bolumetrikoaren bilakaera irudikatzeko neurtua*

Gainera, kordoi sinple bateko diluzioa, azaleren arteko erlazioaren ehuneko bat bezala kalkulatu daitekeen arren (6. ekuazioa), 11. ekuazioaren arabera ere kalkula daiteke, non $V_{ezarria}$ material ezarriaren bolumena den eta ΔV geruza bakoitzeko hazkunde bolumetrikoa:

$$Diluzioa = \frac{V_{ezarria} - \Delta V}{V_{ezarria}} * 100 \qquad (11)$$

Azkenik, bi ezarpen estrategietarako aurreratutako milimetro bakoitzeko ezarritako tanta kopurua, kontrol-bolumenean ezarritako materialaren bolumena, geruzako batez besteko hazkunde bolumetrikoa eta horma bakoitzaren diluzio-tasa IV-10. taulan laburbiltzen dira. Ikus daitekeenez, horma oszilatuak diluzio handiagoa du, jasaten duen bero-ekarpen eta -metaketa handiagoak direla eta. Bero-ekarpenarekin lotutako alderdiak hurrengo atalean landuko dira.

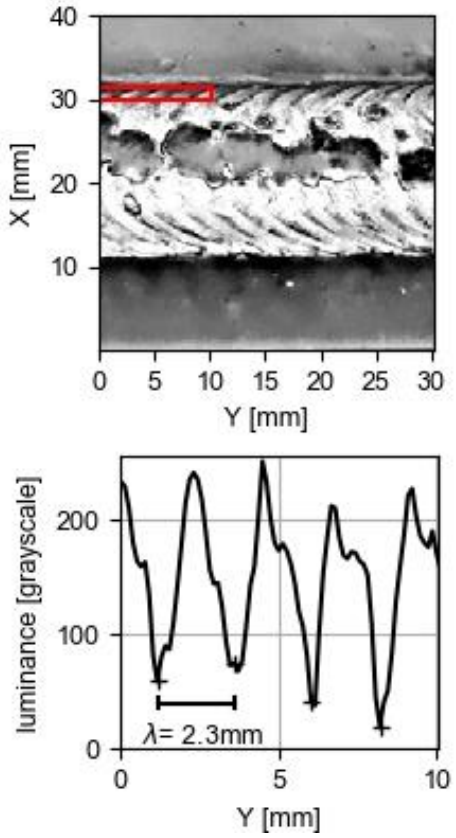
*IV-10. taula. Geruzako hazkundearekin erlazionatutako parametroak bi hormetan*

| | $N_{tantak}$ (tantak/mm) | $V_{ezarria}$ ($mm^3$) | ΔVm ($mm^3$) | Diluzioa (%) |
|---|---|---|---|---|
| **Horma gainjarria** | 38,25 | 1669,51 | 1414 | 15,30 |
| **Horma oszilatua** | 41,25 | 1808,64 | 1164 | 35,75 |

Robotak oszilazio-estrategian programatutako ibilbidea egin duela ziurtatzeko, IV-18. irudian lehen geruzako kordoia agertzen da. Kordoiaren zabalera helburu den hormaren zabalera (20 mm) baino pixka bat txikiagoa da, 0. geruzan substratua hotza dagoenez Z norabidean kordoia gehiago hazten delako eta zabalera pixka bat murrizten delako.

IV-18. irudian, kordoiaren ertzetan ikus daitezkeen markak ibilbide oszilatuaren ondorioz sortzen dira eta ondoz ondoko bi marken arteko distantzia neurtuz

prozesuaren uhin-luzera erreala zehaztu daiteke. Hala, lehen kordoiko bost marka lauki gorri batez mugatu dira (IV-18. irudia) eta mugatutako argazkiaren zati honen luminantzia-balioak aztertzen dira. Balio horietatik benetako oszilazioaren uhin-luzera 2,30 mm-koa dela kalkulatu da eta beraz, programatutako uhin-luzera teorikoa 2,22 mm-koa zenez, ondoriozta daiteke benetako ibilbidea programatutakoarekin bat datorrela. Kordoiaren goiko gainazalean ez da sigi-saga osoaren forma ikusten, programatutako uhin-luzeraren balio teorikoa txikia baita. Izan ere, aitzinamendu norabidean kordoiaren erdialdean ez da markarik sortzen, hurrengo mugimenduak ezabatzen dituelako.

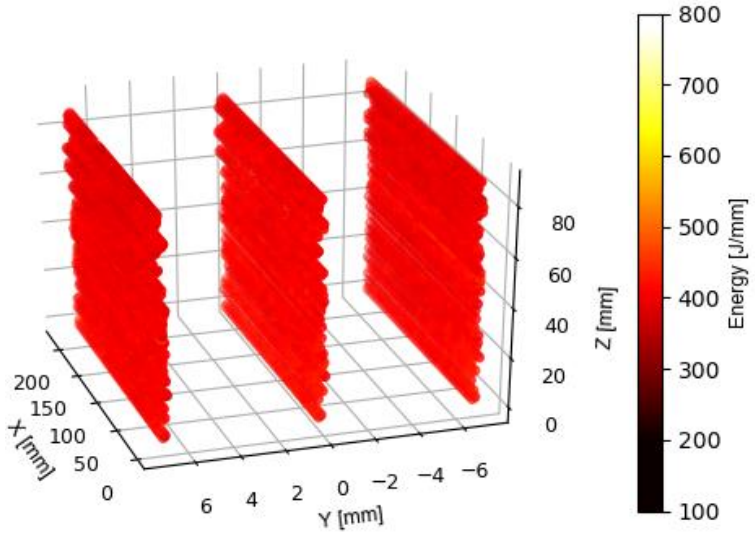



*IV-18. irudia. (goian) Lehenengo kordoiaren goitik begiratutako itxura, ibilbide oszilatorioaren uhin-luzeraren ondorioz alboetan markak ikus daitezkeelarik; (behean) lauki gorriak mugatutako bost marken luminantzia-balioak*

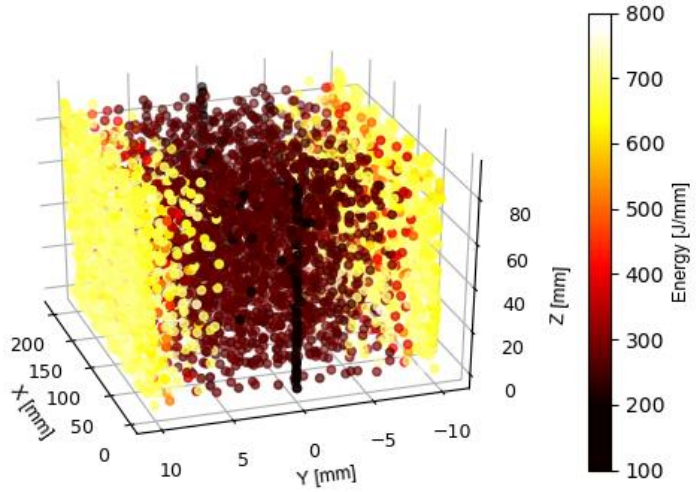
### 3.3.2 Bero-ekarpenaren analisia *(Heat input, HI)*

Soldadura prozesuetan bero-ekarpen kontzeptua ondo definituta badago ere, fabrikazio-gehigarrian ez da hain kontzeptu arrunta. Alde batetik, hornitutako energia instantaneoa kalkula daiteke (5.ekuazioa), IV-19. irudian agertzen dena. Hornitutako energia instantaneo hau zuziaren aitzinamendu-abiadurarekin zatitutako intentsitatearen eta tentsioaren biderkadura gisa kalkulatzen da.

Intentsitate instantaneoaren eta tentsioaren balioak ezarpen prozesuan zehar monitorizatzen dira. Energia instantaneoa konstantea da gainjarritako estrategiaren kasuan, eta aldakorra, aldiz, oszilazio-estrategian prozesuaren zinetikaren ondorioz, IV-19. irudian ikusten den bezala.




**(a)**




**(b)**

*IV-19. irudia. Horma (a) gainjarria eta (b) oszilatua fabrikatzean prozesuan hornitzen den energia*

Bestalde, bolumeneko bero-ekarpena kalkulatzeko, ezarritako materiala biltzen duen 3.3.1 sekzioan definitutakoa bezalako kontrol-bolumena (Δx, Δy, Δz) zehaztea beharrezkoa da. Garrantzitsua da, halaber, kontrol-bolumen horretan sartutako bero-ekarpena kuantifikatzeko, estrategia ezberdinetan zuziak egindako iraganaldi anitzak kontuan hartzea. Hornitutako energia 12. ekuazioan definitzen den bezala zehaztu daiteke eta bolumeneko bero-ekarpena (*Heat*

*Input, H*l) 13. ekuazioaren arabera, non I intentsitatea den, V tentsioa eta TS aitzinamendu-abiadura.

$$Hornitutako\ energia = \frac{I*V*\Delta y*Kordoi\ kopurua}{TS} \quad (12)$$

$$HI_{3D} = \frac{Hornitutako\ energia}{Bolumena} = \frac{Hornitutako\ energia}{\Delta x*\Delta y*\Delta z} \quad (13)$$

Bi hormetako bero-ekarpena kalkulatzeko eta alderatzeko, hormak fabrikatzean izaten diren intentsitatearen eta tentsioaren batez besteko balioak kalkulatu behar dira. Batez besteko balio horiek IV-11. taulan ageri dira. Teorikoki, bi kasuek hariaren elikatze-abiadura bera (8 m/min) dutenez, intentsitate- eta tentsio-balioak berdinak izan behar dira, lehen azaldu bezala, soldadura-iturri sinergikoak erabiltzen baitira. Hala ere, praktikan, arkuaren luzera zehatzak balio hauei eragiten die, baita Stick-outa bera bada ere.

Gainera, IV-11. taulak kontrol-bolumenerako kalkulatzen diren bero-ekarpenaren parametroak erakusten ditu. Merezi du aipatzea balio hori bi geruzaren bero-ekarpena dela, kontrol-bolumenaren barruan bi geruza daudelako. Azkenik, horma hazitako milimetro kubiko bakoitzeko bero-ekarpena kalkula daiteke, handiagoa izanez horma oszilatuan.

*IV-11. taula. Bi hormetan bero-ekarpenarekin erlazionatutako parametroak*

| | **I (A)** | **V (V)** | **Hornitutako energia (J)** | **$HI_{3D}$ (J/mm$^3$)** |
|---|---|---|---|---|
| **Gainjarria (ovl)** | 229,34 | 27,09 | 68818,94 | 48,67 |
| **Oszilatua (osc)** | 244,45 | 26,61 | 78057,77 | 67,17 |

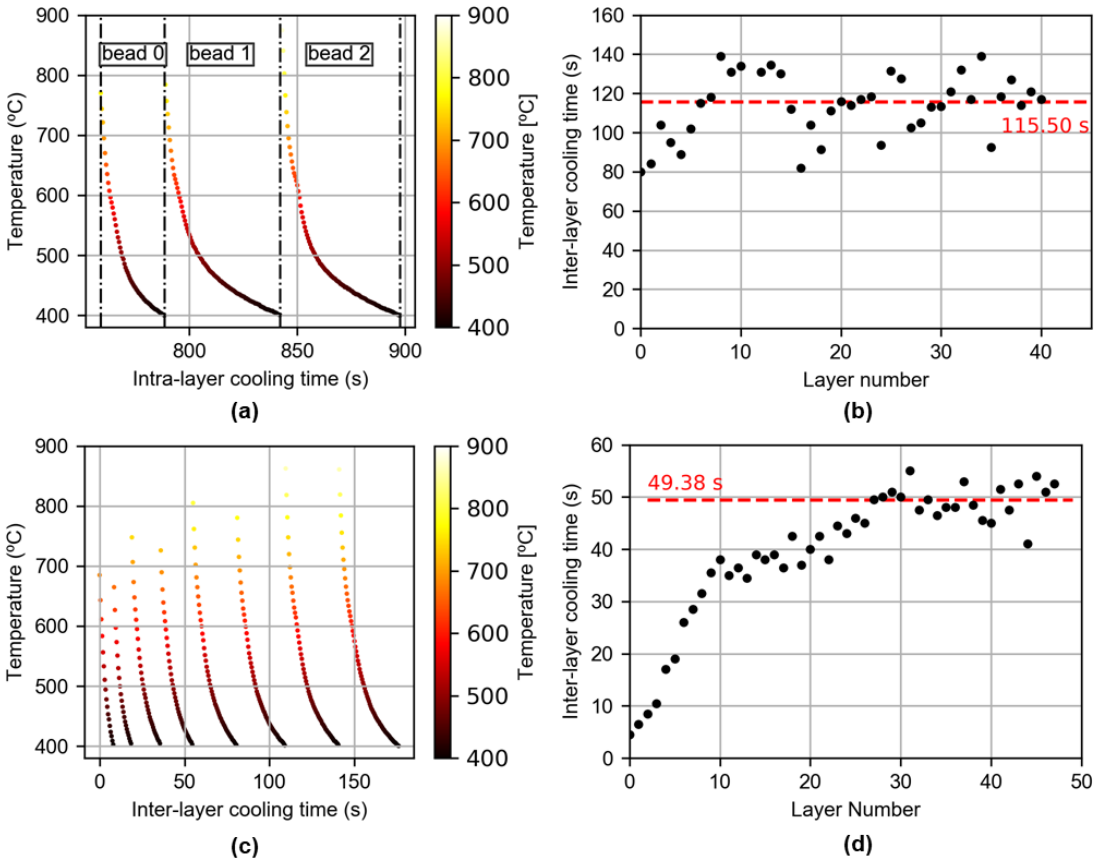
IV-11. taulan ikus daitekeen bezala, gainjarritako horman hornitutako energia txikiagoa da eta hiru zatitan gehitzen da, ezarritako kodoien artean hozte-denborak izanez. Bestalde, horma oszilatuan hornitutako energia handiagoa da eta modu jarraituan txertatzen da aldi batez. Hala, oszilazio-estrategian zuzia luzaroan eremu berean egotearen ondorioz, hormak bero gehiago metatzen du. Beraz, diluzioa handiagoa da horma oszilatuan eta ondorioz, geruza bakoitzeko batez besteko hazkundea txikiagoa izango da. Hori dela eta, aurreko atalean egiaztatu den bezala, nahi den horma lortzeko behar den geruza kopurua handiagoa da. Gainera, energia-ekarpenak mikroegiturari eta piezen propietate mekanikoei ere eragiten die, Rodrigues et al.-ek [Rodrigues, 2019-a] ondorioztatu zuten bezala. Ikerketa horrek adierazten zuenez, bero-ekarpen handiak gainazalaren ondulazio txikiagoa sortzen du eta ale handiagoko mikroegitura eragiten du. Efektu hau doktore-tesi honetan ere islatzen da,

fabrikatutako bi hormetan, mikroegitura eta propietate mekanikoetan aldaketak agertzen baitira. Dirisu et al.-ek [Dirisu, 2019] efektu bera jakinarazi zuten, aleazio baxuko erresistentzia handiko altzairu estrukturaletan oszilazio-estrategia kordoi bakarreko estrategiarekin alderatzean.

### 3.3.3 Hozte- eta fabrikazio-denboren analisia

Erabilitako materialaren eta WAAM prozesuaren parametroen arabera, beharrezkoa da iraganaldien artean hozte-denborak izatea, piezaren hazkundea ziurtatzeko eta gehiegizko bero-metaketarik ez izateko. Horrela, bero-ekarpenak iraganaldien arteko tenperatura baldintzatzen du. Iraganaldien arteko tenperatura, definizioz, hurrengo geruza ezarri baino lehen aurreko geruzak izan behar duen tenperatura da. Gainera, hozte-denbora tenperatura horren araberakoa da eta horregatik, fabrikazio-denbora osoari ere eragiten dio eta azken batean, produktibitateari. Rodrigues et al.-ek [Rodrigues, 2019-a] ondorioztatu zuten bezala, tenperatura hori baxuegia bada, hozte-denborak luzeegiak izan daitezke, fabrikazio-denbora osoa egin ezin bihurtuz. Hala ere, iraganaldien arteko tenperatura altuegia bada, ezarpena okerra izan daiteke eta piezaren kolapsoa eragin dezake. Beraz, bi hormetako hozte-denbora aztertzeko, kordoi bakoitza ezarri ondoren, hurrengo kordoiaren abiapuntuko tenperatura neurtzen da pirometroa erabiliz. Bi kasuetan, itxaron-denbora behar da puntu horretan tenperatura 400 ºC-tik beherakoa izateko (iraganaldien arteko tenperatura) eta denbora horretan tenperaturaren bilakaera monitorizatzen da.

Alde batetik, gainjarritako horman geruza beraren barruan (kasu honetan, 8. geruza), kordoien arteko hozte-denbora nabarmen handitzen da lehen kordoitik hirugarrenera piezan beroa metatzen delako, IV-20 a. irudian ikus daitekeen bezala. IV-20 b. irudian, aldiz, geruzen arteko hozte-denborak adierazten dira. Horma honetako hozte-denbora totala kalkulatzeko, geruza bakoitzeko kordoien arteko hiru hozte-denboren batura egiten da. Geruzen arteko hozte-denbora hau ez da asko aldatzen geruzetan zehar, hau da, konstante mantentzen da. Hala ere, egia da, lehen geruzetan, denbora hau laburragoa dela, hasieran, oinarri-materiala giro-tenperaturan dagoelako. Geruzen arteko hozte-denboraren batez besteko balioa, kasu honetan, 115 s ingurukoa izan da.




*IV-20. irudia. (a) Tenperaturaren bilakaera gainjarritako hormaren zortzigarren geruzaren barruko kordoien arteko hozte-denboran; (b) Geruzen arteko hozte-denboraren bilakaera gainjarritako horman zehar; (c) Tenperaturaren bilakaera oszilatutako hormaren lehenengo zortzi geruzen arteko hozte-denboran; (d) Geruzen arteko hozte-denboraren bilakaera horma oszilatuan.*

Bestalde, horma oszilatuan, IV-20 d. irudian ikus daitekeen bezala, geruzen arteko hozte-denborak aldakorrak dira horman zehar. Lehen geruzetan, geruzen arteko hozte-denborak laburragoak dira, oinarri-materiala oraindik hotz baitago, baina metatutako geruza kopurua handitu ahala, hozte-denborak handitu egiten dira, 27. geruzaren inguruan egonkortu arte. Kasu honetan, erregistratzen den hozte-denbora bakarra geruzen arteko denbora da, geruza bakoitzean kordoi bakarra ezartzen baita. IV-20 c. irudiak xehetasunez erakusten du hozte-denboraren bilakaera lehenengo zortzi geruzetan; argi ikusten da hozte-denboraren gehikuntza lehen geruzatik zortzigarren geruzaraino. Kasu horretan, geruzen arteko hozte-denboraren batez besteko balioa, egonkortu ondoren, 49 s ingurukoa da.

Nahiz eta geruza bakoitzean prozesuan hornitutako energia handiagoa den horma oszilatuan, aurreko atalean ikusten den bezala, geruzen arteko batez

besteko hozte-denbora txikiagoa da horma oszilatuan, energia hori modu desberdinean sartzen baita. Lehen azaldu bezala, horma oszilatuan, gainjarrian ez bezala, energia guztia batera sartzen da. Bestalde, gainjarritako horman, energia, hozte-denboren bidez banandutako hiru zatitan sartzen da. Beraz, horma oszilatuko hozte-denbora bakarra baino luzeagoa da hiru aldi horien batura.

Fabrikazio-denborari dagokionez, denbora gehiago behar da horma gainjarria egiteko oszilatua baino, nahiz eta oszilazio-estrategian geruza gehiago ezartzen diren. Fabrikazio-denbora horren barruan, bi hormetan, ezarpen-denborak eta hozte-denborak sartzen dira, IV-12. taulan ikus daitekeen bezala. Horma oszilatuan ezarpen-denbora handiagoa da, egindako distantzia antzekoa izanik batez besteko txikiagoa delako. Aitzitik, lehen frogatu den bezala, guztizko hozte-denbora handiagoa da horma gainjarrian. Datu horietatik, oszilazio-estrategia gainjarritako estrategia baino produktiboagoa dela ondoriozta daiteke.

*IV-12. taula. Fabrikazio-denborak*

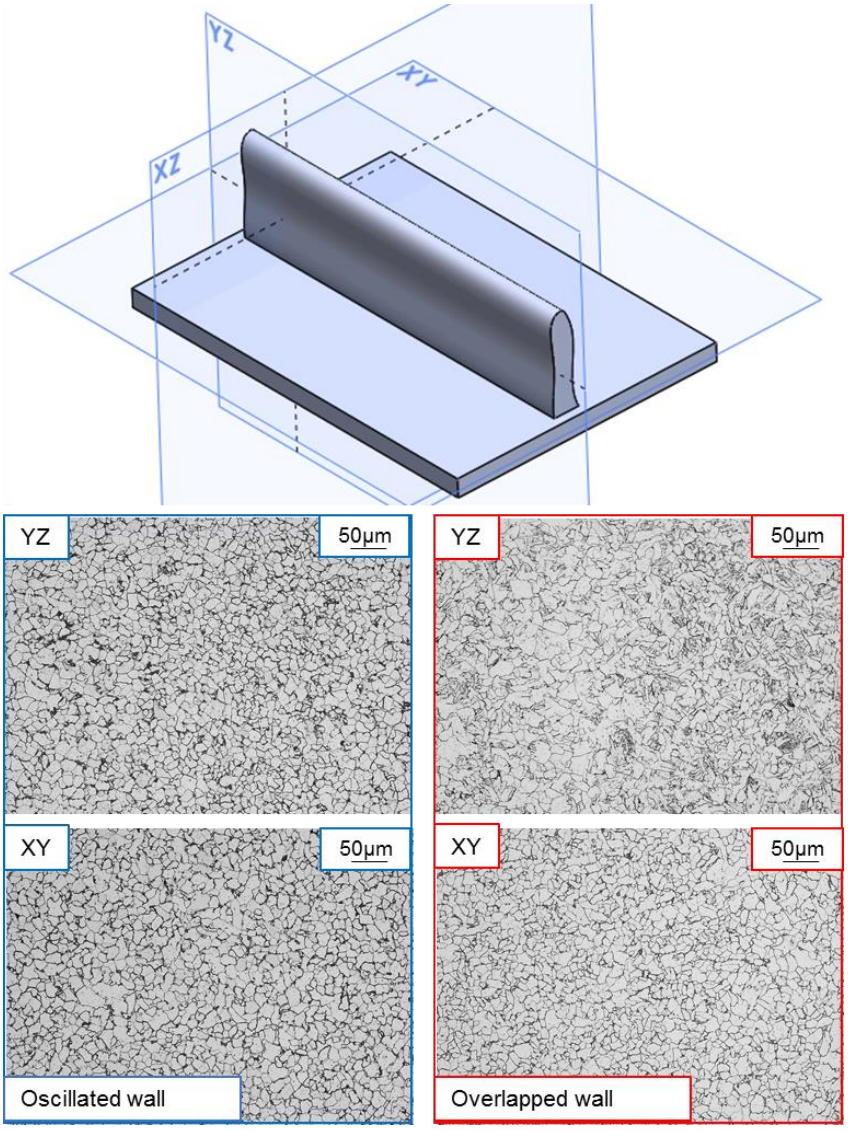
| | **Ezarpen-denbora** | **Hozte-denbora** | **Fabrikazio-denbora** |
|---|---|---|---|
| **Gainjarria** | 46min 46s | 75min 38s | 2h 2min 24s |
| **Oszilatua** | 52min 36s | 32min 29s | 1h 25min 5s |

### 3.3.4 Makroegitura, mikroegitura eta gogortasunak

Prozesuko parametro ezberdinek eragina dute zehaztasun geometrikoan, propietate metalurgikoetan, makroegituran, mikroegituran eta gogortasunetan [Zhang, 2003]. Gainera, WAAM teknologia bidez fabrikatutako piezak geruzaz geruza osatzen direnez, fabrikazio-prozesuan sortutako bero-ekarpenak berotze partzial bat eragiten du aurreko geruzetan. Ondorioz, ezarritako materiala eta HAZa ziklo termiko jarraien mende daude. Kordoi bakoitzaren bero-ekarpena eta ezarpen-estrategiaren arabera, historia termiko desberdina duten eremuak ager daitezke. Beraz, argi dago piezaren eskualde ezberdinek mikroegitura ezberdinak izango dituztela. WAAM teknologiaren ezaugarri hori kontuan hartuta, Cunningham et al.-ek [Cunningham, 2018] prozesu osagarriek alderdi horretan ekar ditzaketen onurak aztertu zituzten. Doktore-tesi honetan, ezartze-sekuentzia eta -ibilbide desberdinen ondorioz sortutako ziklo termikoak direla eta, horma oszilatuan eta horma gainjarrian mikroegitura desberdina izatea espero da.

Aurreko ikerketa batean, Choik eta Hillek [Choi, 1978] soldadura-kordoien mikroegitura aztertu zuten ER70S-6 altzairuan, doktore-tesi honetan

fabrikatutako hormen mikroegitura aztertzeko baliagarria dena. IV-21. irudian, mikroegituraren analisirako erabilitako erreferentzia sistemaren ardatzak agertzen dira, bai eta YZ eta XY planoetan oszilatutako eta gainjarritako hormen erdialdean dauden mikroegiturak ere. Plano horietan ferrita poligonaleko egiturak ikus daitezke, horma oszilatuan gainjarrian baino ale handixeagoak dituztenak.

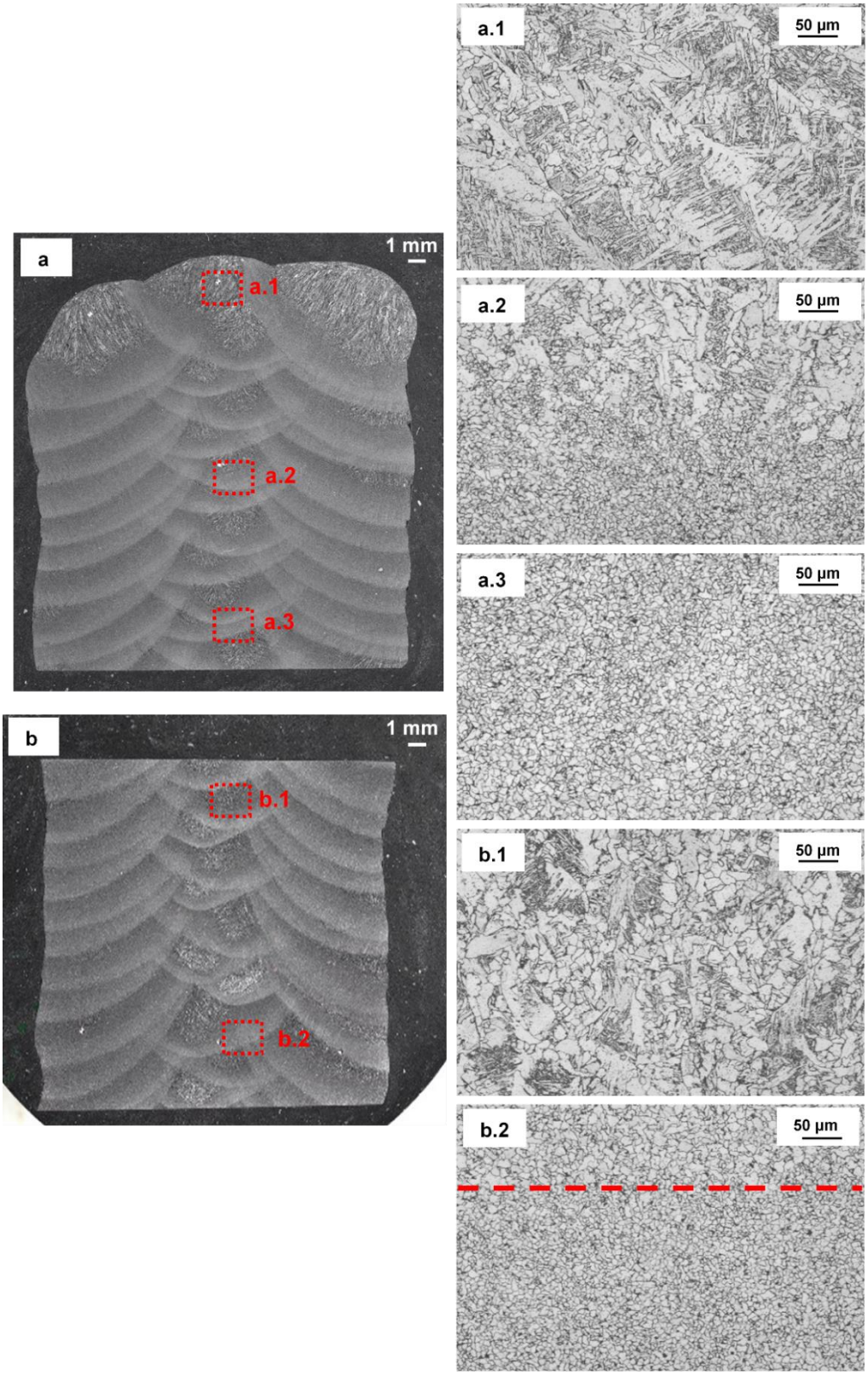



*IV-21. irudia (goian) Horma gainjarriaren eta horma oszilaturen mikroegituraren analisirako hartutako erreferentzia sistemaren irudikapena; (ezkerrean) horma oszilatuaren mikroegitura YZ eta XY planoetan; (eskuinean) hormaren gainjarriaren mikroegitura YZ eta XY planoetan*

IV-22 a eta b. irudietan, aldiz, gainjarritako hormaren zeharkako norabidean hormaren goialdeko eta behealdeko makrografiak ikusten dira (XZ planoan) (IV-21. irudian erreferentzia sistemaren ardatzak ikusgai). Irudi horietan, utzitako kordoi bakoitza eta bakoitzaren HAZa argi eta garbi ikus daitezke. Mikroegitura heterogeneo honetan ferrita poligonala eta ferrita azikularra dituzten eremuak

bereizten dira. Hala, soldadura-kordoietan ferrita azikularra sortzeko prozesua Babuk [Babu, 2004] aztertu eta laburbildu zuen bere lanean.

Hormaren goiko aldean (IV-22 a.1. irudia) ferrita azikularraren, ferrita alotriomorfikoaren eta bainitaren nahasketa duen mikroegitura ikusten da, zati horrek ez baitu hurrengo geruzaren efektu termikoa jasan. Shassere et al.-ek [Shassere, 2019] kordoi bakarreko horma bat fabrikatzean antzeko mikroegitura lortu zuten. IV-22 a.1. irudian, eremu ilunenak ferrita azikularreko eta bainitazko mikroegiturei dagozkie eta eremu argienak, berriz, ferrita alotriomorfikozko mikroegiturei. Hormaren gainerako zatietan, ferrita poligonaleko eremuak (IV-22 a.3 eta b.2. irudiak) eta ferrita akular/bainitazko eremuak (Figura IV-22 b.1. irudia) tartekatzen dira. Mikroegituran uniformetasunik ez izatea ezarpen-estrategiaren ezaugarrien arabera energia ez-uniformeki sartzearen ondorio da. Argi dago ferrita azikularra duten zatiek ez dutela hurrengo iraganaldien efektu termikorik jaso eta zati poligonalek, aldiz, bai. IV-22 a.3 eta b.2. irudietan, ferrita poligonala duen mikroegitura bat ikus daiteke perlita pixka batekin ale-mugetan (zati beltzak). Dirisu et al. [Dirisu, 2019] eta Haden et al.-ek [Haden, 2017] mikroegitura bera lortu zuten fabrikatu zituzten ER70S-6 altzairuzko kordoi bakarreko hormen erdialdean. Xehetasun gehiagorako, IV-22 a.2. irudian ferrita azikularreko mikroegituratik ferrita poligonaleko mikroegiturarako trantsizioa ikusten da.

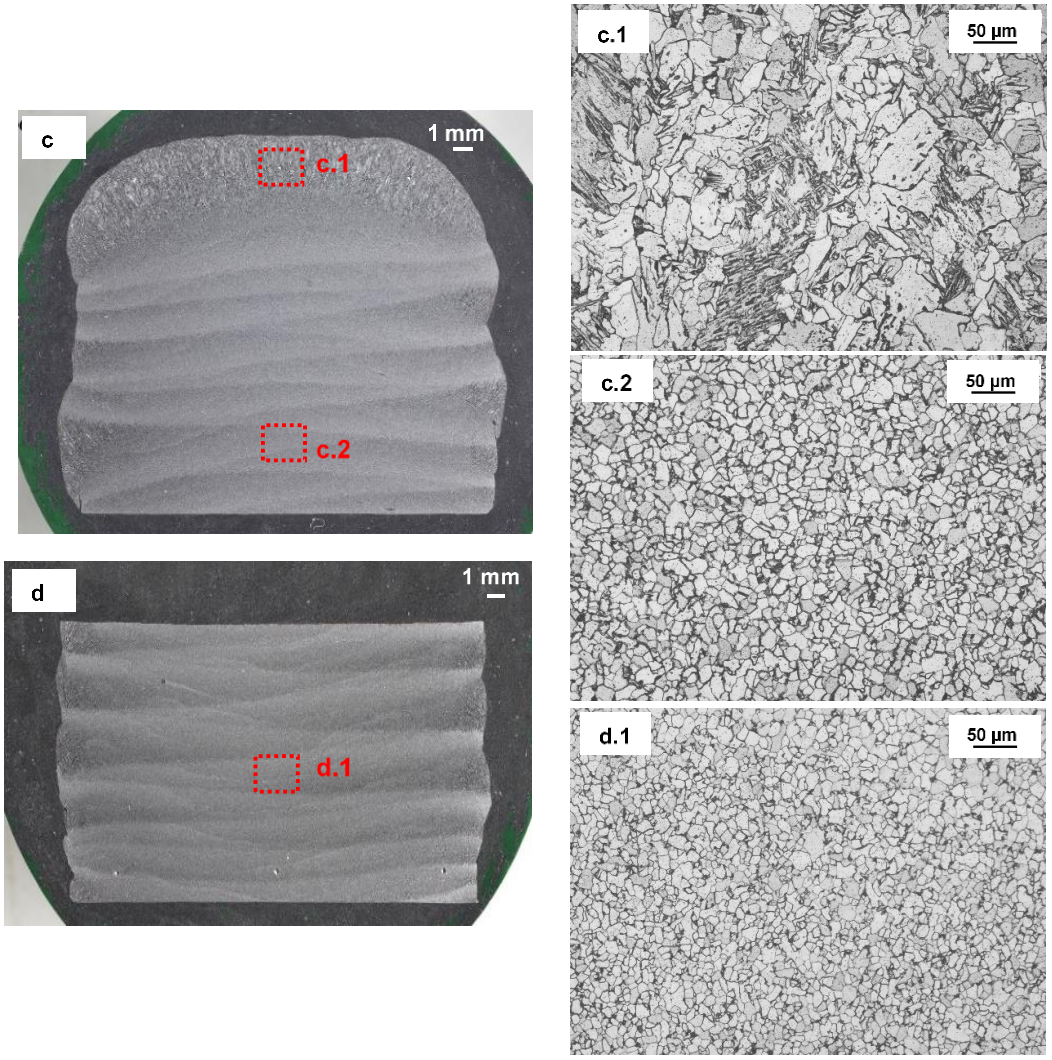



*IV-22. irudia. (ezkerrean) Zeharkako norabidean (XZ planoan) gainjarritako hormaren goialdeko eta behealdeko makroegiturak; (eskuinean) gainjarritako hormaren mikroegiturak. Kontuan izan mikrografiak makrografietan lauki gorriekin markatutako eremuetan atera direla*

Gainera, hormaren altueran zehar ale-tamainaren aldaketa ere ikus daiteke. Eremu batzuetan ale-tamaina fina (ASTM 12) aurkitzen da, eta beste batzuetan, berriz, ale handiagoa (ASTM 10). IV-22 b.2. irudian, aldaketa hori ikus daiteke ale-tamaina handiagoa izanez goiko aldean beheko aldean baino. Aldakuntza hau ere, eremu ezberdinek izan duten historia termiko ezberdinaren ondorio da. Adibidez, aurretiko literaturan [Choi, 1978], [Babu, 2004], [Haden, 2017] asko dokumentatu da beroak eragindako zonaldeetan (HAZ) ale-tamaina handiagotzearen fenomenoa.

Bestalde, IV-23 c eta d. irudiek oszilatutako hormaren zeharkako norabidean, hormaren goialdeko eta behealdeko makrografiak erakusten dituzte (XZ planoa) (IV-21. irudian erreferentzia sistemaren ardatzak ikusgai). Kasu honetan, mikroegitura guztiz desberdina da. Geruza bakoitzeko bero-ekarpenak (aurreko atalean zehaztua) bandak sortzen ditu. Banda hauek erraz bereizten dira IV-23 c eta d. irudietan eta banden arteko distantziak geruzen altueraren berdina da. Hormaren goiko aldean, gainjarritako hormaren kasuan bezala, ferrita azikularreko, ferrita alotriomorfikoko eta bainitazko mikroegituren nahasketa bat ikusten da (IV-23 c.1. irudia), zati horrek ez duelako jasan hurrengo kordoien eragin termikorik.

Hormaren gainerako zatian ferrita poligonalezko mikroegitura homogeneo bat ikusten da, perlita pixka batekin. Geruza bakoitzean kordoi oszilatzaile bakarra ezartzen denez, bero-ekarpen uniformea da geruza guztietan eta beraz, homogeneotasun hori ikusten da mikroegituran. Hala ere, ale-tamainan aldaketa txikiak nabari dira hormaren altuera ezberdinetan, baina, orokorrean, ale-tamaina 10 ASTM-koa da, gainjarritako estrategian baino handiagoa. Ale-tamaina handiago hori beroaren metaketaren eta ondorioz, hozte-tasa txikien ondoriozkoa da. Oliveira et al.-ek [Oliveira, 2020] eta Dirisu et al. -ek [Dirisu, 2019] bere ikerketetan efektu berberak ondorioztatu zituzten.




*IV-23. irudia. (ezkerrean) Zeharkako norabidean (XZ planoan) oszilazio hormaren goialdeko eta behealdeko makroegiturak; (eskuinean) oszilazio hormaren mikroegiturak. Kontuan izan mikrografiak makrografietan lauki gorriekin markatutako eremuetan atera direla*

Gogortasunen analisiari dagokionez, gogortasuna eta mikroegitura estuki lotuta daude eta gogortasunaren banaketa determinatzeak mikroegituraren homogeneotasun maila adierazi dezake. Egindako hormetan, Vickers gogortasun-probak egin ziren bi hormen goialdean, erdialdean eta behealdean. Zati bakoitzean lortutako batez besteko balioak IV-13. taulan ikus daitezke. Bi hormetan, erdiko eta beheko zonaldeetako gogortasun balioak, konposizioari dagokionez, ER70S-6 altzairuaren antzekoa den forjatutako ASTM A36-rako, erabiltzen den arauaren mugen barnean daude. Gainera, Haden et al.-ek [Haden, 2017] antzeko gogortasun balioak lortu zituzten ER70S-6 altzairuan egindako kordoi bakarreko hormetan.

*IV-13. taula. Fabrikatutako hormen gogortasun balioak*

| | Gogortasunak (HV) | |
|---|---|---|
| | **Horma gainjarria** | **Horma oszilatua** |
| Goian | 163 | 154 |
| Erdian | 146 | 136 |
| Behean | 144 | 135 |

IV-13. taulan ikus daitekeenez, bi hormetan gogortasun balio altuagoak lortzen dira hormaren goialdean, ferrita azikularrezko mikroegitura dagoen lekuan, hain zuzen ere. Ferrita azikular hori gogorragoa da, orratz formako egitura duelako. Gainera, hiru altueratan, horma gainjarriak oszilatuak baino gogortasun balio altuagoak ditu, mikroegituran duen uniformetasun faltagatik. Mikroegitura ez-uniforme horrek ferrita azikularraren eta ferrita poligonalaren eremuak tartekatzen ditu eta gogortasun balio altuagoak neurtzen dira baldin eta neurketa puntua ferrita azikularraren eremuan badago. Fenomeno hori egiaztatzeko, gogortasunaren zeharkako bilakaera aztertzen da bi hormetan. Beraz, bi hormen erdialdean sei gogortasun neurketa burutu dira zeharkako norabidean zehar eta emaitzak IV-14. taulan daude ikusgai. Ikus daitekeenez, horma gainjarrian gogortasun balioek horma oszilatuan baino dira uniformetasun gutxiago dute, mikroegitura heterogeneoak direlako.

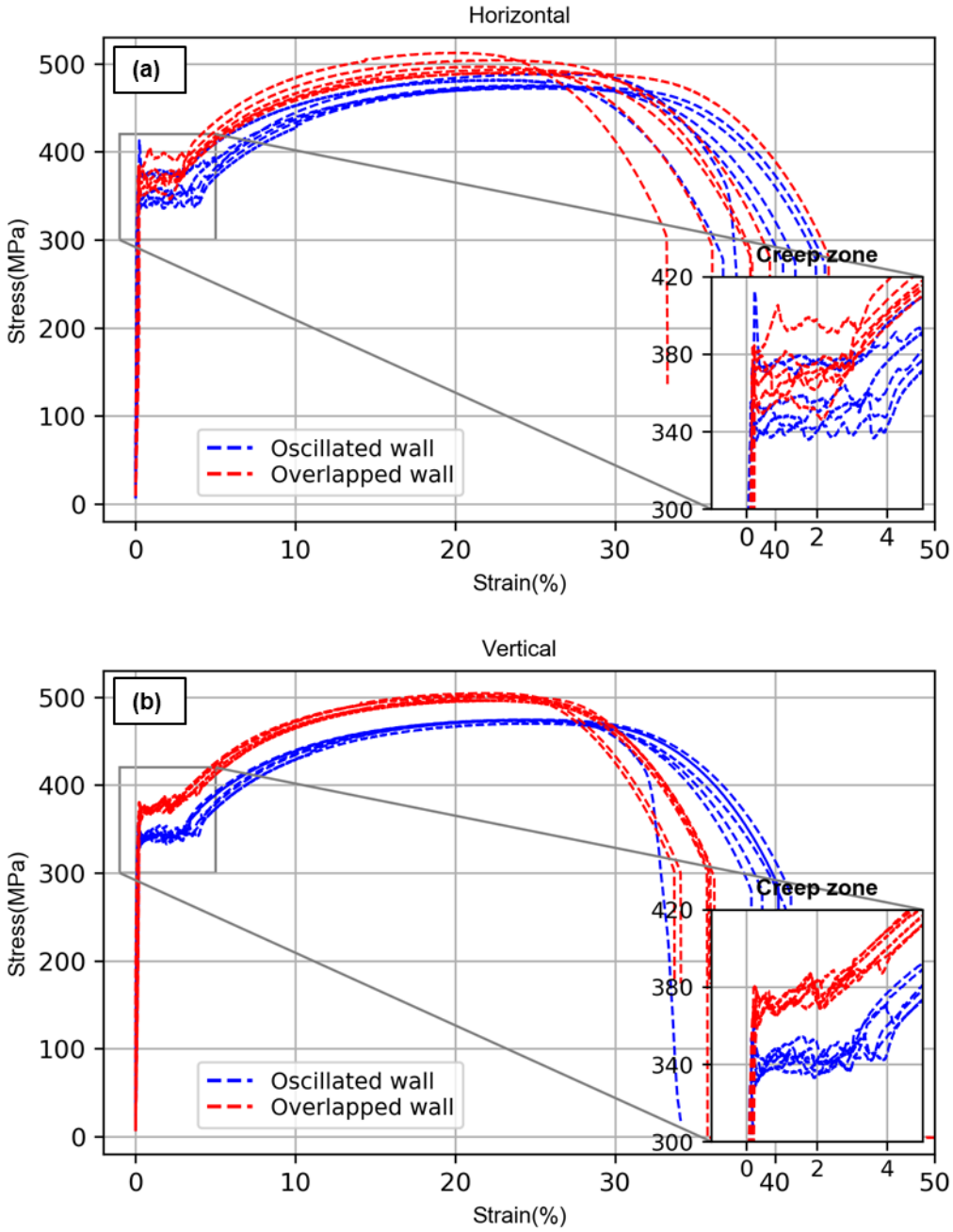
*IV-14. taula. Fabrikatutako bi hormetako zeharkako norabideko gogortasunaren bilakaeraren azterketa*

| | Gogortasunak (HV) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | **1** | **2** | **3** | **4** | **5** | **6** |
| **Horma gainjarria** | 143 | 141 | 155 | 149 | 141 | 141 |
| **Horma oszilatua** | 130 | 129 | 129 | 128 | 128 | 131 |

### 3.3.5 Propietate mekanikoen ebaluazioa

WAAM bidez fabrikatutako piezen portaera mekanikoa, gehienbat, fabrikazio-prozesuaren, bero-fluxuaren, gradiente termikoaren, lortutako ale-tamainaren, mikroegituraren eta hariaren konposizioaren araberakoa da. Gainera, gauza jakina da WAAM laginetan ager daitezkeen solidotze-akatsek, adibidez, porositateak, betetze-faltek, eremu hauskor lokalizatuek eta beroak kaltetutako eremuetan alea loditzeak propietate mekanikoetan sakabanatzea bultza dezaketela [Ghaffari, 2019]. IV-24. irudian bi hormen probeta horizontal eta bertikalen tentsio-deformazio kurbak erakusten dira, aurretiazko literaturan

[Dirisu, 2019] lortzen diren kurben antzekoak lortuz. Norabide bertikalean, haustura-tentsioaren (Ultimate Tensile Strength, UTS) eta limite elastikoaren (Yield Strength, YS) balioak altuagoak dira horma gainjarrian oszilatuan baino, baina elongazioaren balioak txikiagoak dira gainjarritako horman. Hala ere, norabide horizontalean, alde hori ez da hain agerikoa. Norabide bertikalean, horma gainjarriko UTS eta YS balio altuagoak lortutako ale-tamaina txikiagoaren ondorio dira. Gauza jakina da ale-tamaina txikiagoak materialaren erresistentzia handitzen duela alea fintzeko mekanismoen bidez. Dirisu et al.-ek [Dirisu, 2019], GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez, oszilazio-estrategia erabiliz egindako horma batean ale tamaina handiagoa lortu zuten, kordoi bakarreko horma batean baino. Gainera, ale tamainak propietate mekanikoetan duen beste efektu bat isurpen-eremua (fluentzia-eremua) laburtzea da. IV-24. irudiko xehetasunetan, isurpen-eremuak handiagoak direla ikus daiteke bi norabideetan oszilatutako hormako probetetan. Oszilazio-estrategian ale handiagoa izateak isurpen-eremua handitzea dakar, giro-tenperaturan trakzio-saiakuntzan dislokazioak blokeatzeko mugimenduen ondorioz.




*IV-24. irudia. Horma oszilatu eta gainjarrietatik ateratako probeta (a) horizontalen eta (b) bertikalen tentsio-deformazio kurbak*

Gainera, IV-15. taulak horma oszilatu eta gainjarrietako proba mekanikoen emaitzak laburbiltzen ditu. Alde batetik, UTS, YS eta elongazio balioen batez besteko balioak agertzen dira, bai eta bi hormetarako trakzio-saiakuntzetatik lortutako desbideratze estandarrak ere. Horma oszilatuan lortutako balioak ASTM A36 forjaren balioen antzekoak dira eta Ghaffari et al-ek [Ghaffari, 2019] eta Shassere et al.-ek [Shassere, 2019] antzeko emaitzak lortu zituzten WAAM bidez fabrikatutako horma meheetan. Norabide horizontaleko UTS eta YS

balioen desbideratze estandarrak norabide bertikalean behatutakoak baino handiagoak dira, IV-24. irudian ikus daitekeen bezala. Gainera, Charpy saiakuntza ere burutu da, ezarpen-estrategiek hausturarekiko zailtasunean duten eragina aztertzeko. Aurreko literaturan ([Choi, 1978] eta [Babu, 2004]), Charpy saiakuntzen emaitzek karbono gutxi duten altzairuetako trakzio-saiakuntzen emaitzek baino sakabanatze handiagoa erakusten zuten arren, ikerketa honetan zailtasun balioak antzekoak dira konparatutako bi hormetan. Aurreko literaturan dispertsio hau piezetan zehar lortutako mikroegitura ezberdinei zor zaie, adibidez, ferrita azikularrak ferrita poligonalak baino zailtasun balio handiagoak ditu [Grong, 1986]. Oro har, gainjarritako estrategian behatutako batez besteko balioak estrategia oszilatzailean behatutakoen antzekoak dira. Gainera, emaitza horiek bat datoz aldez aurreko literaturan GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez fabrikatutako ER70S-6 altzairuzko hormetan lortutako eta II. kapituluko 5.1 atalean adierazitako balioekin. Aldiz, hariaren hornitzaileak material soldatu horretarako aurrez definitutako balioak baino apur bat txikiagoak lortzen dira.

*IV-15. taula. Charpy entsegutik eta trakzio-saiakuntzetatik bi hormetan lortutako emaitzen batez besteko balioak eta desbideratze estandarrak. Hariaren hornitzaileak aurrez definitutako material soldatuaren balio mekanikoak ere adierazten dira alderaketarako*

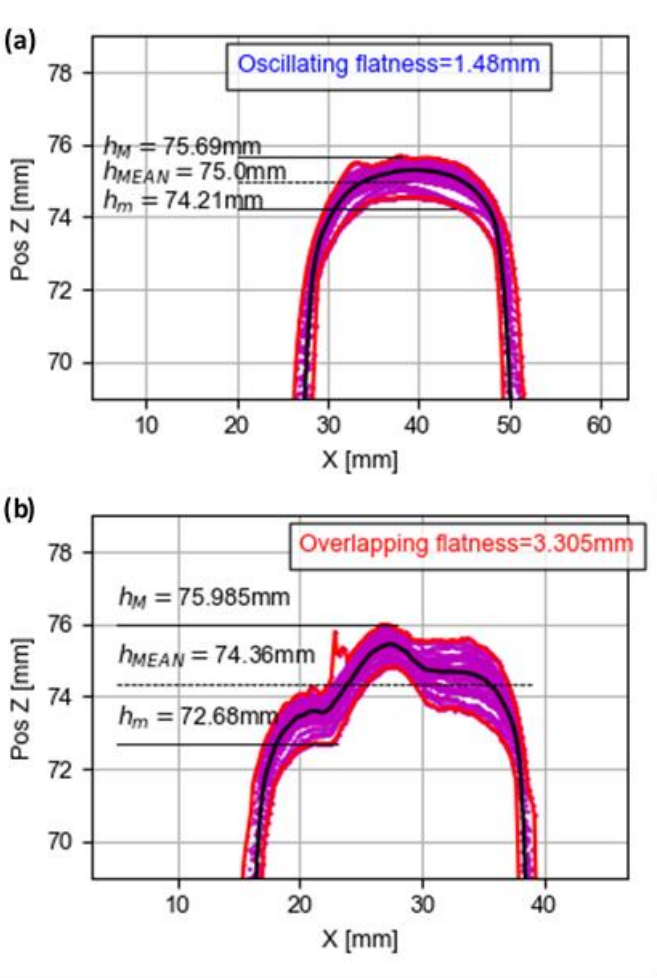
| | | **Trakzio-saiakuntza** | | | **Charpy entsegua** |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **UTS (MPa)** | **YS %0,2 (MPa)** | **Elong. (%)** | **Hausturarekiko zailtasuna (J)** |
| **Horma gainjarria** | Horizontala | 498 ± 9 | 368 ± 12 | 36 ± 4 | 193 ± 6 |
| | Bertikala | 501 ± 3 | 368 ± 4 | 32 ± 1 | |
| **Horma oszilatua** | Horizontala | 478 ± 6 | 354 ± 13 | 38 ± 3 | 195 ± 4 |
| | Bertikala | 474 ± 1 | 338 ± 4 | 36 ± 2 | |
| **ER70 soldatua** | - | 500-640 | >420 | 28 | 160 |

### 3.3.6 Geometriaren analisia

Atal honetan, ezarpen-estrategia desberdinak estrategia oszilatzailea eta gainjarria erabiliz, fabrikatutako hormen azken geometria aztertuko da. ASME Y14.5 arauak definitzen duen bezala, lautasunak "goiko gainazala barne hartzen duten bi plano paralelok definitutako tolerantzia-eremu bat zehazten du" eta hormaren goiko gainazaleko batez besteko baliotik distantzia handienaren eta txikienaren arteko diferentzia bezala kalkulatzen da.

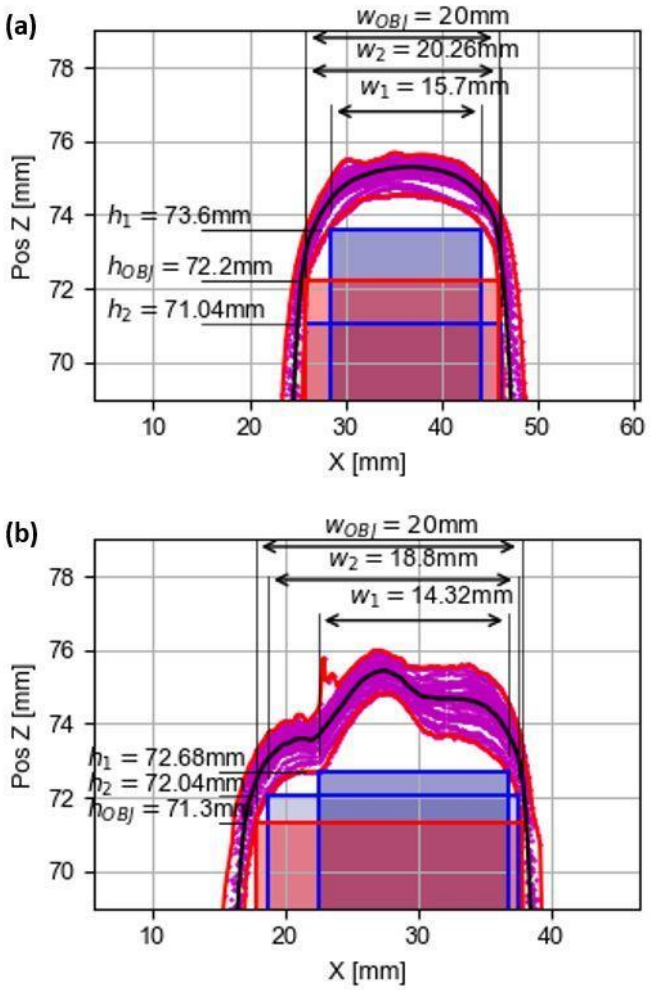
IV-25. irudian, erabilitako sistema robotikoan instalatutako laserrak azken geruza ezarri ondoren egindako irakurketa bakoitzerako lortzen diren puntu-hodeiak (profilak) erakusten dira. Gainera, profil maximoa eta batez ere, profil minimo erabilgarria definitzen dituzten bi lerro inguratzaileak ere grafikatzen dira. Azkenik, bi inguratzaile horien arteko batez besteko profil-lerroa ere erakusten da. Ikus daitekeenez, oszilazio-estrategiaren kasuan, lautasuna gainjarritako estrategian baino handiagoa da. Gainera, oszilazioarekin lortzen den profila parabolikoa da. Beraz, horren arabera, materiala fabrikazio prozesuan erdialderantz joaten da hormaren ertzetatik. Hala ere, IV-10. taulan ikus daitekeen bezala, tanta gehiago uzten dira ertzetako eremuetan. Horrek esan nahi du materiala bainu urtuaren barruan mugitu egiten dela ertzetako eremuetatik eremu berora, ertzetako eremuan dagoen gainazal tentsio handia saihestuz. Efektu bera jakinarazi zuen Ma et al. -ek [Ma, 2019] oszilazio-estrategia erabiliz horma lauago bat lortu zutenean. GMAW prozesuan behatutako portaera hori ez dator bat PAW prozesuren kasuan Bai et al.-ek [Bai, 2018] lortutakoarekin. Lan horretan, metal urtua erdiko gunean barrurantz eta ertzetako gunean kanporantz mugitzen baita.

Hormetako azken geruzak lortzen duen formari dagokionez, oszilazio-estrategiaren bidez fabrikatutako horma ia simetrikoa dela ikusi da, zuziaren mugimenduaren izaeragatik eta metalen likido egoerako mugimenduengatik. Aitzitik, estrategia gainjarriaren kasuan, ertzetako kordoien hazkundea erdiko kordoiarena baino txikiagoa dela ikusi da, behin kordoi bakoitza egin ondoren, hormaren konfigurazio anisotropikoa dela eta. Hala, goiko gainazal homogeneoa duten hormak ekoiztea funtsezkoa da ondorengo lautze mekanizazio prozesuetarako eta amaitutako hormak lortzeko. Aurreko lanetan, Veiga et al.-ek [Veiga, 2020] egiaztatu zuten fresaketa tangentzialarekin alderatuta planeatzea dela mekanizazio-prozesurik kritikoena horrelako hormetan.



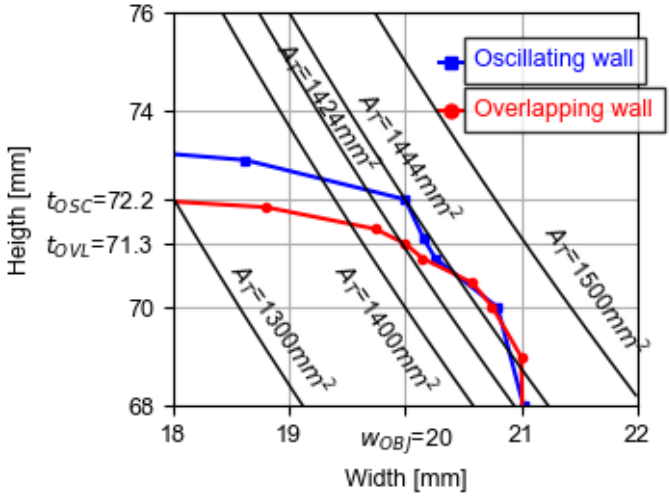

*IV-25. irudia. Profilen zeharkako sekzioak eta lautasunaren kalkulua (a) oszilazio-estrategiaren eta (b) estrategia gainjarriaren bidez fabrikatutako hormen goiko gainazaletan*

Amaierako hormen neurriak (horma eraginkorrak) neurtutako profil minimoen araberakoak izango dira. Profil horiek IV-26. irudian agertzen dira eta izaera parabolikoa dute, horma eraginkorraren zeharkako sekzioaren forma angeluzuzena definituz. Zeharkako sekzio horrek izaera aldakorra du, helburu den karratuaren altuera eta zabalera efektiboaren arabera. IV-26. irudian, bi estrategietan lortutako zeharkako sekzio eraginkorrak gorriz adierazten dira 20 mm-ko helburu den zabalerarako. Hala, zabalera hori duen horma bat lortuko litzatekeen gehieneko altuera efektiboa 72,2 mm-koa izango litzateke oszilazio-estrategiaren kasuan, eta 71,3 mm-koa, berriz, gainjarritako hormaren kasuan. Alde hori oso handia ez bada ere, esan beharra dago, oszilazio-estrategiaren kasuan, profilaren homogeneotasuna handiagoa denez, altuera efektiborik handiena duen horma lortzen dela.




*IV-26. irudia. Estrategia (a) oszilatu eta (b) gainjarriaren bidez fabrikatutako hormen zeharkako azalera eraginkorraren kalkulua*

Hurrengo IV-27. irudian horma eraginkorraren zeharkako azaleraren balioak agertzen dira. Azalera hori kalkulatzeko, bi estrategiekin lor daitezkeen horma-zabalera desberdinetarako altuera efektiboaren balioa hartzen da kontuan. Oszilazio-estrategiak aukera ematen du ezarritako materiala hobeto aprobetxatzeko, neurtutako profilak homogeneoagoak baitira. Oro har, horrek oszilazio-estrategian zeharkako azalera eraginkor handiagoa sortzen du eta gainera, azken horma lortzeko erauzitako txirbil-bolumena txikiagoa izango da. Horri esker, ondorengo mekanizazio-prozesuen kostua txikiagoa da.



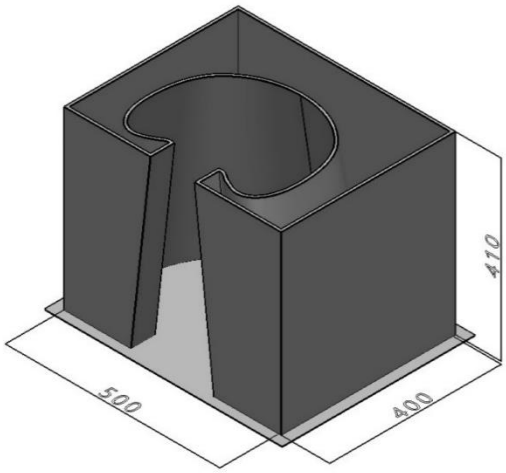

*IV-27. irudia. Bi estrategiekin egindako hormen zeharkako azalera eraginkorra, altuera eta zabalera efektiboaren arabera*

## 3.4 Balioztatzea

Kapitulu honetan aztertutako guztia balioztatzeko, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez bi pieza fabrikatu dira ER70S-6 altzairuan. Alde batetik, horma fineko moldea, lan egiteko modu ezberdinen eragina zehazteko eta GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuarekin horma finak dituzten piezak fabrikatzeko aukera frogatzeko egin da. Bestalde, alabedun pieza fabrikatu da, pieza bakar batean ezarpen-estrategia desberdinak izatearen eragina aztertzeko.

### 3.4.1 Horma fineko moldea

IV-28. irudian, aurrez lortutako emaitzak balioztatzeko fabrikatu den horma fineko moldearen diseinua ikus daiteke. Diseinu horretan, helburu den moldearen hormen lodiera 4 mm-koa da eta horregatik, WAAM bidez fabrikatutako moldearen hormen lodiera 7-8 mm ingurukoa izan behar da, mekanizatu ondoren 4 mm-ko azken hormak lortu ahal izateko.




*IV-28. irudia. Moldearen diseinua neurri nagusiak mm-tan adierazita*

Piezaren diseinua kontuan hartuta molde hori fabrikatzeko materiala kordoi bakar batean, modu jarraian ezartzen da, geldialdirik gabe. Ibilbideak PowerMill softwarearen bidez diseinatzen dira (Autodesk, Estatu Batuak). Software honetan, geruzako hazkundea eta jarraitu beharreko ibilbide mota defini daitezke eta softwareak barne-algoritmo baten bidez, nahi diren ibilbideak kalkulatzen ditu. Ezarpena modu jarrian egin ahal izateko, piezaren atzeko horma zuzenaren erdialdean, materiala ezartzen den bitartean geruza baten altuera igotzen da Z ardatzena arrapala bat eginez.

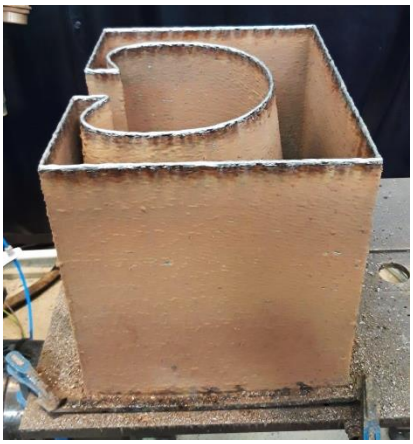
Ibilbide horiek definitu ondoren, PowerMill softwaretik zuzenean postprozesatzen dira. Makina bakoitzak (robota edo CNC makina) bere postprozesadore propioa du eta horri esker, makina bakoitzerako beharrezkoa den kodea sortzen da eta fabrikatu beharreko pieza zuzenean kokatzen da nahi den posizioan. Doktore-tesi honetan, Fanuc Arc Mate 100-iC (FANUC, Japonia) mahai finkoko sistema robotikorako postprozesatu da pieza.

Moldearen fabrikazioa 1,2 mm-ko diametrodun ER70S-6 altzairuzko hariaren ezarpenaren bidez egin da, aurreko esperimentazio osoan bezala. Oinarri-material gisara 8 mm-ko plaka lauak erabili dira eta 17 mm-ko Stick-outa ezarri da. Aukeratutako parametroak IV-16. taulan ikus daitezke.

*IV-16. taula. Horma fineko moldearen fabrikaziorako erabilitako parametroak*

| Geruza zenbakia | Modua | Job | WFR (m/min) | TS (mm/min) |
|---|---|---|---|---|
| 1-20 | Cold Arc | 194 | 5 | 500 |
| 20-30 | GMAW pultsatua | 9 | 5 | 500 |
| Gainontzekoak | GMAW pultsatua | 9 | 5 | 650 |

Ikus daitekeenez, lehenengo 20 geruzak Cold Arc funtzionamendu-moduarekin, 5 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin, 500 mm/min-ko aitzinamendu-abiadurarekin eta 1,6 mm-ko geruzako-hazkundearekin egin dira. Zipriztinen kopurua altua izan da, ordea eta ahokoa materialez bete da berehala, babes-gasa igarotzea oztopatuz eta ezarritako materialaren kalitatea desegokia bihurtuz. Beraz, GMAW pulsatu funtzionamendu-modura aldatzea erabaki da. Lortutako kordoiaren batez besteko zabalera eta beraz, fabrikatutako piezaren hormen zabalera 7,2 mm-koa izan da, mekanizatu ondoren helburu den pieza lortu ahal izateko beharrezko zabalera-mugen artean dagoena. Azkenik, erabilitako aitzinamendu-abiadura 650 mm/min-ra handitzea erabaki da eta geruzako hazkundea 1,3 mm-ra murriztu da. Piezaren fabrikazio osoan zehar ezarpen-tasa 2,66 kg/h-koa izan da eta IV-29. irudian fabrikatutako pieza ikus daiteke.

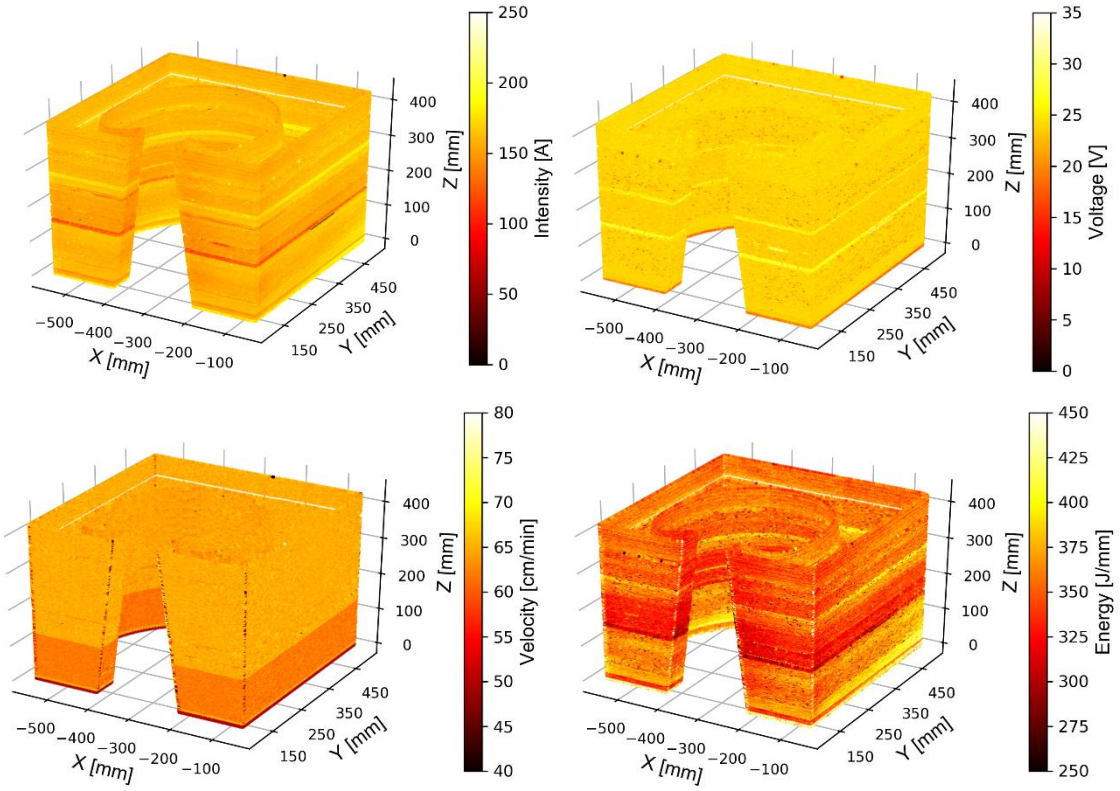


*IV-29. irudia. Horma fineko moldea ER70S-6 altzairuan fabrikatua*

Beraz, piezaren fabrikazioa bi funtzionamendu-moduren konbinazioarekin egin da eta ondorioz, materiala transferitzeko bi prozesu desberdinekin. Estrategia hori egokitzat jo da; izan ere, lehen geruzetan, Cold Arc moduak bero gutxiago sartu du oinarri-materialean, eragindako deformazioa murriztuz. Hala ere, modu honek zipriztin asko sortu dituela ikusi da eta ahokoa materialez azkar betetzen dela, babes-gasaren sarrera oztopatuz. Hori dela eta, Cold Arc funtzionamendu-

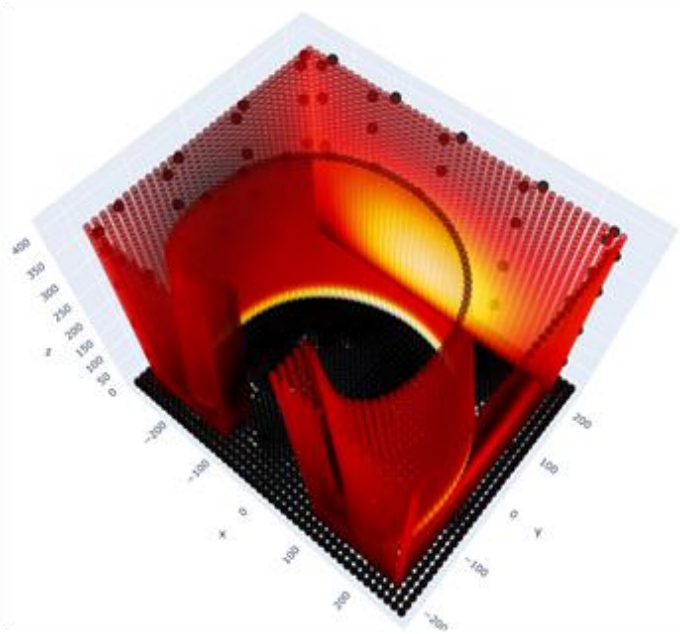
modua ezarpen-tasa oso baxuetarako bakarrik izango dela onuragarria ondorioztatzen da (pieza honetan jada bere aukeren goiko mugan gaude). Gainera, modu honetan aitzinamendu-abiadura txikiekin eta hariaren diametro txikiekin horma oso finak lortzea posible litzateke. Beraz, Cold Arc modua soilik zehaztasun geometriko handiko horma fineko (3-5 mm) piezak fabrikatzeko erabiliko da. Gainera, prozesu hau ez da oso produktiboa, eskuragarri dauden beste GMAW moduekin alderatuta.

Lehenengo 20 geruzen ondoren, GMAW pultsatu funtzionamendu-modua erabili da, zipriztin gutxiago sortuz baina bero-ekarpen handiagoa ezarriz. Horregatik, aitzinamendu-abiadura handitu egin da prozesuan hornitutako energia gutxitzeko eta piezaren kolapsoa saihesteko. IV-30. irudian, doktore-tesi honetan garatutako sistema robotikoaren bidez pieza hau fabrikatzean monitorizatutako datuen (intentsitatea, tentsioa eta aitzinamendu-abiadura) hiru dimentsiotako grafikoak ikus daitezke. Informazio horrek prozesuaren egonkortasunaren eta hornitutako energiaren deskribapen orokorra ematen du. Hornitutako energia 5. ekuazioaren arabera kalkula daiteke, intentsitatearen (I) eta tentsioaren (V) biderkadura aitzinamendu-abiaduraren (TS) bidez zatituz, J/mm-ko unitateetan adierazita.




*IV-30. irudia. Moldearen fabrikazioan monitorizatutako intentsitatea, tentsioa eta aitzinamendu-abiadura eta kalkulatutako energia*

Ondorio gisa, pieza honekin ikusi da horma finak dituzten piezak GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez fabrikatu daitezkeela baina bero-ekarpenaren kontrolak berebiziko garrantzia du piezen kolapsoa prebenitzeko eta piezaren eta oinarri-materialaren gehiegizko deformazioa ekiditeko. Kasu honetan, pieza honek ezarritako mugen barruan deformazio onargarri bat jasaten du, IV-31. irudiko Keytech (Keytech, Nafarroa) enpresak neurtutako puntuetan ikusten den bezala. Keytech enpresak behin fabrikatu ostean moldearen dimentsio errealak neurtu zituen eta hauek hasierako diseinuaren neurriekin alderatu ziren.



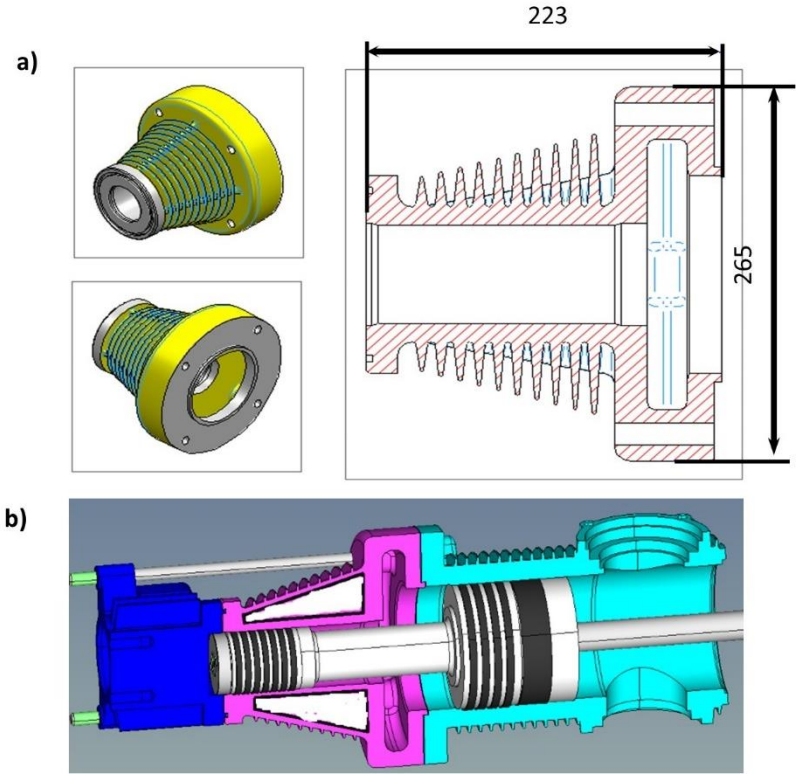
*IV-31. irudia. Piezaren kanpoko azaleko puntu neurtuak (puntu beltzak) eta moldearen forma teorikoa*

Era berean, fabrikazio jarraia, mota honetako piezetan aukera bat dela ondorioztatu da. Hala, ez dago hozte-denboren beharrik eta, beraz, prozesua askoz produktiboagoa bihurtzen da. Hala ere, aukera hori piezan sartzen den beroari lotuta egongo da beti eta horrek lotura estua du ezartzen den material kopuruarekin eta egin nahi den piezaren tamainarekin. Beraz, fabrikazio jarraia, oro har, egokia da ezarpen-tasa altuegia ez duten horma finak dituzten pieza handientzat.

### 3.4.2 Konpresore baten alabedun pieza eredua

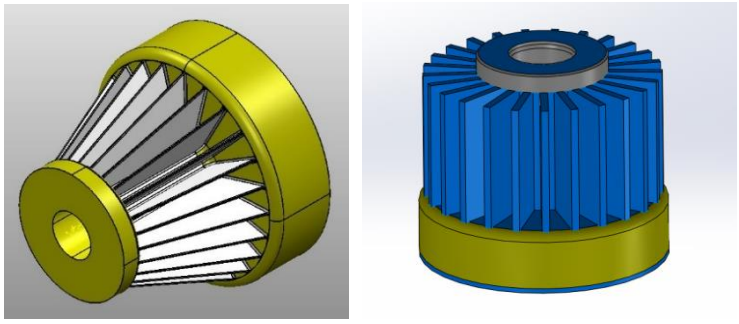
Balioztatze-pieza gisa, ABC compressors (ABC conpressors, Euskal Herria) konpainiaren ER70S-6 altzairuzko alabedun pieza fabrikatu da, GMAW

teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez. Pieza honen jatorrizko diseinua IV-32. irudian ikus daiteke.



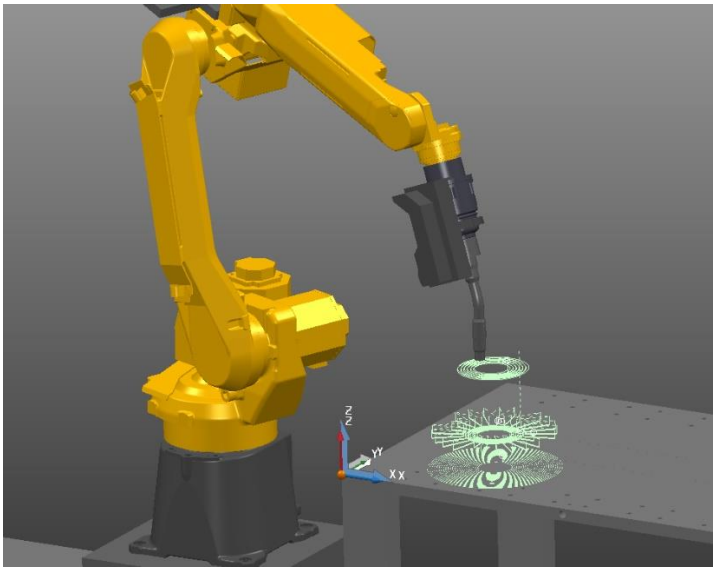

*IV-32. irudia. a) alabedun piezaren jatorrizko diseinua; b) alabedun piezaren muntaia (arrosaz dagoen pieza da alabedun pieza)*

Jatorrizko diseinutik hasita, pieza berriz diseinatu da, WAAM teknologiaren bidez erraz fabrikatu ahal izateko. Birdiseinua IV-33. irudian ikus daiteke (ezk.) eta diseinu hori WAAM bidez fabrikatutako aurreforma mekanizatu ondoren lortuko da. Hala, birdiseinu horretatik abiatuta, pieza WAAM teknologiaren bidez fabrikatzeko aurreforma sortu da, IV-33. irudian (esk.) ikus daitekeena. Aurreforma honen diseinuan ondorengo mekanizaziorako demasiak kontuan hartu dira eta oinarri-materiala piezaren zati izango dela erabaki da. Gainera, aurreforman pieza luzetarako alabeekin fabrikatzea erabaki da eta ondoren alabe hauek forma triangeluarrean mekanizatuko dira. Alabeak birdiseinuan bezalako forma triangeluarrarekin fabrikatzea baztertu da, materiala eta denbora aurreztu arren programazio-kostu handia ekarriko lukeelako. Piezaren altuera, guztira, 240 mm-koa da.



*IV-33. irudia. (Ezk.) Albedun piezaren birdiseinua WAAM teknologiarako; (esk.) alabedun piezaren aurreforma WAAM bidez fabrikatzeko*

Piezaren diseinua WAAM teknologiara egokituta dagoenean, ibilbideak eta ezarpen-sekuentzia zehazten dira. Alde batetik, beheko eraztunaren ibilbideak diseinatu dira, beste alde batetik, erdialdeko alabeenak eta azkenik, goialdekoak, IV-34. irudian ikus daitekeen bezala. Ibilbideak diseinatzeko PowerMill (Autodesk, Estatu Batuak) softwarea erabili da.



*IV-34. irudia. Alabedun balioztatze pieza fabrikatzeko sortutako ibilbideak*

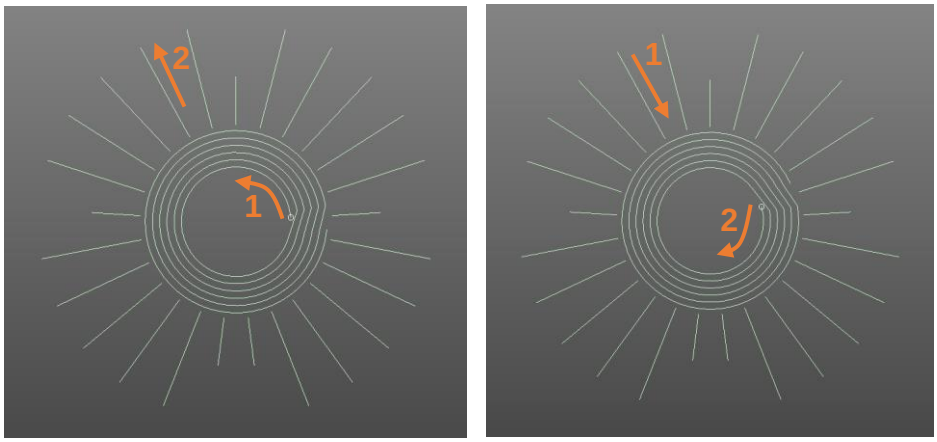
Oinarri-material bezala, piezaren zati izango den 30 mm-ko F114 altzairuzko plaka lau bat erabili da eta Stick-outa 17 mm-koa izan da. Gainera, GMAW (Job 9) pultsatu funtzionamendu-modua erabili da pieza osoan. Ezarpen-parametroei dagokienez, ahalik eta ezarpen-tasa altuenak lortu nahi direnez bustitze-angelu egokiarekin (30º inguru) eta gainjartze onargarriarekin baina prozesuan zehar gehiegizko bero-ekarpena izan gabe IV-17. taulan ikusten den parametro-multzoa aukeratu da.

Behealdeko eraztunari dagokionez, ezarpena modu jarraian egitea erabaki da, 195 mm-ko zabalera eta 70 mm-ko altuera duen eraztuna osatzeko zenbait

kordoi gainjarriz. Horrela, geruza bakoitza zirkulu gainjarri eta elkartuetan ezarriko da. Geruza bakoitzeko ezarpenaren ondoren, arkua itzali eta tenperatura jakin batera iritsi arte itxarongo da ($T_{itxaron}$) hurrengo geruza ezartzeko. Hau doktore-tesi honetan diseinatutako sistema robotikoarekin posible da tenperatura denbora errealean neurtzen duen pirometroaren seinaleak jasotzeari esker. Garatutako kontrolaren bidez, hala, itxaron beharko litzatekeen hozte-denbora kontrola daiteke.

Ezarpena barrutik kanpora egingo da beti, hau da, eraztunaren barneen dagoen zirkulutik kanporen dagoen zirkuluraino, beroa erdian pilatu ez dadin. Gainera, aitzinamendu-abiadura ere barrutik kanpora murriztuko da, erdian pilatutako beroaren ondorioz azkarrago joan beharko delako (IV-17. taula). Geruza horiek eraztunaren 40 mm-ko altuera osatu arte errepikatuko dira; izan ere, 30 mm-ko oinarri-materiala piezaren zati izango da, behar diren 70 mm-ak osatuz. Ibilbidearen programazio honetan, kordoi teorikoaren zabalera 7 mm-koa dela jotzen da eta gainjartzea, berriz, 4,5 mm-koa, ezartzen diren kordoien zabaleraren %65a.

Erdialdeko zatian, luzetarako alabeen eta erdiko eraztunaren fabrikazioa geruzaz geruza egiten da, IV-35. irudian ikusten den bezala. Lehenik, geruza bikoitietan, erdiko zilindroa egin da, barrutik kanporantz zirkuluak modu jarraian ezarriz eta kordoiak gainjarriz, behealdean egin den bezala. Jarraian, kordoi bakarreko alabeak ezarri dira, banan-banan, kordoiak barrutik kanpora eginez. Geruza bakoitietan, aldiz, lehenengo alabeak kanpotik barrura ezartzen dira eta ondoren barruko eraztuna burutzen da, hau ere barrutik kanpora ezarriz baina geruza bikoitien kontrako norantzan. IV-17. taulan ikus daitezke zati honetako zonalde ezberdinetan erabilitako parametroak. Kasu honetan, ez da itxaron-denborarik egon, ezarpenaren hasierako ezein puntutan ez baita lortzen jartzen zen itxaron-tenperatura.




*IV-35. irudia. Erdialdeko zatiko ibilbideak: (ezk.) geruza bikoitietako ibilbideak; (esk.) geruza bakoitietako ibilbideak*

Azkenik, goiko zatian, goiko eraztuna geruzaz geruza fabrikatzen da, geruza bakoitza modu jarraian ezarriz, barrutik kanporako zirkuluak lotuz, erdian bero gutxiago metatu dadin. Geruza horietan ere ez da hozte-denborarik izan.

*IV-17. taula. Alabedun balioztatze-piezaren fabrikazio parametroak*

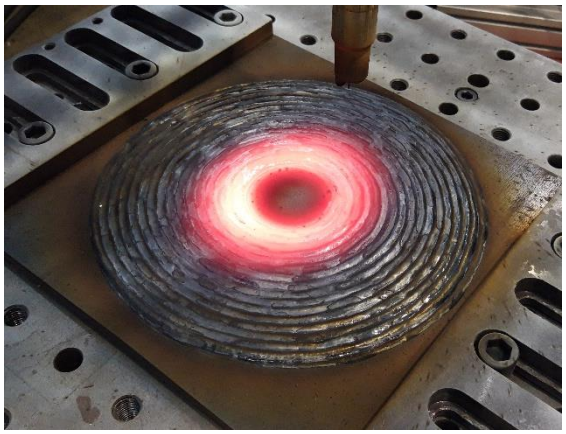
| | Zonaldea | WFR (m/min) | DR (kg/h) | TS (mm/min) | Geruzako hazkundea (mm) | $T_{itxaron}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Beheko zatia** | Barrukaldea | 13 | 6,92 | 1560 | 2 | 350 |
| | Erdialdea | 13 | 6,92 | 1440 | 2 | 350 |
| | Kanpokaldea | 13 | 6,92 | 1320 | 2 | 350 |
| **Erdiko zatia** | Barneko eraztuna | 13 | 6,92 | 1560 | 2 | - |
| | Alabeak | 10 | 5,33 | 1020/780 | 1,5 | - |
| **Goiko zatia** | - | 11 | 5,86 | 1320 | 1,5 | - |

IV-36. irudian, fabrikatutako pieza ikusten da. Azkenean, 240 mm-ko altuera lortzen du 123 geruza ingururekin. Pieza, fabrikatu ondoren, mekanizatu egin da helburu den geometria eta azken perdoiak lortzeko.



*IV-36. irudia. Fabrikatutako eta mekanizatutako alabedun pieza*

Pieza hau egin bitartean, arazorik handiena beroaren metaketa izan da, batez ere behealdeko zatiko erdiko zonaldean. Lehenik eta behin, beheko zati osoa modu jarraian fabrikatzen saiatu da, geruzen artean hozte-denborarik itxaron gabe 10 mm-ko lodierako oinarri-materialarekin. Metatutako beroa gehiegizkoa izan da (IV-37. irudia) eta, gainera, lodiera murritzeko oinarri-materialean materiala ezartzen saiatzean, oinarri-material hori guztiz deformatu da erdialdean, eta pieza fabrikatzea ezinezko bihurtu da. Arazoa konpontzeko, ezarpen-parametroak aldatu dira, hala nola, aitzinamendu-abiadura eta geruza bakoitzaren ondorengo hozte-denborak gehitu dira, fabrikazio ez jarraia egitea beharrezkoa izanez. Gainera, 10 mm-ko lodiera duen oinarri-materiala, piezaren zati izango den 30 mm-ko oinarri-material batez aldatzea erabaki da. Horregatik, balioztatze-pieza honekin, ezarpen-sekuentziak eta -estrategiak berebiziko garrantzia dutela, pieza mota honetan hozte-denborak beharrezkoak izango direla eta oinarri-materiala fabrikatu beharreko piezaren izaeraren arabera aukeratu behar dela argi geratu da.



*IV-37. irudia. Gehiegizko bero metaketa pieza 10 mm-ko lodierako oinarri-materialaren gainean fabrikatzean*

Azkenik, pieza honen fabrikazioan zehar, zati ezberdinetan geruza osoa ez da modu berean hazi eta beraz, ezarpen-betegarriak beharrezkoak izan dira.

Adibidez, erdiko zilindroa alabeak baino gehiago hazi da. Horregatik, behar izan denean alabe guztietan ezarpen-betegarriak egin dira barruko eraztunaren altuera berera iristeko. Esperimentazio honetatik ondorioztatzen denez, fabrikazio-estrategiaren arabera, piezak geruza bakoitzaren barruan hazkunde desberdineko eremuak izan ditzake. Hala, III. kapituluan diseinatu eta inplementatutako altuera kontrolak lagundu dezake arazo hau minimizatzen. Piezaren geruza guztietan hazkunde uniformea izateko, estrategia bakoitzaren geruzako hazkundea ondo parametrizatuta eduki beharko da pieza bat automatikoki fabrikatu ahal izateko. Kapitulu honetan, horma sinple baten geruzako hazkundea, horma gainjarri hirukoitz baten hazkundea eta ER70S-6 altzairuzko horma oszilatu baten hazkundea, 8 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarako eta 650 mm/min-ko aitzinamendu-abiadurarako (oszilazio-estrategiaren kasuan, hau da abiadura erresultantea kontsignatua 200 mm/min izan arren) parametrizatu dira. Beste material eta ratio (WFR eta TS arteko erlazioa) batzuentzako hazkunde hori karakterizatu beharko litzateke.

## 4 Ondorioak

Kapitulu honetan GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua garatzeko ER70S-6 altzairu gozoan egindako esperimentazio guztia azaldu da. Esperimentazioa altzairu zehatz batean egin bada ere, emaitza orokorrak, emaitza metalurgikoak eta propietate mekanikoenak izan ezik, beste material ferriko batzuetara estrapola daitezke. Zehazki, emaitza horien artean parametroak eta erabilitako metodo esperimentala daude.

ER70S-6 altzairu gozorako ondorio zehatz bat, ezarritako materialaren gainazalean silizio oxidozko geruza bat sortzen dela da, “cascarilla” deritzona eta eroalea ez denez soldadura-arkua pizteko arazoak sortzen dituena. Hori da material mota horren desabantailarik handiena, eta GMAW teknologian oinarritutako WAAM bidezko fabrikazio gehigarrirako altzairu mota hori erabiltzeko, komenigarria da hurrengo geruza ezarri aurretik, prozesuan hau ezabatzeko sistemaren bat sartzea.

ER70S-6 altzairuan burututako esperimentazioa hiru zatitan banatu da. Lehenengoan, kordoi sinpleak fabrikatu dira ER70S-6 altzairuan, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren parametro nagusien eragina eta altzairuentzako funtzionamendu-moduak aztertzeko. Hona hemen ateratako ondorio nagusiak:

- Batez besteko intentsitate balioa linealki handitzen da hariaren elikatze-abiadurarekin, eta, aldiz, tentsioa balio konstante batetik gertu geratzen da. Horrek sistema sinergikoaren funtzionamendua esperimentalki berresten du. Stick-outak aldiz, batez besteko intentsitatearen balioari eragiten dio, nahiz eta soldadura-iturri sinergikoa izan. Zenbat eta handiagoa izan Stick-outa, intentsitatea orduan eta txikiagoa izango da. Tentsioa, aldiz, konstante mantentzen da Stick-outaren aldaketen aurrean. Horrek III. kapituluan, altueraren kontrola garatzeko, zehatz-mehatz aztertutako Stick-outaren eragina berresten du.
- Alde batetik, ikusi da, aitzinamendu-abiadura bererako, hariaren elikatze-abiadura gehitzean luzera-unitateko hornitutako energia handiagoa dela. Hori gertatzen da hariaren elikatze-abiadura gehitzean intentsitatea linealki hazten delako. Bestalde, hariaren elikatze-abiadura berarekin, aitzinamendu-abiadura aldatzean, ez du inolako eraginik intentsitatean eta tentsioan, baina bai luzera-unitateko hornitutako energia instantaneoan eta ondorioz, lortutako kordoiaren forman (zabalera eta altuera).
- Force Arc moduak penetrazio eta diluzio handiagoko kordoiak lortzen ditu presio altuko arku elektrikoari esker. Kontrakoa gertatzen da Cold Arc moduarekin: ezarpen-tasa baxuekin eta bero-ekarpen txikiekin sakonera txikiko penetrazioak eta diluzio txikiak lortzen ditu. Ondorioz, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesurako ez da gomendatzen lehen geruzatik harago Force Arc modua erabiltzea; izan ere, presio handiko arku elektrikoarekin gehiegizko penetrazioak lortzen dira eta piezaren kolapsoa ekar dezake. Bestalde, Cold Arc modua soilik zehaztasun geometriko handiko horma fineko (3-5 mm) piezak fabrikatzeko erabiliko da. Azkenik, GMAW pultsatu funtzionamendu-modua egokia da WAAM teknologiarako.
- ER70S-6 altzairuzko soldadura-kordoietan, ferrita azikularrezko mikroegitura sortzen da kasu guztietan. Mikroegitura hori oso ohikoa da altzairu gozoetan, soldadura-prozesuen hozte-abiadura azkarrengatik.

Bigarrenik, WAAM bidez fabrikatutako ER70S-6 altzairuzko horma sinple bat metalurgikoki eta geometrikoki aztertu da eta hauek dira ondorio nagusiak:

- ER70S-6 altzairuz egindako horma sinpleetan lortutako mikroegiturari dagokionez, ferrita poligonaleko mikroegitura komun bat hautematen da ondorengo geruzak ezartzean termikoki eragindako eremuetan. Aldiz, hurrengo geruzen beroa iritsi ez den eremuetan ferrita azikularreko egitura lortzen da.

- Erabilitako sistema robotikoan (III. kapituluan diseinatua), eskaner laserrak jasotako informazioari esker, horma sinple baten geruzako-hazkundea eta mekanizatu ondoren izango den horma efektiboa jakin daitezke.

Hirugarrenik, ezarpen-estrategien eragina karbono gutxiko altzairuzko hormetan (ER70S-6) ikertu da. Aztertutako bi estrategiak hiru kordoi linealen gainjartze-estrategia eta oszilazio-estrategia izan dira. Prozesuaren hainbat alderdi eta parametro alderatu dira, horietako bakoitzaren abantailen eta desabantailen ideia argi bat izateko. Hona hemen alderaketa horretatik ateratako ondorio nagusiak:

- GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua egokia da ER70S-6 altzairuzko akatsik gabeko piezak fabrikatzeko, aztertutako bi estrategiak erabiliz.
- Kontrol-bolumenaren barruan horma oszilatuan material gehiago ezartzen bada ere, geruzaren batez besteko hazkunde bolumetrikoa txikiagoa da. Izan ere, energia eta bero gehiago pilatzen da oszilazio-estrategiaren kasuan eta horrek materialaren penetrazio handiagoa eragiten du aurretik dagoen geruzan. Beraz, nahi diren hormak fabrikatzeko, geruza gehiago behar dira horma oszilatuan.
- Hozte-denborak (hurrengo geruza ezarri aurretik horma nahi den tenperaturara iritsi arteko denbora); laburragoak dira horma oszilatuan izan ere, horma horretan bero-ekarpena handiagoa bada ere, bero hori aldi berean sartzen da. Ondorioz, produktibitatea handiagoa da oszilazio-estrategian, baita geruza gehiago ezartzea beharrezkoa bada ere.
- Bi hormetan ezarpen-sekuentzia eta -ibilbide desberdinak direla eta sortzen diren ziklo termiko desberdinen ondorioz, horma oszilatuan eta horma gainjarrian mikroegitura guztiz desberdinak lortzen dira. Gainjarritako horman argi eta garbi ikusten da ezarritako kordoi bakoitza eta mikroegitura heterogeneoa lortzen direla, ferrita poligonal eta ferrita azikular eremuak tartekatuta. Ferrita azikular hori hurrengo geruzaren bero-ekarpena iristen ez den lekuetan agertzen da, esaterako, hormaren goiko aldeko azken geruzan. Bestalde, horma oszilatuan ere, azken geruzan ferrita azikularra agertzen da arrazoi beragatik. Hormaren gainerako zatian, geruza bakoitzaren ezarpenari dagozkion bandak ikusten dira eta ferrita poligonal homogeneozko mikroegitura bat lortzen da. Kasu honetan, jasandako bero-metaketaren ondorioz ale tamaina handiagoa da gainjarritako horman baino.

- Gogortasuna eta mikroegitura estuki lotutako propietateak dira. Ondorioz, gogortasun balio handiagoak lortzen dira bi hormen goialdean, non ferrita azikularrezko mikroegitura dagoen. Hala, horma gainjarriaren gogortasun balioak, horma oszilatuarenak baino handiagoak dira, mikroegituraren heterogeneotasuna dela eta.
- Fabrikatutako bi hormetan propietate mekaniko isotropikoak lortzen dira; hau da, norabide bertikalean eta horizontalean propietate mekanikoak antzekoak dira. Gainjarritako horman, UTS eta YS balioak horma oszilatuan baino handiagoak dira, lortutako ale-tamaina txikiagatik. Hau, alea fintzearen ondoriozko gogortze mekanismo baten adibide on bat da. Lortutako elongazioari dagokionez, gainjarritako hormaren kasuan, txikiagoa da. Horma horretan, zehazki, elongazioaren kasuan, norabidearen araberako emaitzak lortu dira, norabide bertikalean balio txikiagoak direlarik. Oszilazio-estrategiak balio homogeneoagoak ditu bi norabideetan, kordoien banaketa homogeneoagoa delako. Inpaktuaren azterketari dagokionez, Charpy entseguek antzeko emaitzak erakusten dituzte, bai estrategia gainjarrian, bai oszilatuan.
- Hala ere, bi estrategien bidez fabrikatutako hormen propietate mekanikoetan lortzen diren diferentzia txikiak alde batera utzita, balio hauek aldez aurreko literaturan GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez fabrikatutako ER70S-6 altzairuzko hormetan lortutako eta II. kapituluko 5.1 atalean adierazitako balioen antzekoak dira. Aldiz, hariaren hornitzaileak material soldatu horretarako aurrez definitutako balio mekanikoak baino apur bat txikiagoak lortzen dira.
- Goiko geruzako lautasuna hobetu egiten da oszilazio-estrategiaren erabilerari esker. Gainjarritako horman, erdiko aldean, horma gehiago hazten dela ikusi da eta horrek lautasunaren balioa okertzen du. Hala, gainazal akaberak lortzeko mekanizazio prozesuari eragiten dio.
- Azkenik, hormaren geometriaren azterketa garrantzitsua da, lortutako horma eraginkorra zehazten duelako eta piezen azken mekanizazioan eragin dezakeelako. Horma oszilatuak lautasun handiagoa eta profil parabolikoa du eta ia simetrikoa da, geometrian homogeneotasun handiagoa lortuz. Oszilazio-estrategia erabiltzeak materiala hobeto aprobetxatzea ahalbidetzen du, ondorengo mekanizazioan kostu txikiagoa lortuz.

Gainera, lortutako emaitzak balioztatzeko, azkenik, bi balioztatze-pieza erreal eta tamaina handiko fabrikatu dira ER70S-6 altzairuan, WAAM teknologia eta aurreko kapituluan garatutako sistema robotikoa erabiliz, aztertutako parametro

guztiek egitura konplexuagoetan duten eragina ikusteko. Egindako azterketan frogatu da WAAM teknologian bero-ekarpena parametro kritikoa dela, prozesuaren zenbait alderditan duen eraginagatik, hala nola, mikroegituran. Egindako balioztatze-piezetan ere parametro kritikoa izan da.

Alde batetik, ikusi da horma fineko piezak GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez fabrikatu daitezkeela, modu jarraian (hozte-denborarik gabe). Hala ere, bero-ekarpenari arreta handia jarri behar zaio piezen kolapsoa prebenitzeko eta gehiegizko deformaziorik ez izateko, ez oinarri-materialean, ez piezan bertan ere. Kasu honetan, fabrikatutako horma fineko balioztatze-piezak deformazio onargarria jasaten du ezarritako mugen barruan. Gainera, ezarpen jarraiari esker, prozesua askoz produktiboagoa bihurtu da. Hala ere, ezarpen mota hau ezarpen-tasa altuegia ez duten eta horma finak dituzten pieza handientzat mugatuta dago, gainerako piezetan beroaren gehiegizko metaketaren ondorioz.

Bestalde, kapitulu honetan balioztatze-pieza gisa fabrikatutako konpresore baten alabedun pieza ezingo litzateke inoiz ezarpen-estrategia jarraiarekin fabrikatu, bero-ekarpena gehiegizkoa baita eta piezaren kolapsoa eta oinarri-materialaren gehiegizko deformazioa sortzen baitira. Pieza hau egin bitartean, arazorik handiena bero-metaketa izan da, batez ere, behealdeko zatiaren erdialdean. Arazoa konpontzeko, ezarpen-parametroak aldatu dira, hala nola, aitzinamendu-abiadura eta geruza bakoitzaren ondorengo hozte-denborak gehitu dira, fabrikazio ez jarraia egitea beharrezkoa izanez. Gainera, lodiera handiko oinarri-material bat ere aukeratu da, piezaren zati izango dena, materialaren ezarpenak oinarri-materiala gehiegi deformatu ez dezan. Horregatik, balioztatze-pieza honekin argi geratu da ekarpen-sekuentziak eta -estrategiak berebiziko garrantzia dutela, pieza mota horietan hozte-denborak beharrezkoak izango direla eta oinarri-materiala fabrikatu beharreko piezaren izaeraren arabera aukeratu beharko dela.

Azkenik, esperimentazio horretatik ondorioztatzen da, piezaren zati bakoitzaren fabrikazio-estrategiaren arabera, piezak hazkunde desberdinak izan ditzakeela geruza beraren barruan. Neurri batean, altuera kontrolak arazo hori kontrolatzen lagun dezake baina geruzen barruan hazkunde uniformea izateko, ezarpen-estrategia bakoitzaren hazkundea *a priori* jakitea garrantzitsua izango da pieza bat automatikoki fabrikatu ahal izateko.

Emaitza horiek guztiak artikulu hauetan argitaratu dira: [Aldalur, 2020-a], [Aldalur, 2020-b] eta [Casuso, 2021].

# ***V. KAPITULUA***

# V. KAPITULUA: GMAW TEKNOLOGIAN OINARRITUTAKO WAAM PROZESUA: 5356 ALUMINIO-ALEAZIOA

## 1 Sarrera

Kapitulu honen helburu nagusiak, III. kapituluan diseinatutako sistema robotikoaren bidez 5356 aluminio-aleazioan egindako esperimentazio guztia biltzea eta material honetarako WAAM prozesua garatzea dira. Horretarako, lehenik eta behin, 5356 aluminio-aleaziorako Titan XQ 400 AC puls (EWM, Alemania) soldadura-iturriaren funtzionamendu-modu desberdinak aztertuko dira: GMAW pultsatua, Cold Arc eta AC pultsatua. Arestian aipatu bezala, Force Arc modua WAAM teknologiarako baztertu da eta horregatik ez da kapitulu honetan landuko. Ezer baino lehen, aipatutako hiru funtzionamendu-moduak aztertzeko, kordoi sorta bat egingo da, hiru moduekin horma sinpleak egiteko parametro optimoak zehazteko. Gainera, sorta honek kordoien zabalera- eta altuera-ereduak diseinatzeko ere balio izan du. Hiru horma sinpleak geometriaren, mikroegituraren eta porositatearen ikuspegitik aztertuko dira. Bigarrenik, material horretan fabrikatutako horma gainjarri baten mikroegitura eta propietate mekanikoak aztertuko dira. Azkenik, lortutako emaitzak balioztatzeko, bi balioztatze-pieza fabrikatuko dira.

## 2 Materialak eta metodoak

### 2.1 Materialak

Kapitulu honetan, 5356 aluminio-aleazioan (Al-Mg) GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren analisia egin da. Aleazio hori bereziki material erakargarria da bere propietate mekaniko onargarriengatik eta korrosioarekiko duen erresistentzia handiagatik. Hala ere, pisuan %2-4 arteko Mg balioak dituzten Al-Mg aleazioak soldadura prozesuetan beroan pitzatu daitezke [Horgar, 2018].

Aluminioa komertzialki ekoitzitako hari (EN ISO 18273: S AL5356) moduan sartu da prozesuan, 1,2 mm-ko diametroarekin. Hari honen konposizioa V-1. taulan ikus daiteke. Esperimentazioan zehar, 15 mm eta 30 mm-ko 5083 aluminio-aleaziozko plaka lauak erabili dira oinarri-material gisara eta edozein ezarpen prozesu hasi aurretik, oinarri-materiala leundu eta garbitu egin da, oxidoak eta ezpurutasunak ezabatzeko.

*V-1. taula. Al5356 hariaren konposizioa pisuan (%)*

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

Argona da WAAM teknologiaren bidez aluminio-aleaziozko piezak fabrikatzeko babes-gas estandarra, nahiz eta ikerketa batzuek helburu bererako nitrogeno gasa ere proposatu duten [Li, 2020-b]. Doktore-tesi honetan, aluminio-aleazioetarako %99,99 Ar gasa erabiltzen da 30 l/min-ko emariarekin eta Stick-outa 15 mm-tan finkatzen da.

## 2.2 Ekipamendua

Kapitulu honetan egindako esperimentazio osoan erabiliko den ekipamendua III. kapituluan garatu eta zehaztu dena da.

## 2.3 Aluminio-aleazioetarako GMAW funtzionamendu-modu sinergikoen analisia: Kordoiak eta horma sinpleak

Lan egiteko moduak ezaugarritzeko helburuarekin, hainbat entsegu egin dira kordoi bakarretan. Horretarako, soldadura-iturri sinergikoko hiru funtzionamendu-modu alderatzen dira: GMAW pultsatua, Cold Arc eta AC pultsatua. Horretarako, funtzionamendu-modu bakoitzarekin kordoi bakarren sorta bat eta horma sinple bat fabrikatu dira. Esperimentazio hau 15 mm-ko 5083 aluminio-aleaziozko oinarri-materialean egin da.

Kordoi bakarren sorta egiteko erabilitako parametroak V-2. taulan ikus daitezke, ratioa hariaren elikatze-abiaduraren eta aitzinamendu-abiaduraren arteko erlazioa delarik. Kontuan hartu behar da 5000 aluminio-aleazio familiarako hariaren elikatze-abiaduraren balioa 1,5 m/min eta 22 m/min artean alda daitekeela GMAW (Job 76) pultsatu moduan, 3 m/min eta 8 m/min artean Cold Arc moduan (Job 56) eta 2 m/min eta 12 m/min artean AC (Job 392) pultsatu moduan. Beraz, kordoi bakarreko sortarako aukeratutako hariaren elikatze-abiadurak (4 m/min eta 8 m/min) hiru moduen muga posibleen artean daude. Gainera, 4 aitzinamendu-abiadura maila ere aukeratu dira, 4, 7, 10 eta 12-ko ratioak lortuz.

*V-2. taula. Kordoi bakarreko sortaren fabrikazio-parametroak alderatutako hiru funtzionamendu-moduetarako: GMAW pultsatua, Cold Arc eta AC pultsatua*

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

* Hormen fabrikazio-parametroak

Bestalde, funtzionamendu-modu bakoitzarekin kordoi bakarreko horma bat ere fabrikatu da, 80 mm luzekoa eta 50 mm altu dena. Horma horietan, ezarpena bi noranzkokoa izan da, hau da, elkarren segidako geruzak kontrako noranzkoetan ezarri dira. Aurreko taulako zortzigarren kordoiaren parametroak horma horiek egiteko aukeratzen dira, geruzen arteko hozte-denborarik behar izan ez delarik. Hozte-denbora hauek soldadura-zuzian jarritako pirometroari esker zehaztu daitezke, hurrengo geruzaren ezarpena abiatzen den puntuan 250 ºC lortu arte itxaronez. Hala ere, aluminioak beroa barreiatzeko duen ahalmen handiari esker, tenperatura hori horma hauetan azkar lortu da eta beraz, ez da hozte-denborarik behar izan.

Kordoi bakarreko sortaren fabrikazioan zehar, kordoi bakoitza fabrikatu ostean III. kapituluan aipatutako set-upa osatzen duen eskaner laserraren bidez eskaneatu da, hauen forma geometrikoa zehazteko. Laserrak eskaneatze-prozesuan sortzen dituen profilen artetik, kordoi bakoitzean bederatzi aukeratzen dira. Hala, kordoien zeharkako forma geometrikoa irudikatzen duten puntu-hodeiak lortzen dira. Profil horietako bakoitzetik altuera eta zabalera kalkulatu daitezke eta gero batez besteko balioak lortu. Gainera, horma sinpleak fabrikatzean ere, geruza bakoitza ezarri ondoren hormak eskaneatu egin dira geruzako hazkundea determinatzeko.

## 2.4 Mikroegituraren eta propietate mekanikoen analisia: Horma gainjarria

Lehenengo, 5356 aluminio-aleazioan horma gainjarria fabrikatzeko prozesuari ekiteko, 5083 aluminio-aleaziozko 15 mm-ko oinarri-materiala lotu zaio soldadura-mahaiari. Egindako hormaren luzera 220 mm-koa izan da eta GMAW (Job 76) pultsatu funtzionamendu-modua erabili da.

Horma hori hiru kordoi gainjarrita eta oinarri-materialaren gainean 60 geruza ezarrita fabrikatu da. Kordoien arteko gainjartzea zabaleraren %65-ekoa izan da (8,255 mm) eta ekoizpenean zehar, geruza jarraiak kontrako norantzan ezarri dira, geometria konpentsatu ahal izateko eta tolerantzia geometrikoa ez galtzeko. Gainjarritako horma egitean elkarren segidako kordoien artean, denbora-tarte bat itxaron da piezan gehiegizko bero-ekarpenik ez izateko. Kasu honetan, 50 s.

Gainera, horma honentzat parametro-multzo egokiena aukeratu da ezarpen-tasak ahalik eta handienak izateko, penetrazio eta bustitze-angelu egokiarekin baina bero-ekarpen handiegirik izan gabe. Geruza bakoitzerako hariaren elikatze-abiadura desberdinak zehaztu dira (V-3. taula) eta 800 mm/min-ko aitzinamendu-abiadura komuna ezarri da.

*V-3. taula. Horma gainjarriaren fabrikazio-parametroak*

| Geruza zbk. | WFR (m/min) | DR (kg/h) | Gainjartzea (%) | Geruzako hazkundea (mm) | Itxaron-denbora (s) |
|---|---|---|---|---|---|
| 1-2 | 16 | 2,89 | 65 (8,22 mm) | 1,5 | 50 |
| Gainontzekoak | 12 | 2,17 | 65 (8,22 mm) | 1,5 | 50 |

Azkenik, geruza bakoitzaren forma geometrikoa monitorizatzeko geruza bakoitza ezarri ondoren eskaner laserraren bidez eskaneatu da. Hain zuzen ere, bi geruzatik behin eskaneatu da, uste izan baita informazio hori nahikoa dela kordoien hazkundea ezaugarritzeko.

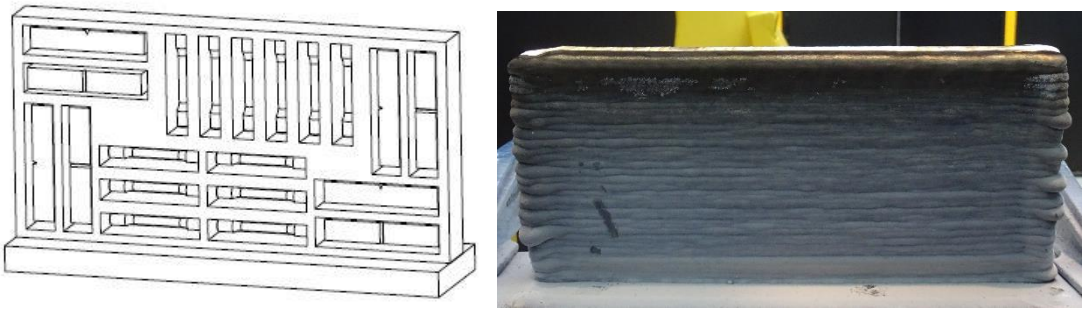
## 2.5 Karakterizazio metalurgiko eta mekanikorako metodoak

5356 aluminio-aleazioaren analisi metalurgikoari dagokionez, lehenik eta behin, horma sinpleak, horma gainjarria eta soldadura-kordoiak zeharka ebakitzen dira hauen erdialdean, ondoren mekanikoki leuntzeko. Jarraian, alea errebelatzeko Barkerren eraso elektrolitikoa egiten da, 14 V aplikatuz 120 segundoan. Laginak prestatu ondoren, makrografiak eta mikrografiak Nikon Eclipse MA200 (Nikon Metrology Inc, Belgika) mikroskopioaren bitartez ateratzen dira.

Gainera, horma sinpleen erdiko zatietan Electron Back-Scattered Diffraction, EBSD analisia egiten da, EDX Oxford INCA X-act detektagailu batekin eta Tetra

Oxford Instruments, Erresuma Batua) detektagailu batekin ekipatutako SEM JSM-5910LV (JEOL Ltd., Japonia) mikroskopio baten bidez. Azkenik, horma hauetako porositatea erasotu gabeko laginen mikrografietan neurtzen da, irudiak prozesatzeko programa bat erabiliz. Programa honek argazkien hainbat eremu koloreztatzen ditu (poroak eta gainerako materiala) eta eremu bakoitzaren kolorearen arabera, fabrikatutako piezen porositatea neurtzen du.

Vickers gogortasunaren neurketak giro-tenperaturan egiten dira, Duramin A-300 (Struers, Danimarka) makina erabiliz, ISO 6507-1 [UNE- en ISO 6507-1] arauaren arabera. Bestalde, trakzio-saiakuntzarako probeten neurriak ISO 6892-1 [UNE-EN ISO 6892- 1] arauaren araberakoak dira. Trakzio-saiakuntza hau, giro-tenperaturan, trakzio uniaxialeko Instron 5585H makinan (Instron, Estatu Batuak) egiten da, gehienez 100 kN-ko karga duena eta ukipen-estentsometro batez hornitua (Instron EX2620-602, Instron, Estatu Batuak). Azkenik, Charpy entseguak giro-tenperaturan egiten dira inpaktua probatzeko pendulu bat duen Ibertest PIB300 makinan (Ibertest, Espainia), ISO 148-1 [UNE-EN ISO 148-1] arauari jarraituz. Horma honetako probeten banaketa V-1. irudian ikus daiteke.



*V-1. irudia. (ezk.) Horma gainjarrian probeten banaketa; (esk.) fabrikatutako horma*

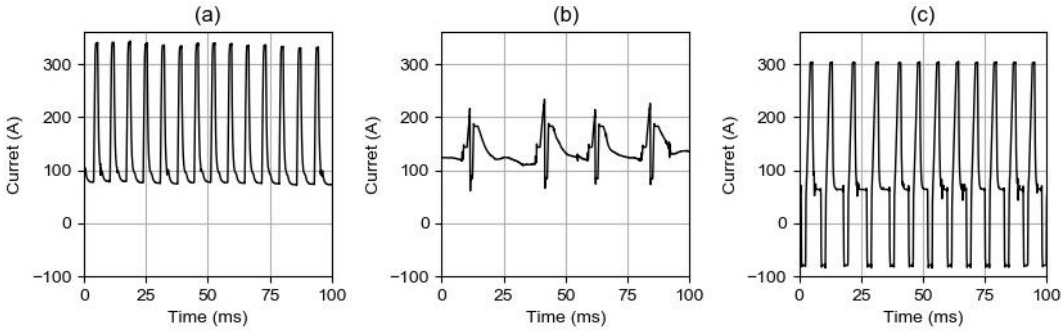
# 3 Emaitzak eta eztabaida

## 3.1 Aluminio-aleazioentzat funtzionamendu-modu sinergikoak

Aurrez aipatu bezala, funtzionamendu-moduaren arabera, GMAW soldadura-iturri sinergikoek uhin forma ezberdinekin intentsitate-seinaleak sartzen dituzte elikatze harian. Intentsitate-seinalearen ezaugarriak ez dira soilik aukeratutako funtzionamendu-moduaren araberakoak, materialaren, babes-gasaren eta hariaren diametroaren araberakoak ere badira. Horrela, funtzionamendu-modua eta lehen aipatutako aldagaiak ezarrita, hariaren elikatze-abiaduraren araberakoa baino ez du izango intentsitate-seinalea. Bestalde, tentsioa

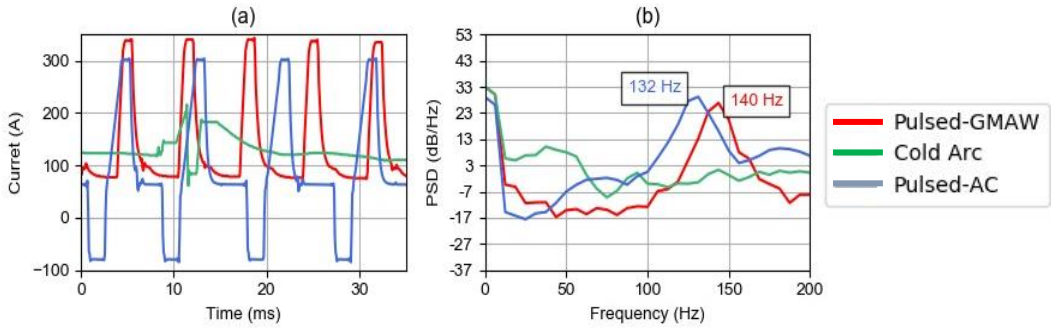
intentsitateak ezartzen du eta pultsatua den arren, balio konstante batetik gertu mantentzen da.

Zehazki, 5356 aluminio-aleaziorako, GMAW pultsatua, Cold Arc eta AC pultsatua funtzionamendu-moduen intentsitate-seinaleak V-2. irudian ikus daitezke, %100 Ar babes-gasa, 1,2 mm-ko hariaren diametroa eta 8 m/min-ko hariaren elikatze-abiadura erabilita. Seinale horiek III. kapituluan deskribatutako maiztasun handiko eskuratze-sistemaren bidez jasotzen dira.




*V-2. irudia. WFR=8 m/min-rekin intentsitate-seinaleak: a) GMAW pultsatua, b) Cold Arc eta c) AC pultsatua*

Hiru funtzionamendu-moduen seinaleak, elkarren artean magnifikatuak eta gainjarriak, V-3 a. irudian ikus daitezke. Hiru seinaleak erabat ezberdinak dira. GMAW pultsatuaren eta Cold Arc-aren seinaleek balio positiboak baino ez dituzte, AC pultsatuaren seinaleak, aldiz, polaritate aldakorra du. Gainera, V-3 b. irudian grafikatutako potentziaren dentsitate espektraletik (Power Spectral Density, PSD) abiatuta, pultsatutako GMAW seinalearen maiztasuna 140 Hz-koa dela ondoriozta daiteke eta AC pultsatuarena, berriz, 132 Hz-koa. Cold Arc seinaleak, bestalde, tantaren eraketaren arabera, izaera periodikorik ez duen eta pultsuak dituen seinale bat sortzen du eta seinale honetan maiztasuna ez da parametro neurgarri bat. Hala ere, argi dago Cold Arc intentsitate-seinaleak beste biek baino pultsu gutxiago dituela denbora tarte berean, hau da, batez besteko maiztasuna besteena baino txikiagoa da.




*V-3. irudia. (a) GMAW pultsatu, Cold Arc eta AC pultsatu moduetako intentsitate-seinaleak gainjarrita; (b) hiru moduetako maiztasun-seinaleak gainjarrita*

## 3.2 Transferitutako tanten tamainaren azterketa

Aipatu bezala, intentsitate-seinale pultsatuak erabiltzearen arrazoia pultsu bakoitzean, hariaren material tanta bat sortu eta bainu urtura transferitzen dela da, materialaren transferentzia kontrolatuagoa lortuz (III-6. irudia). V-3 a. irudian ikus daitekeenez, intentsitate-pultsuen forma desberdina da funtzionamendu-moduaren arabera eta beraz, pultsu bakoitzean haritik bainu urtura transferituko tanten bolumena ere desberdina izango da. Bolumen hori 14. ekuazioaren arabera kalkula daiteke, non WFR hariaren elikatze-abiadura den, f intentsitate-seinalearen maiztasuna eta $A_w$ hariaren zeharkako sekzioa.

$$Transferitutako\ tanten\ bol. = \frac{WFR * A_w}{f}$$

non,

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

Modu bakoitzean transferitutako tanten bolumenak V-4. taulan aurkitu daiteke. Ondorio nagusia tanta bolumen handiena Cold Arc moduan lortzen dela da. Hiru moduetan aldi berean material kopuru bera sartzen denez, Cold Arc moduan tanta gutxiago baina handiagoak transferitzen dira, modu honetan denbora tarte berean intentsitate-seinalean pultsu gutxiago sortzen baitira.

## 3.3 Aluminio-aleazioetarako GMAW funtzionamendu-modu sinergikoen analisia: kordoi bakarren sorta

### 3.3.1 Bero-ekarpenaren analisia *(Heat input, HI)*

Maiztasun handiko eskuratze-sistemak intentsitate- eta tentsio-seinaleak erregistratu zituen kordoi bakarren fabrikazioan. Seinale horiek, V-4. taulan ikus daitezkeen intentsitate- eta tentsio-balioak, I (A) eta V (V), kalkulatzeko integratzen dira. Metodologia hori erabiltzen da, funtzionamendu-moduaren arabera intentsitate- eta tentsio-seinaleen pultsuak desberdinak direlako, 3.1 sekzioan ikus daitekeen bezala.

*V-4. taula. Hiru funtzionamendu-moduen bidez fabrikatutako kordoi bakarretarako, hariaren elikatze-abiadura maila bakoitzerako intentsitatearen, tentsioaren eta transferitutako tanten bolumenaren balioak*

| | **Funtzionamendu-moduak** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **GMAW pultsatua** | | | **Cold Arc** | | | **AC pultsatua** | | |
| **WFR (m/min)** | ***I* (A)** | ***V* (V)** | **Tanta bol. ($mm^3$)** | ***I* (A)** | ***V* (V)** | **Tanta bol. ($mm^3$)** | ***I* (A)** | ***V* (V)** | **Tanta bol. ($mm^3$)** |
| **4** | 65,9 | 15,3 | 1,033 | 67,9 | 13,5 | 1,839 | 70,36 | 13,7 | 1,32 |
| **8** | 136,7 | 18 | 1,077 | 136,8 | 15,3 | 3,208 | 128,3 | 16,6 | 1,14 |

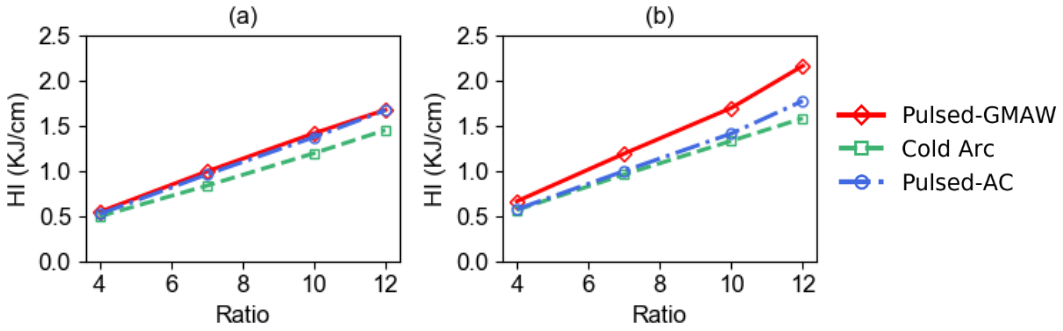
Gainera, bero-ekarpena (*Heat Input, HI*) jarraian ikus daitekeen 15. ekuazioaren bidez kalkulatzen da:

$$HI = \frac{\eta * \sum_{i=1}^{n} \frac{I_i * V_i}{n}}{TS} \quad (15)$$

non, $I_i$ (A) eta $V_i$ (V) intentsitate eta tentsio balio instantaneoak diren, TS aitzinamendu-abiadura da eta η arkuaren eraginkortasun termikoaren balioa. Arkuaren eraginkortasun termikoaren balioa 0,8 eta 0,9 artean definitu da aurreko literaturan [Cong, 2017] [Su, 2019]. Kasu honetan, 0,9 balioa eman zaio. V-4. taulan ikus daitekeen bezala, aitzinamendu-abiadura balio desberdinetarako eta ondorioz, ratio ezberdinetarako, intentsitate- eta tentsio-balio antzekoak lortzen dira hariaren elikatze-abiadura maila eta funtzionamendu-modu bakoitzerako. Izan ere, 3.1 atalean azaldu den bezala, behin funtzionamendu-modua, materiala, hariaren diametroa eta babes-gasa ezarrita, intentsitate-seinalea hariaren elikatze-abiaduraren araberakoa da soilik. Ondorioz, sistema sinergikoarekin, 4 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarako intentsitatea 8 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarakoa baino txikiagoa dela adieraz daiteke.

Gainera, hiru funtzionamendu-moduetan ratioa handitzean, V-4. irudian ikus daitekeen bezala, luzera-unitateko bero-ekarpena ere handitzen da, aitzinamendu-abiadura motelagoa delako. Azkenik, nahiz eta fabrikazio-parametro berberak erabiltzen diren hiru funtzionamendu-moduetan, kasu bakoitzean bero-ekarpena pixka bat desberdina da. GMAW pultsatuak bero-ekarpen altuena du (V-4. irudia), V-3 a. irudian ikus daitekeen bezala, gailur-intentsitate eta maiztasun altuena dituelako. Bigarren modua AC pultsatua da eta azkenik, Cold Arc modua da bero-ekarpen baxuena duena, bere gailur-intentsitatea eta intentsitate-seinalearen maiztasuna beste bi moduetan baino baxuagoak direlako. Geroago eztabaidatuko den bezala, bero-ekarpenak lotura estua du lortutako kordoien forma geometrikoarekin eta penetrazioarekin. Hala ere, kontuan izan behar da hiru moduetako bero-ekarpenen arteko aldeak oso

txikiak direla eta tantaren tamainak beste aldagai batzuek baino eragin handiagoa izan dezakeela kordoien forma geometrikoan eta penetrazioan.



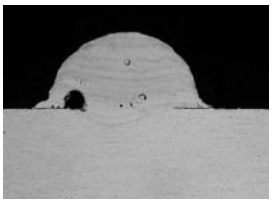
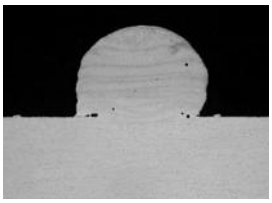
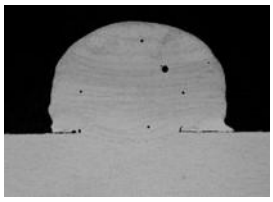
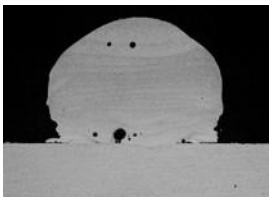
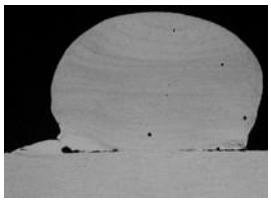
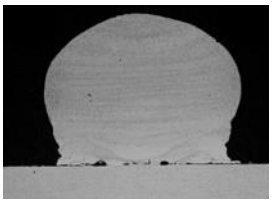
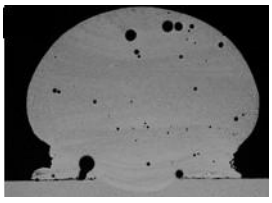

*V-4. irudia. Ratioaren arabera bero-ekarpenaren (HI) balioak hiru funtzionamendu-moduekin eta (a) 4 m/min-ko (1-4 kasuak) eta (b) 8 m/min-ko (5-8 kasuak) hariaren elikatze-abiadurekin egindako kordoietan*

### 3.3.2 Zeharkako sekzioen eta penetrazioen analisia

V-5 eta V-6. tauletan, hurrenez hurren, 4 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin eta 8 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin fabrikatutako kordoien zeharkako sekzioen makrografiak aurkezten dira. Cold Arc moduaren bidez fabrikatutako 1., 2., 3. eta 4. kordoiak eta AC pultsatu moduarekin fabrikatutako 4. kordoia jarraiak ez direnez, hau da, ez dutenez euren luzera osoan oinarri-materialean penetraziorik, ez dira euren zeharkako sekzioen makrografiak aterako, hauetatik ezin baita informaziorik lortu.

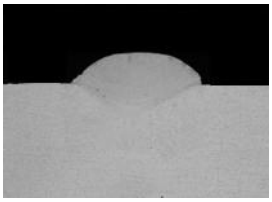
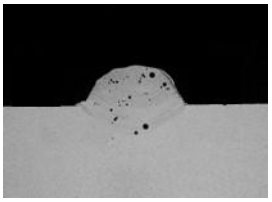
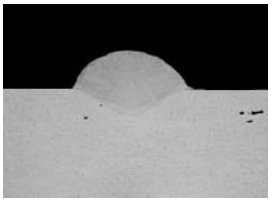
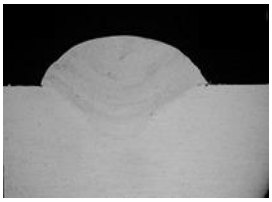
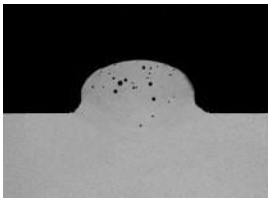
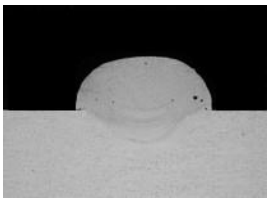
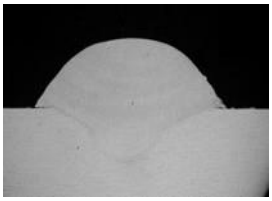
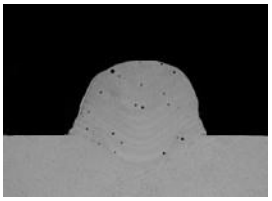
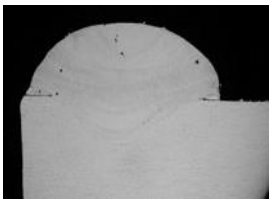
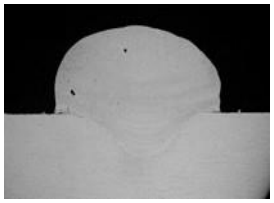
Alde batetik, V-5. taulan ikus daitekeen bezala, 4 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin hiru funtzionamendu-moduetan porositatea agertzen da eta penetrazioa txikia edo nulua da. Zehazki, argi geratu da Cold Arc modua, 4 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurarekin eta 4-12 ratioekin (1-4 kasuak), ezin dela erabili kordoi jarraiak lortzeko. Kordoiak jarraiak direla esaten da euren luzera osoan altuera eta zabalera konstanteak dituztenean. Emaitza hau azaltzen dute modu honetan transferitutako tanten tamaina handiak eta horien maiztasun txikiak, izan ere, tantak ez dira gainjartzen eta kordoi ez-jarraituak lortzen dira hutsuneekin. Aldiz, GMAW pultsatua eta AC pultsatua moduekin eta 4 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurekin fabrikatutako kordoien penetrazioak eta bustidura-angeluak (4. ekuazioa) desegokiak dira, nahiz eta kordoi jarraiak lortu, hau da, euren luzera osoan altuera eta zabalera konstanteak izan. Emaitza horietatik ondoriozta daiteke 4 m/min-ko hariaren elikatze-abiadurekin hautatutako 4-12ko ratioak (1-4 kasuak) baxuegiak direla hiru funtzionamendu-moduetarako, kasu horietan bero-ekarpena ez baita nahikoa penetrazio-maila onargarriak lortzeko.

*V-5. taula. WFR = 4 m/min duten kordoien zeharkako sekzioak hiru funtzionamendu-moduetan*

| **4 m/min** | **Funtzionamendu-modua** | | **1,5 mm** |
|---|---|---|---|
| **Kordoi zbk.** | **GMAW pultsatua** | **Cold Arc** | **AC pultsatua** |
| **1** |  | - |  |
| **2** |  | - |  |
| **3** |  | - |  |
| **4** |  | - | - |

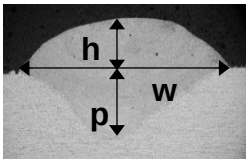
4 m/min-rekin lortutako kordoiak ez bezala, 8 m/min-ko kordoien penetrazioa eta bustitze-angeluak egokiak dira piezen fabrikaziorako. Hala ere, porositate maila altuak ikusten dira Cold Arc moduan.

*V-6. taula. WFR = 8 m/min duten kordoien zeharkako sekzioak hiru funtzionamendu-moduetan*

| **8 m/min** | **Funtzionamendu-modua** | | **3 mm** |
|---|---|---|---|
| **Kordoi zbk.** | **GMAW pultsatua** | **Cold Arc** | **AC pultsatua** |
| **5** |  |  |  |
| **6** |  |  |  |
| **7** |  |  |  |
| **8** |  |  |  |

Kordoi bakoitza ezarri ondoren, eskaner laserraren bidez eskaneatu da. Eskuratutako datuetatik abiatuta, kordoietako zabaleren eta altueren batez besteko balioak kalkula daitezke (V-7. taula). Kordoi bakoitzaren penetrazio-balioak ere V-7. taulan agertzen dira. Penetrazio horiek V-5 eta V-6. tauletako makrografietan neurtzen dira. Ondorioz, argi eta garbi ikusten da TS balioak behera egin ahala, hau da, ratioak gora egin ahala, kordoien zabalera ere handitu egiten dela. Oro har, penetrazioari dagokionez ere arau hori mantendu egiten da.

*V-7. taula. Hiru funtzionamendu-moduekin egindako kordoien zabalera, altuera eta penetrazio balioak*

|  | **Funtzionamendu-modua** | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | **GMAW pultsatua** | | | **Cold Arc** | | | **AC pultsatua** | | |
| **Kordoi zbk.** | **w (mm)** | **h (mm)** | **p (mm)** | **w (mm)** | **h (mm)** | **p (mm)** | **w (mm)** | **h (mm)** | **p (mm)** |
| **1** | 3,35 | 1,99 | 0,34 | 2,29 | 2,07 | - | 2,98 | 2,16 | 0,12 |
| **2** | 3,8 | 2,38 | 0,14 | 2,87 | 2,55 | - | 3,54 | 2,63 | 0,09 |
| **3** | 4,38 | 2,86 | 0,09 | 3,3 | 3,16 | - | 4,06 | 3,14 | 0 |
| **4** | 4,4 | 3,36 | 0,27 | 3,96 | 3,58 | - | 5,48 | 3,16 | - |
| **5** | 4,71 | 1,22 | 1,19 | 3,62 | 1,23 | 1,06 | 3,94 | 1,69 | 1,08 |
| **6** | 5,53 | 1,81 | 1,74 | 4,38 | 2,12 | 1,17 | 4,98 | 2,03 | 1,22 |
| **7** | 6,1 | 2,31 | 1,70 | 4,72 | 2,84 | 1,22 | 5,53 | 2,47 | 1,39 |
| **8** | 6,41 | 2,76 | 1,45 | 5,69 | 3,21 | 1,39 | 5,75 | 2,43 | 1,45 |

Arestian aipatu bezala, funtzionamendu-modu desberdinen bero-ekarpenak eragina izan dezake kordoien forma geometrikoan eta penetrazioan. Gainera, soldadura-harian sartzen den intentsitate-seinalearen formak eta ondorioz, transferitutako tanten tamainak ere kordoiaren geometria eta penetrazioa zehaztu ditzake.

Oro har, GMAW pultsatu moduak, AC pultsatu eta Cold Arc moduek baino penetrazio sakonagoa erakusten du, gailur-intentsitate balioak altuagoak baitira. Hau da, zenbat eta handiagoa izan gailur-intentsitatea, orduan eta handiagoa izango da penetrazioa. Gainera, GMAW pultsatu moduan, intentsitate-seinalearen gailur balio maximoek orratz forma duen penetrazio bat eragiten dute (“V” forma). Aldiz, Cold Arc moduak, bere gailur-intentsitate txikiagoaren ondorioz, uzten dituen penetrazio-markek forma leunagoa dute (“U” forma).

Gainera, bero-ekarpenaren baliorik handienak GMAW pultsatu moduan lortzen direnez, modu honekin ezarritako kordoiak zabalenak eta baxuenak dira, V-7. taulan ikus daitekeen bezala. Efektu bera jakinarazi zuten Abe et al.-ek [ABE, 2020], bero-ekarpenak gora egitean, kordoiaren zabalera handitu eta altuera txikitu egiten direla ondorioztatuz.

Azkenik, V-4. taulan azaldu den bezala, Cold Arc moduan transferitutako material tanten tamaina askoz ere handiagoa da beste funtzionamendu-moduekin alderatuta eta tantak ezartzeko maiztasuna txikiagoa da. Horregatik, kordoian zehar, Cold Arc moduan, tanta gutxiago uzten dira. Ondorioz, 4 m/min-ko

hariaren elikatze-abiadurekin ez dago kordoi jarrairik ikerlan honetan ezarritako ratioetarako. Aldiz, GMAW pultsatu eta AC pultsatu moduetarako parametro berberak erabiliz kordoi jarraiak daude. Gainera, Cold Arc moduan tantak ezartzeko tasa txikiago honek kordoietan porositatea eragiten du.

### 3.3.3 Kordoien zabalera eta altuera ereduak

Aukeratutako parametroekin lortutako soldadura-kordoien zabalera eta altuera balioak funtsezkoak dira fabrikazio ibilbideak programatzeko. Alde batetik, adibidez, fabrikatu beharreko piezaren hormen zabalerak erabakiko du pieza horma sinpleekin (kordoi bakarrekoekin) edo horma gainjarriekin egin beharko den. Zabalera handiegia ez bada, horma sinpleak erabil daitezke eta ezarpen-parametro egokiak aukeratu behar dira, helburu den hormaren antzeko zabalera duten kordoiak ezartzeko. Helburu den zabalera hori kordoi bakarrarekin lor daitekeen zabalera baino handiagoa bada, kordoi batzuk gainjarri beharko dira. Era berean, gainjartzearen distantzia kordoiaren zabaleraren araberakoa izango da eta horrek agerian uzten du ezarpen-parametroen konbinazio espezifikoetarako kordoien zabalera iragartzeko ereduen garrantzia. Horrela, V-7. taulan emandako datuak erabiliz, kordoiaren zabaleraren eta ezarpen-parametroen arteko erlazio adierazten duten ereduak kalkulatzen dira funtzionamendu-modu bakoitzerako. Hala, 16., 17. eta 18. ekuazioek eredu hauek definitzen dituzte, GMAW pultsatu, Cold Arc eta AC pultsatu funtzionamendu-moduetarako, hurrenez hurren.

$$w_{GMAW\ pultsatua} = 0{,}9538 * WFR - 0{,}0129 * TS \quad (16)$$

$$w_{Cold\ Arc} = 0{,}8259 * WFR - 0{,}0146 * TS \quad (17)$$

$$w_{AC\ pultsatua} = 0{,}9430 * WFR - 0{,}0165 * TS \quad (18)$$

Bestalde, aukeratutako ezarpen-parametroekin lortutako kordoien altuerak piezen fabrikazio ibilbideak programatzeko beharrezkoa den geruzako hazkundea ezarriko du eta beraz, baita pieza eratzeko behar diren geruzen kopurua ere. Ondorioz, kordoiaren altuera-ereduek 19., 20. eta 21. ekuazioak jarraitzen dituzte, GMAW pultsatu, Cold Arc eta AC pultsatu funtzionamendu-moduetarako, hurrenez hurren.

$$h_{GMAW\ pultsatua} = 0{,}5063 * WFR - 0{,}0119 * TS \quad (19)$$

$$h_{Cold\ Arc} = 0{,}5983 * WFR - 0{,}0154 * TS \quad (20)$$

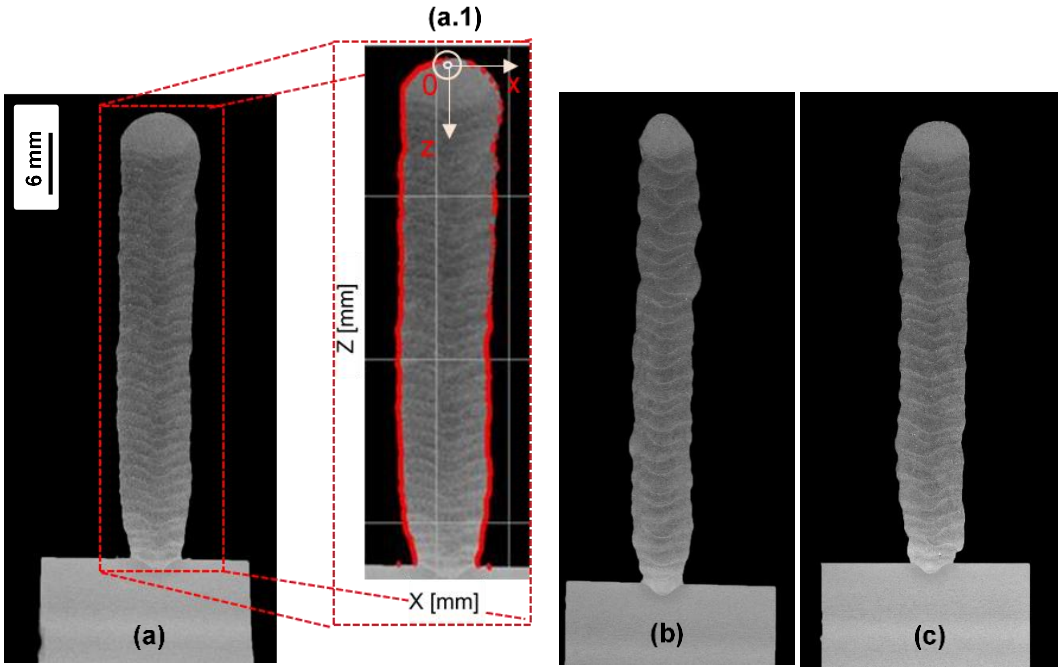
$$h_{AC\ pultsatua} = 0{,}4648 * WFR - 0{,}0077 * TS \quad (21)$$

## 3.4 Aluminio-aleazioetarako GMAW funtzionamendu-modu sinergikoen analisia: Horma sinpleak

Aipatu bezala, funtzionamendu-modu bakoitzarekin kordoi bakarreko hormak egiten dira, 8 zenbakidun kordoiaren parametroekin. Parametro horiek hiru funtzionamendu-moduen hariaren elikatze-abiadura mugen barruan ezarpen-tasa maximizatzen delako (8 m/min) eta penetrazio onargarriak eta kordoiaren jarraitasuna lortzen direlako aukeratzen dira (ikus V-6. eta V-7. tauletako 8. kordoia). 50 mm-ko hormaren altuera lortzeko pultsatutako GMAW moduan, 36 geruza behar dira; Cold Arc moduan 30 geruza baino ez eta pultsatutako AC moduan, berriz, 33. Geruza bakarreko soldadura-kordoiek funtzionamendu-moduaren arabera forma ezberdinak dituztenez, hiru hormen itxura geometrikoa ere ezberdina izango da, hurrengo atalean ikus daitekeen bezala.

### 3.4.1 Ezarritako kordoien forma geometrikoa

Hiru hormen forma geometrikoa aztertzeko eta ondulazioa kuantifikatzeko irudiak tratatzeko prozesu bat erabili da. Prozesu horretan, hormen zeharkako makrografiak hartu eta grisen eskalara bihurtzen dira (V-5. irudia). Ondoren, iragazki gaussiar bat erabiltzen da hormen ertzak markatzeko, V-5 a.1. irudian (gorriz) erakusten den bezala. Kontuan izan V-5 a.1. irudian ikerketa honetan erabilitako ardatzen norabideak erakusten direla, Z ardatzaren 0 puntua hormaren goiko aldean ezartzen delarik.

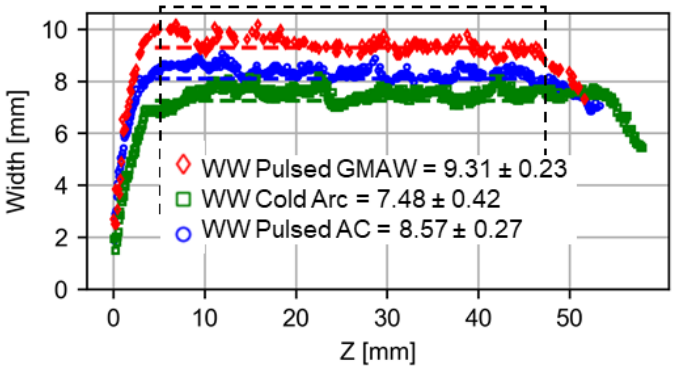



*V-5. irudia. (a) GMAW pultsatu, (b) Cold Arc eta (c) AC pultsatu hormen makrografiak. (a.1) Hormen ertzak zehazteko tratatutako makrografia*

V-6. irudian, hormen ertz hauek grafikatzen dira hiru hormen forma geometrikoa definituz. Datuak prozesatuta, hormen batez besteko zabalera edo bestela esanda, WW (*Wall Width*)-a eta hormaren altueran zehar (Z) gainazalaren ondulazioa kalkula daitezke. V-6. irudiaren eskuinaldean ikus daitekeen bezala, hiru hormetako lehen geruzak estuagoak dira, oinarri-materiala, hasieran, hotz dagoelako. Hala, GMAW pultsatu moduaren bidez, hormarik zabalena egiten da, 9,31 mm-ko WW batekin; AC pultsatuaren bidez egindako horma estuagoa da 8,57 mm-ko WW batekin eta azkenik, Cold Arc horma estuena da 7,48 mm-ko WW batekin. Emaitza horiek bat datoz horma bakoitzean nahi den altuerara iristeko behar diren geruzen kopuruarekin. Bestela esanda, 36 geruza behar dira GMAW pultsatu horman, geruza bakoitza zabalagoa eta baxuagoa baita. Aldiz, Cold Arc horman, soilik 30 geruza ezartzen dira, geruzako hazkundea handiagoa baita.

Ondorio hauek ateratzeko kontuan hartu behar da ezarpen-tasa eta aitzinamendu-abiadura balioak berdinak direla hiru hormetan baina sartutako bero-ekarpena ez dela berdina, erabilitako funtzionamendu-moduak desberdinak direlako. 3.3.1. atalean frogatu den bezala, funtzionamendu-moduaren arabera, bero-ekarpena desberdina da, bero-ekarpena handitzen den heinean kordoi zabalagoak eta baxuagoak lortuz. Gainera, hormen forma geometrikoa bat dator bai 3.3.3 atalean zehaztutako zabalera- eta altuera-ereduekin eta baita V-7. taulan adierazitako datuekin ere.

Azkenik, ikus daiteke gainazalaren ondulazioa GMAW pultsatu eta AC pultsatu hormetan Cold Arc horman baino txikiagoa dela. Cold Arc moduan, penetrazio-markak leunagoak dira gailur-intentsitate txikiagoen ondorioz eta azken geruzak pixka bat mugituta daude hormaren alde baterantz. Horregatik, gainazalaren ondulazioa handiagoa da. Kontrastean, GMAW pultsatu eta AC pultsatu moduetan, geruzen artean agertzen diren fusio-markek "V" forma dute (hau bat dator V-6. taulan 8. kordoia lortutako penetrazio-markekin), penetrazio sakonagoak lortuz, gailur-intentsitatearen balioak altuagoak baitira.



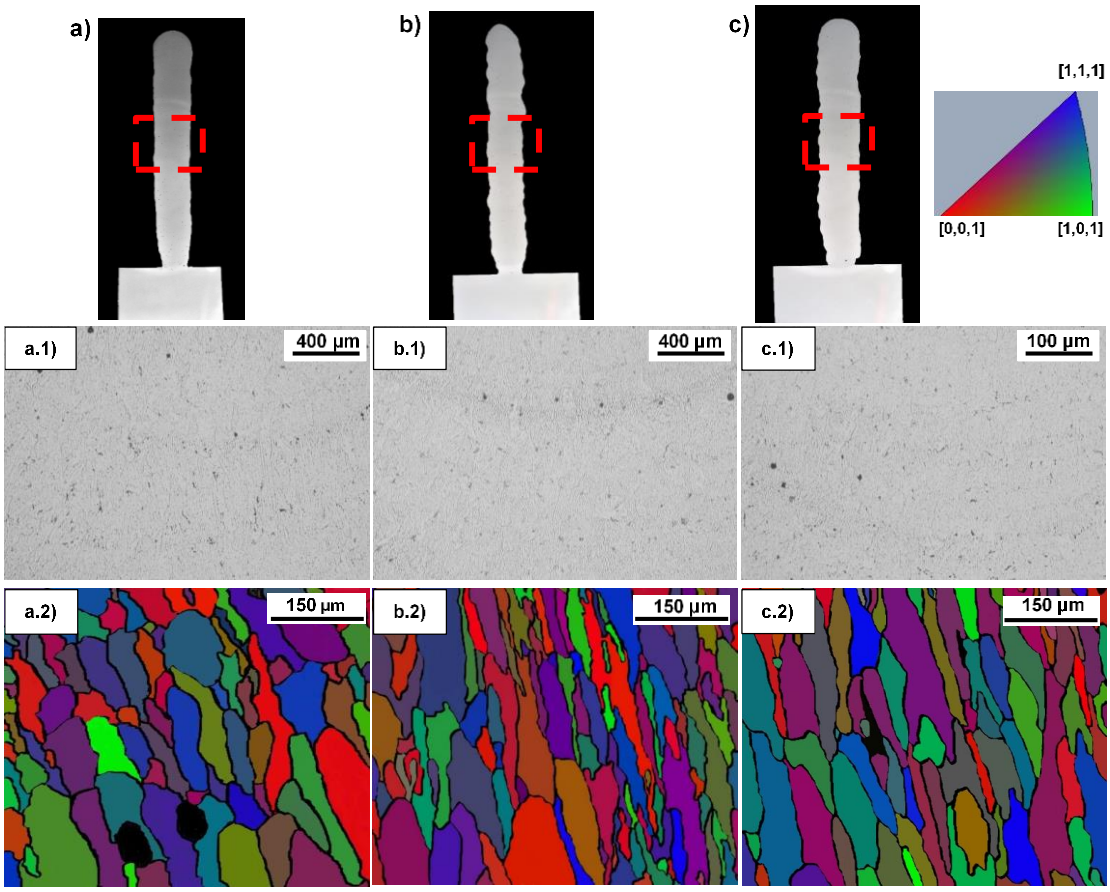

*V-6. irudia. Hormaren zabalera (WW) hormaren altueran (Z ardatza) zehar adierazia, Z ardatzaren balioa nulua izanik hormen goialdean. Kalkulatutako WW-ren balioak eta gainazaleko ondulazio balioak ere ageri dira*

Azkenik, hormen eremu eraginkorrari dagokionez, GMAW pultsatu hormaren azalera 475 $mm^2$-koa da, Cold Arc hormaren azalera 382 $mm^2$-koa eta AC pultsatu hormaren azalera 440 $mm^2$-koa. Eremu eraginkorra hormak mekanizatu ondoren lortutako hormaren neurria da. Espero bezala, eremu eraginkor handiena GMAW pultsatu moduarekin lortu da.

### 3.4.2 Mikroegitura

V-7. irudian, GMAW pultsatu, Cold Arc eta AC pultsatu hormen erdialdeko zeharkako sekzioen barruko mikroegiturak ikus daitezke (V-7 a., V-7 b. eta V-7 c. irudiak, hurrenez hurren). Hiru kasuetan antzeko mikroegiturak lortzen dira baina poro batzuk ikus daitezke. Porositatearen arazoa 3.4.3 sekzioan eztabaidatuko da sakonki, izan ere, berebiziko garrantzia du aluminiozko piezak egiteko fabrikazio-gehigarriko teknologietan arazo oso ohikoa baita [Gu, 2019]. Aluminio-aleazioetan ezarritako piezetan ager daitekeen beste arazo bat beroan pitzaduren sorrera da, ale-mugetan agertzen diren fase metalikoen ondorioz. Fase horiek urtzen zailak dira eta ezin dituzte ziklo termikoen hondar-tentsioen balioak jasan, Horgar et al.-ek [Horgar, 2018] Al 5183-rako eta Su et al.-ek [Su, 2019] Al 5356-rako adierazi zuten bezala. Ikerketa honen, hiru funtzionamendu-moduekin egindako hormetan, aukeratutako ezarpen-parametroekin ez da pitzadurarik hautematen.

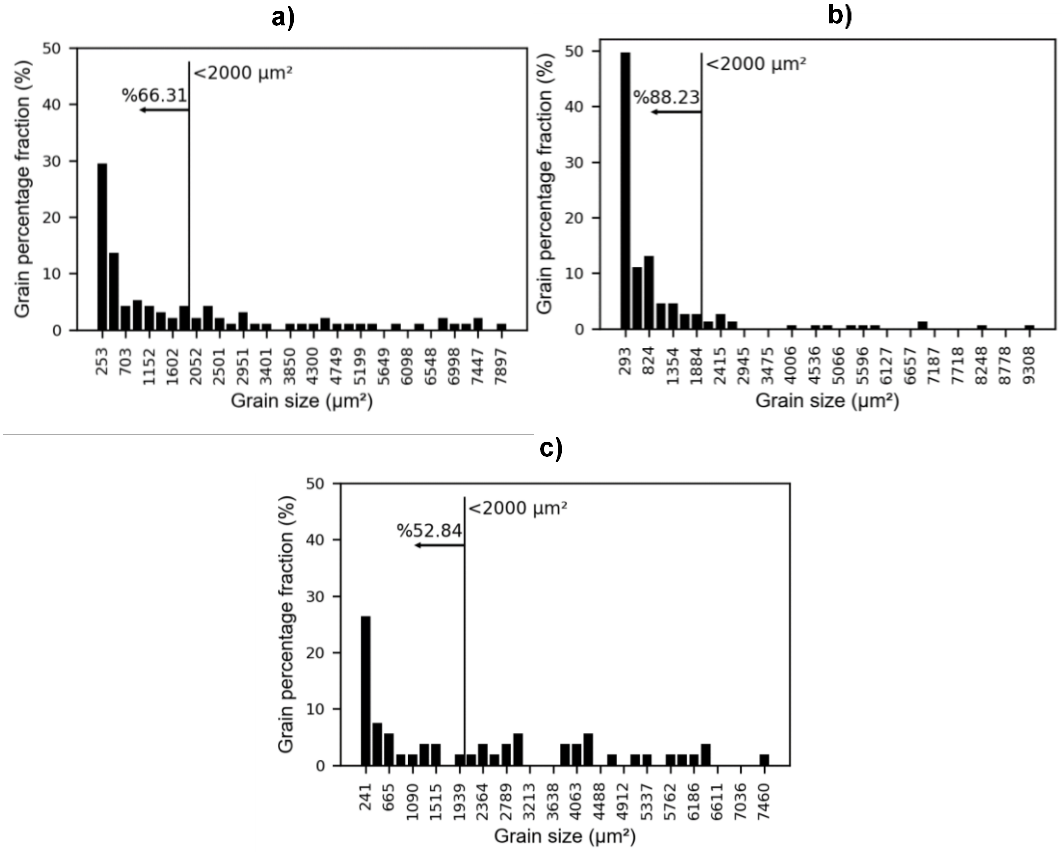
Mikroegiturari dagokionez, lehen geruzetan beroa hormetan zehar oinarri-materialera disipatzen da. Aleak, oro har, bero-disipazioaren norabide berean hazten dira. Ondorioz, lehen geruzetan ale kolumnarrak sortzen dira norabide horretan, Cong et al.-ek [Cong, 2015] ere ikusi zuten bezala. Baina hormaren altuera handitzen den heinean, oinarri-materiala distantzia batera geratzen da eta beraz, oinarri-materialetik beroaren edozein disipazio murrizten da. Ondoren, geruzak etengabe ezartzeari esker, hurrengo geruzaren ezarpenak aurrekoa berotzen duenean, hormek oreka termiko bat lortzen dute, norabide guztietan antzeko ale hazkundea sortzen duena, ale ekiaxialeko egitura bat lortuz. Hala ere, hiru funtzionamendu-moduetan geruza-muga bakoitzetik gertu ale kolumnar egitura bat ikus daiteke, V-7. irudiko EBSD mapetan ikus daitekeen bezala. Sinplifikatuz, fabrikatutako hormen erdialdean, GMAW pultsatu, Cold Arc eta AC pultsatu moduak erabiliz, ale ekiaxial eta kolumnarreko egiturak tartekatzen dira, ale kolumnarreko egitura duten eremuak geruza-mugetatik gertu edukiz, Li et al.-ek [Li, 2020-b] eta Su et al.-ek [Su, 2019] ere ikusi zuten bezala. Autore horiek adierazi zutenez, geruza berri bat ezartzean, pieza pixka bat hozten da, egindako azken ezarpenetik. Hozte honi esker, geruzen arteko mugan gradiente termiko handiagoa sortzen da eta ale kolumnardun eremu txiki bat eratzen da, ale hazkundea gradiente honen norabidean gertatzen delarik. Bestalde, geruzen mugetatik gertu ez dagoen gainerako materialean zatian, ez da gradiente termiko hau agertzen eta beraz, ale egitura ekiaxiala da.




*V-7. irudia. (a) GMAW pultsatu, (b) Cold Arc eta (c) AC pultsatu moduen bidez fabrikatutako hormen erdialdeko gunearen mikroegitura: 1) Mikroskopio optikoaren bidez behatutako mikroegitura; 2) EBSD mapak*

Hala ere, hiru funtzionamendu-moduak alderatzean ezberdintasunak ikus daitezke aleen tamainaren banaketan. V-8. Irudian, GMAW pultsatu, Cold Arc eta AC pultsatu funtzionamendu-moduekin egindako hiru hormen erdialdean ateratako EBSD mapetako banaketa granulometrikoak aurkezten dira. Ikus daitekeenez, AC pultsatu moduak batez besteko alearen tamainarik handiena du, 2316 $\mu m^2$-koa. Aldiz, GMAW pultsatu eta Cold Arc hormen batez besteko aleen tamainen balioak, hurrenez hurren, %17,919 eta %54,871 txikiagoak dira AC pultsatu hormarekin alderatuta. Bestela esanda, V-8. irudian ikusten denez, GMAW pultsatu moduan, aleen %66,31-k 2000 $\mu m^2$ baino gutxiagoko eremua hartzen dute, Cold Arc moduan, aldiz, %88,23-k eta AC pultsatu moduan %52,84-k. Cold Arc moduan lortutako batez besteko ale tamaina txikiena Cold Arc prozesuaren izaerari zor zaio, modu honek tantak transferitzeko beste bi funtzionamendu-moduek baino maiztasun txikiagoa duelarik. Maiztasun txikiago honek, prozesu hotzago bat sortzen du, bero gutxiago sartuz eta beraz, gradiente termikoa murrizten da, ale tamaina txikiagoa sortuz.

AC pultsatuaren bidez lortzen den ale tamaina handiagoa da, intentsitate-seinalea negatiboa denean elektroiek beste norantzan bidaiatzen dutelako eta beraz, aldez aurretik ezarritako materiala berotu egiten delako ale handiagoa sortuz. Efektu hau ez da nabaritzen GMAW pultsatu moduan, intentsitate-seinale osoa positiboa baita.



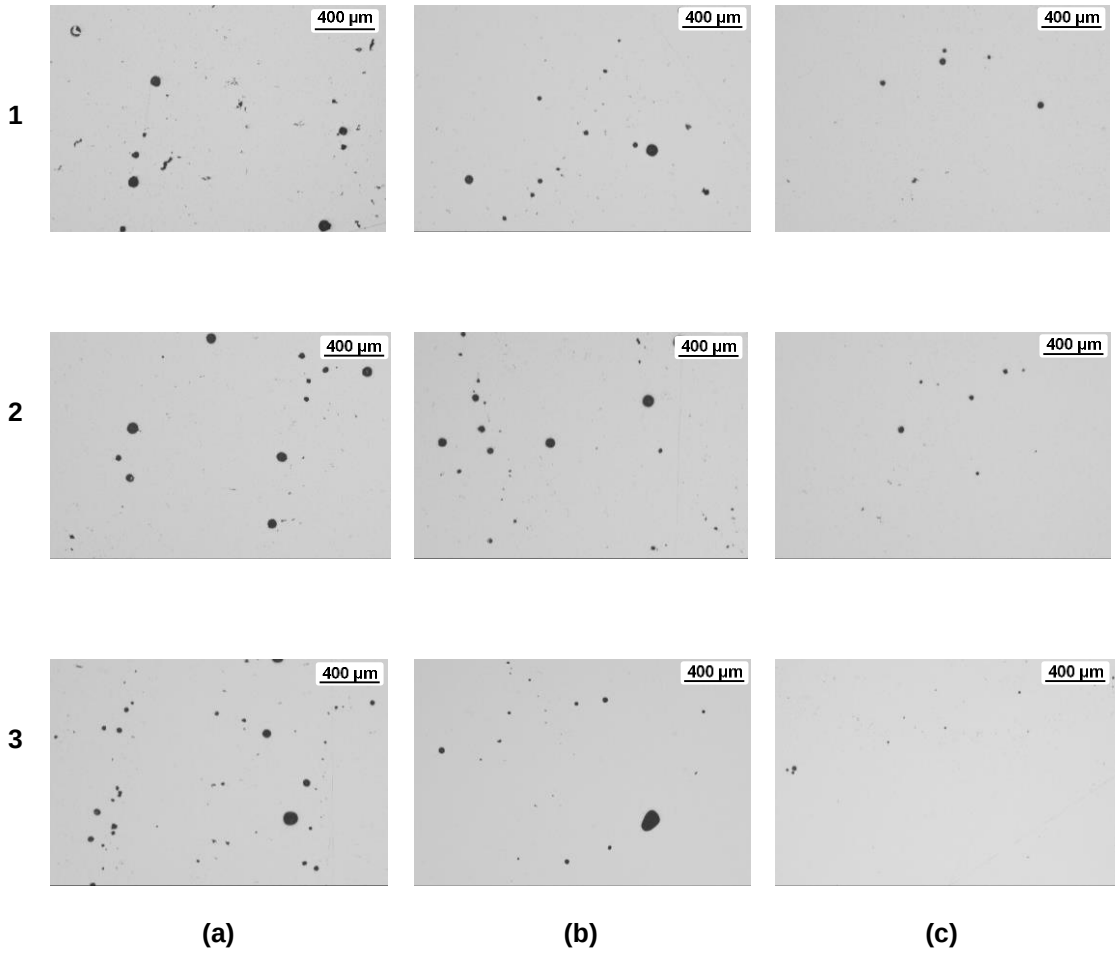

*V-8. irudia. (a) GMAW pultsatu, (b) Cold Arc eta (c) AC pultsatu hormen erdiko zeharkako sekzioen EBSD mapetako aleen tamainaren banaketa*

### 3.4.3 Porositatearen analisia

Porositate mailaren azterketa funtsezko gaia da aluminio-aleazioen fabrikazio-gehigarrian [Haselhuhn, 2016]. WAAM teknologiaren eta soldadura tradizionalaren bidez ezarritako aluminioaren porositatea, nagusiki, prozesuan hidrogenoa egotearen ondorio da. Egoera solidoan eta likidoan dagoen aluminioarentzat hidrogenoaren disolbagarritasun mugak ezberdinak direla ikusita, bainu urtuaren solidotze prozesuan hidrogeno pixka bat harrapatuta gera daiteke, porositatea sortuz. Askotan, hidrogenoa prozesuan sartzen da, elikadura-hariaren gainazalean aurki daitezkeen ezpurutasunen eta hezetasunaren ondorioz [Panchenko, 2020]. Gainera, porositatea oinarri-

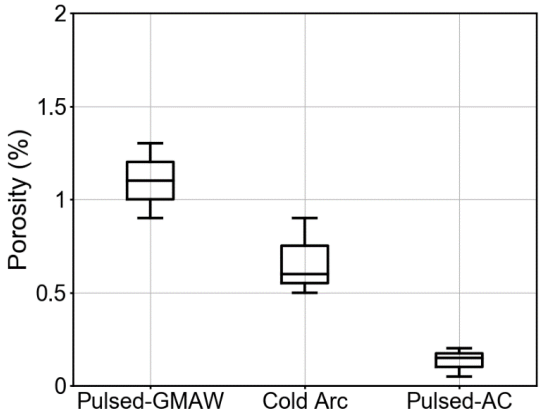
materialaren garbitasunaren eta leunketaren, zuziaren inklinazio-angeluaren eta babes-gasaren purutasunaren araberakoa ere izan daiteke.

Ikerketa honen helburu nagusia GMAW pultsatu, Cold Arc eta AC pultsatu funtzionamendu-moduak alderatzea denez, modu horietako bakoitzaren porositate-analisi bat ere egin da. V-9. irudian, porositate mailak neurtzeko erabilitako eraso kimikorik gabeko mikrografiak agertzen dira.




*V-9. irudia. Porositatea aztertzeko eraso kimikorik gabeko mikrografiak: (a) GMAW pultsatu horma; (b) Cold Arc horma; (c) AC pultsatu horma. (1) hormen goiko gunea; (2) hormen erdiko gunea; (3) hormen beheko gunea*

V-9. eta V-10. irudietan ikus daitekeen bezala, AC pultsatu moduak materialaren porositatea nabarmen murrizten du. GMAW pultsatu, Cold Arc eta AC pultsatu funtzionamendu-moduekin egindako hormen batez besteko porositate balioak %1,1, %0,66 eta %0,13-koak dira, hurrenez hurren.



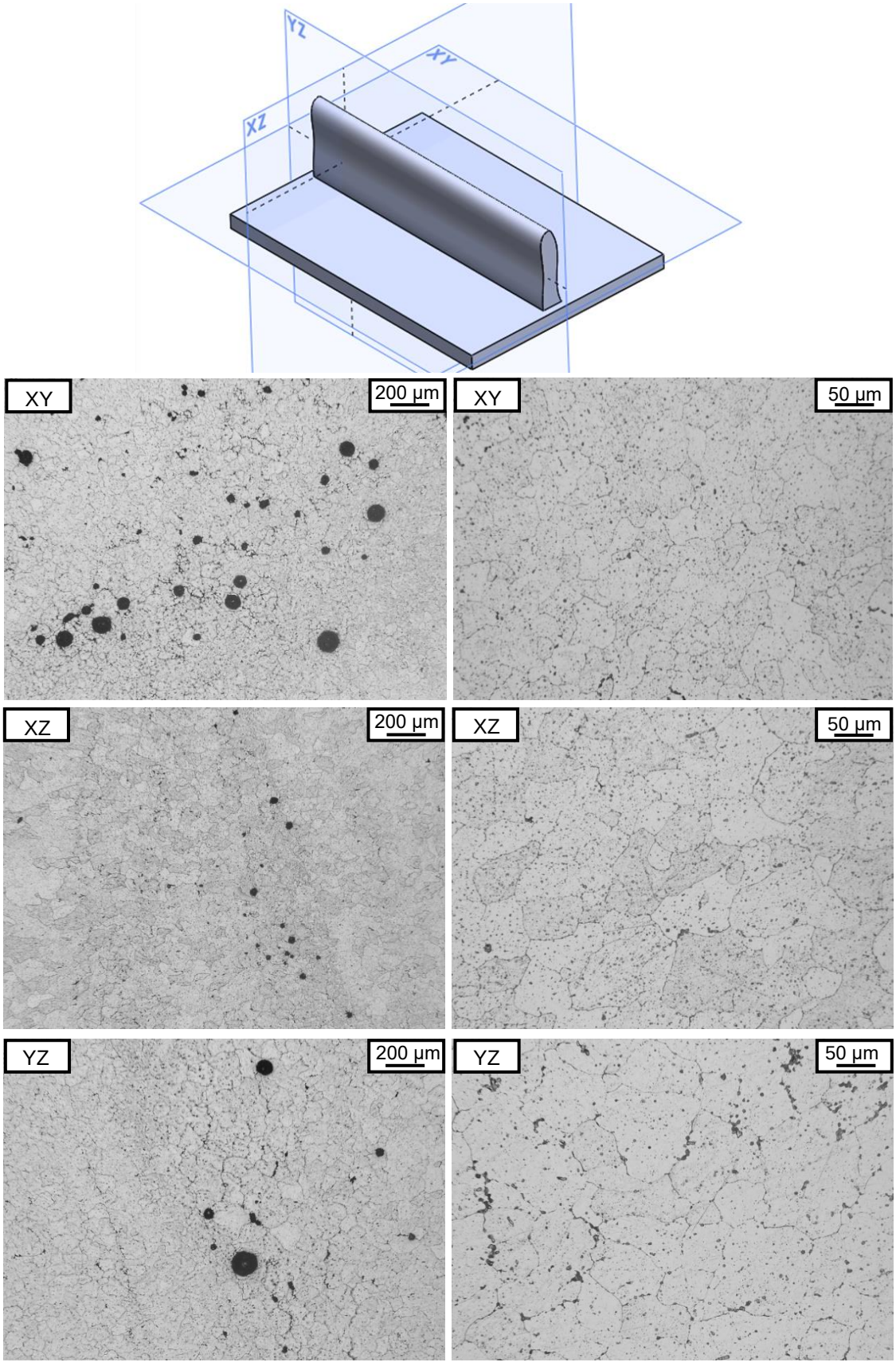

*V-10. irudia. GMAW pultsatu, Cold Arc eta AC pultsatu funtzionamendu-moduekin lortutako batez besteko porositate balioak*

Argi dago polaritate aldakorreko eta ezarpne-tasa altuko AC pultsatu moduak, ezarritako materialaren porositate mailak murrizten dituela, hau materialaren integritate eta kalitaterako funtsezko faktorea izanez. Hala, ezarritako materialaren porositatea murriztearen arrazoia funtzionamendu-modu honek duen polaritate aldakorra da. Intentsitate-seinalea positiboa denean, beste funtzionamendu-moduetan bezala, elektroien mugimenduaren norantzak haria berotzen du, hau da, elektrodoa, eta urtu egiten du substratuan materiala ezartzeko. Aldiz, intentsitate-seinalea negatiboa denean, polaritatea aldatu egiten da eta korronteak aurrez ezarritako kordoiak berotzen ditu, ezarritako aluminio-aleazioen gainazaletan sortzen den gainazaleko magnesio-oxidozko mintz naturala ezabatuz. Ezabatze horri esker, material urtuaren barruan harrapatuta dagoen hidrogenoa askatzen da, lortutako porositate maila murriztuz. Laburbilduz, AC pultsatu moduan, intentsitate-seinalea negatiboa denean, aurrez ezarritako materiala berotzen da gainazalean sortutako oxido-mintza ezabatuz eta horrela, materialean harrapatuta dagoen hidrogeno-gasa ateratzen da, porositatea murriztuz.

## 3.5 Mikroegituraren eta propietate mekanikoen analisia: Gainjarritako horma

### 3.5.1 Mikroegitura

Gainjarritako horman ez da fabrikazio-akatsik, betetze-faltarik, arrakalarik edo pororik ikusten maila makroskopikoan. Lortutako mikroegiturari dagokionez, V-11. irudian ikus daitekeenez, oinarri-materialarekiko lotura-eremua alde batera utzita, gainjarritako horma osoan hiru planoetan (XY, XZ eta YZ) ale ekiaxialdun mikroegitura bat lortzen da. Gainera, 100 µm-tik beherako tamaina duten poro mikroskopikoak ere ikus daitezke.




*V-11. irudia. Gainjarritako hormaren mikroegitura XZ, YZ eta XY planoetan handipen ezberdinekin (x50, x200)*

### 3.5.2 Gogortasunak

Era berean, egindako hormaren hainbat gunetako gogortasuna neurtu dira, haren bilakaera ikusteko. Gune bakoitzean hiru neurketa egin dira hormaren zabaleran zehar eta batez besteko balioak V-8. taulan ikus daitezke. Ikusten denez, gogortasun balioak antzekoak dira hormaren goialdean eta erdialdean, ale ekiaxialeko lortutako mikroegitura antzekoa delako (V-11. irudia). Behealdean, berriz, oinarri-materialaren interfasetik gertu gaudenez, mikroegitura kolumnar bihurtzen da eta gogortasun balioak zertxobait handitzen dira.

*V-8. taula. Horma gainjarriaren gogortasun balioen emaitzak*

| | **Gogortasunak (HV)** |
|---|---|
| **Goiko gunea** | 154,67 |
| **Erdiko gunea** | 151,67 |
| **Beheko gunea** | 163,3 |

### 3.5.3 Propietate mekanikoak

Azkenik, horma horren propietate mekanikoak aztertu dira. Horretarako, trakzio-saiakuntzarako eta Charpy entsegurako probetak atera dira, V-1. irudiko probeten banaketaren arabera. Lortutako balioak (V-9. taula) II. kapituluko 5.2 atalean adierazitako eta aurretiazko literaturan 5356 aluminio-aleazioan GMAW teknologian oinarritutako WAAM bidez fabrikatutako hormetatik ateratako balioen antzekoak dira. Gainera, hariaren hornitzaileak erreferentziazko materialarentzat aurrez definitutako balioen antzekoak ere badira.

*V-9. taula. 5356 aluminio-aleaziozko horma gainjarriaren trakzio-saiakuntzatik eta Charpy entsegutik lortutako balioak*

| | | **Trakzio-saiakuntza** | | | **Charpy entsegua** |
|---|---|---|---|---|---|
| | | **UTS (MPa)** | **YS %0,2 (MPa)** | **Elong. (%)** | **Hausturarekiko zailtasuna (J)** |
| **Horma gainjarria** | Horizontala | 277 ± 3 | 111 ± 6 | 33 ± 1 | 24 ± 1 |
| | Bertikala | 264 ± 1 | 106 ± 3 | 27 ± 3 | 18 ± 3 |
| **Erreferentzia materiala** | - | 300 | 145 | - | - |

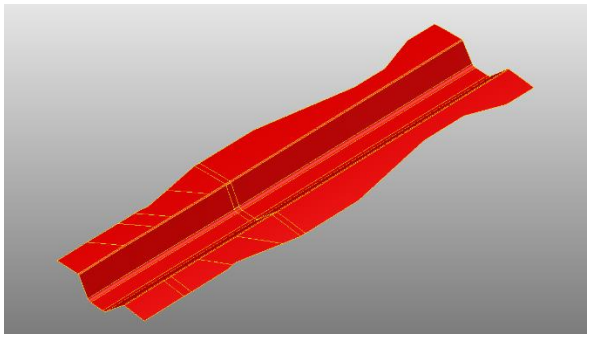
## 3.6 Balioztatzea

5356 aluminio-aleazioan egindako garapena balioztatzeko bi balioztatze-pieza fabrikatu dira. Batetik, aeronautikarako karbono-zuntzezko osagaiak egiteko

molde bat fabrikatu da eta bestetik, topologikoki optimizatutako lotze pieza bat fabrikatu da, material kantitate handia aurrezteko.

### 3.6.1 Karbono-zuntzezko osagaiak fabrikatzeko moldea

Lehenik eta behin, 5356 aluminio-aleaziozko molde bat fabrikatu da GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez. Molde hau V-12. irudian ikus daitekeen geometria duten karbono-zuntzezko piezak fabrikatzeko erabiliko da.

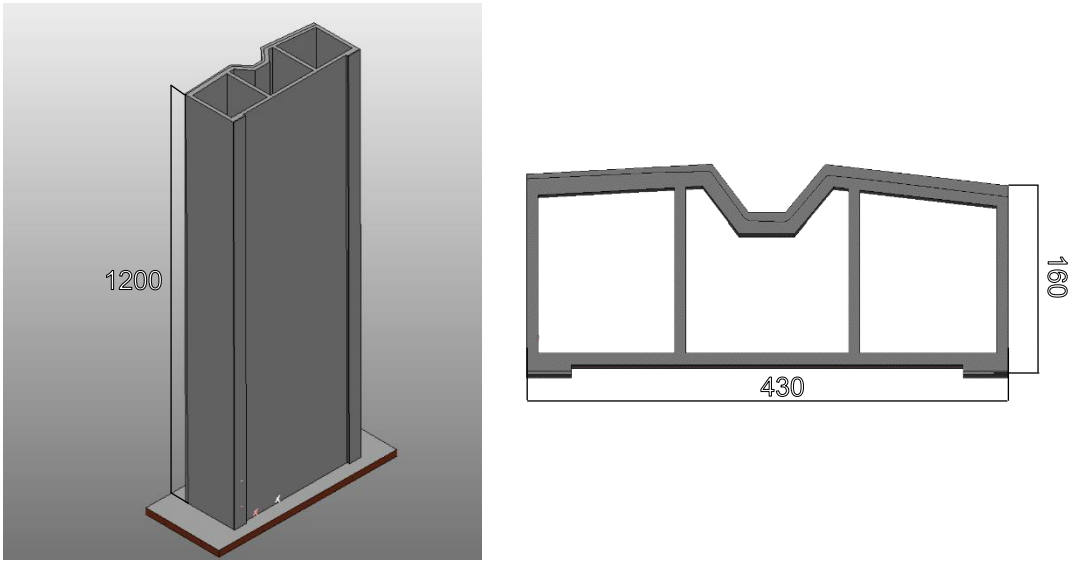


*V-12. irudia. Aluminiozko moldearen bidez karbono-zuntzean fabrikatu beharreko piezaren diseinua*

Hauek dira molde honek bete behar dituen baldintzak:

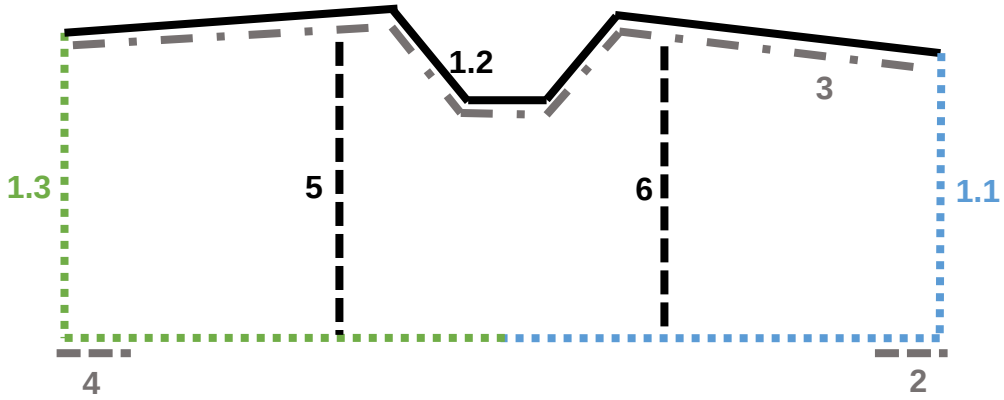
1- Moldean zuntzarekin kontaktuan dagoen gainazalak (goiko gainazalak) mekanizatuta egon behar du, Ra 1,6 edo 3,2 gainazaleko akaberak izateko.
2- Moldea nahi den tokian bermatzeko gainazalak planifikatuta egon behar du; ez du zertan berme-gainazal osoa izan, lau hanka edo tako soldatu eta planifikatu izan daitezke.
3- Moldeak arintze termikoko tratamendu termikoa behar du azken mekanizazioa baino lehen.
4- Moldearen goiko gainazalean ± 0,25 mm-ko dimentsio-perdoiak behar dira.
5- Moldeak estankoa izan behar du, gutxienez goiko aurpegian.

Moldearen bidez fabrikatuko den piezaren diseinutik abiatuta (V-12. irudia), moldearen diseinua sortu da (V-13. irudia). Materiala aurrezteko arrazoiak direla medio, moldea barnetik hutsa egitea erabaki da eta erdiko bi nerbio zurrungarri txertatu zaizkio. Gainera, beheko gainazalean moldea behar den lekuan erraz bermatzeko bi hanka ere gehitu zaizkio, behealde osoa planifikatu beharrik ez izateko eta mekanizazio-denborak murrizteko.




*V-13. irudia. Moldearen diseinua, kotak mm-tan*

V-14. irudian, WAAM bidezko fabrikazioan egindako ezarpen-ibilbideak eta -sekuentzia ikus daitezke. Hozte-denborak minimizatzeko, ezarpen-puntu berera itzultzeko ahalik eta denbora gehien uzteko moduan diseinatu da ezarpen-sekuentzia. Hala, lehenik eta behin, piezaren ingurua ezarri da. Inguru hau ezarpen-parametro propioak dituzten hiru zatitan banatzen da (1.1, 1.2 eta 1.3 zatiak). Bigarrenik, eskuineko berme-gainazala ezartzen da (2. zatia) eta gero gainjartzea (3. zatia). Ondoren, ezkerreko berme-gainazala ezartzen da (4. zatia) eta, azkenik, erdiko bi nerbio zurrungarriak egiten dira, 5. eta 6. zatiak. Bigarren geruzan ibilbide bera egiten da, baina kontrako norantzan, piezaren simetria mantentzeko. Amaitzeko, bi geruza horien sekuentzia errepikatzen da piezaren altuera lortu arte (1.200 mm), horretarako 800 geruza beharko direlarik.




*V-14. irudia. Moldearen ezarpen-ibilbidea eta -sekuentzia*

Molde hau 2. eta 4. zatietan eta 3. zatian gainjartzen diren kordoi bakarrekin fabrikatu da (V-14. irudia). Kordoien arteko gainjartzea kordoien zabaleraren (8 mm) %65-ekoa izan da. Moldea fabrikatzean, segidako geruzen artean hozte-

denbora bat itxaron da, piezan gehiegizko bero-ekarpenik ez izateko. Horri dagokionez, lehen zehaztu den bezala, geruzen arteko itxaronaldia minimizatzen saiatu da, ezarpen-sekuentzia doituz. Hala, geruza berri bat ezarri aurretik, III. kapituluan zehaztu den bezala instalatutako pirometroaren bidez, ibilbidearen hasierako puntuko tenperaturari begiratu zaio eta ez da ezarpena hasi puntu honetan 270 ºC-tik behera egon arte. Praktikan, itxaronaldiak baliogabeak izan direla ikusi da, hasiera-puntuan tenperatura horretatik behera egon garelako uneoro.

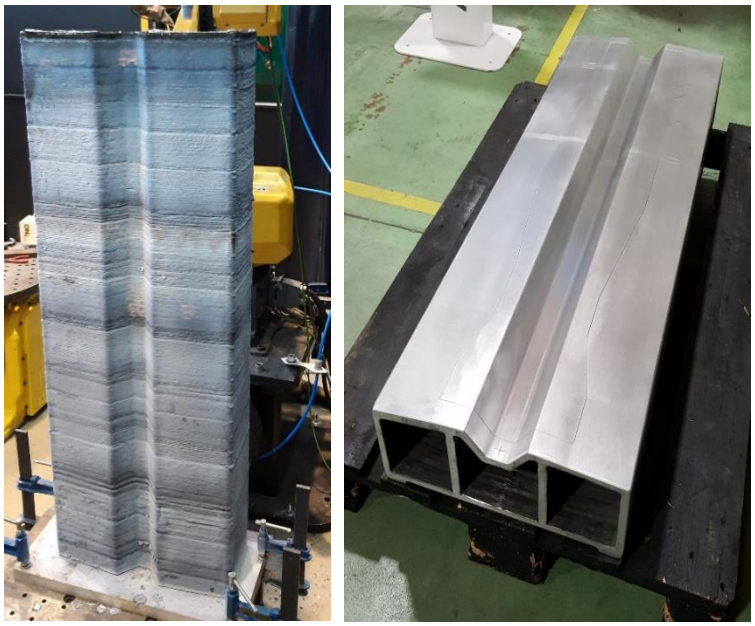
Oinarri-material gisara 5083 aluminio-aleaziozko plaka laua erabili da, 550 x 250 x 30 mm-koa. Gainera, GMAW pultsatu (Job 76) funtzionamendu-modua aukeratu da. Izan ere, piezaren neurriak handiak direnez, ahalik eta DR altuena bilatu da, materialaren integritate metalurgiko egokiarekin. Modu honetan, aurrez aztertutako 5356 aluminio-aleaziorako egokiak diren hiru Job-etatik (GMAW pultsatua, Cold Arc eta AC pultsatua), pultsatutako GMAW modua aukeratu da, porositate maila kontrolatuekin ezarpen-tasa balio handienak eskaintzen dituen metodoa baita. Pieza honetan porositatea maila baxuan mantentzea garrantzi handikoa balitz, AC pultsatu modua aukeratuko litzateke, nahiz eta ezarpen-tasa balio maximoak pixka bat txikiagoak izan.

Aukeratutako geruzako hazkundea 1,5 mm-koa izan da, hau da, geruza bat jarri ondoren robota Z ardatzean 1,5 mm igo da hurrengoa ezarri aurretik. Balio hori aldez aurretik egindako esperimentazioari esker zehaztu da. Gainera, ahalik eta ezarpen-tasa handienak bilatzen direnez, bustitze-angelu egokiarekin (30º inguru), kordoiaren zabalera jakin batekin eta gainjartze egokiarekin, baina gehiegizko bero-ekarpenik izan gabe eta integritate metalurgikoa mantenduta, V-10. taulan ikusten diren parametroak aukeratu dira. Aurretiazko probetan ikusi denez, moldearen aurpegi batzuetan kordoi gainjarriak ditugunez, piezaren aurpegi guztien hazkundea ez da uniformea. Horregatik, zati bakoitzerako hariaren elikatze-abiadura desberdinak eta 800 mm/min-ko aitzinamendu-abiadura komuna jartzea erabaki da.

*V-10. taula. 5356 aluminio-aleaziozko moldearen fabrikazio-parametroak*

| Zati zbk. | WFR (m/min) | DR (kg/h) | TS (mm/min) |
|---|---|---|---|
| **1.1** | 13 | 2,35 | 800 |
| **1.2** | 12 | 2,17 | 800 |
| **1.3** | 13 | 2,35 | 800 |
| **2** | 10 | 1,81 | 800 |
| **3** | 10 | 1,81 | 800 |
| **4** | 10 | 1,81 | 800 |
| **5** | 13 | 2,35 | 800 |
| **6** | 13 | 2,35 | 800 |

Moldea fabrikatu ondoren (V-15. irudia), lehenik eta behin, termikoki arindu da. Ondoren, moldearen gainazal funtzionala mekanizatu da, goiko aldea (1.2 zatia), Ra 1,6-3,2 arteko gainazal-akaberak lortzeko. Gainera, beharrezko zehaztasun geometrikoa beteko lukeen zehazteko gainazal hori neurtu da, emaitza positiboa lortuz. Jarraian, berme-gainazalak planifikatu dira (2. eta 4. zatiak), eta, azkenik, estankotasun proba bat egin zaio moldearen goiko azalerari, emaitza positiboak lortuz.



*V-15. irudia. WAAM bidez fabrikatutako aluminiozko moldea (ezk.) fabrikaziotik atera den bezala eta (esk.) azken mekanizazioaren ondoren*

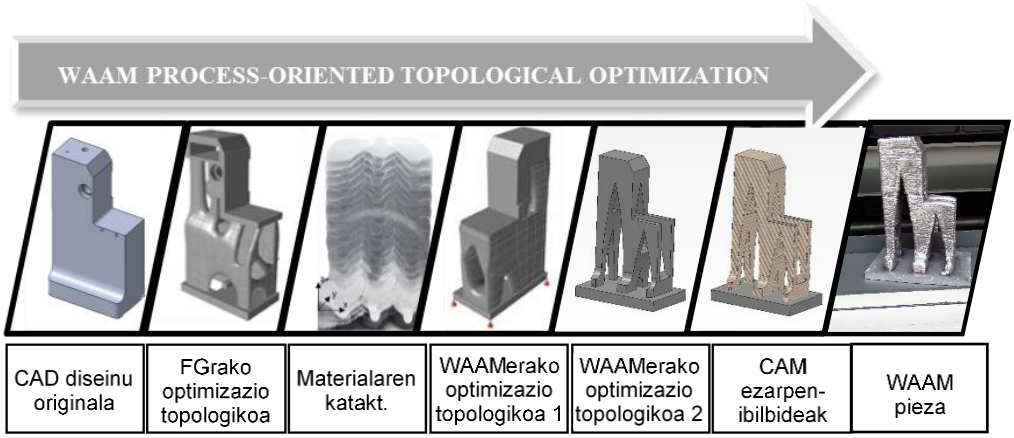
Balioztatze-pieza honekin, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuak aluminiozko piezak modu lehiakorrean fabrikatzeko ahalmena duela frogatu da.

Alde batetik, mekanizazio-prozesuekin alderatuta fabrikazio-denborak optimizatu litezke WAAM prozesuaren bidez. Bestalde, WAAM prozesuarekin materiala aurreztu daiteke, azken geometriatik gertu dauden aurreformak lortzen baitira bloketik abiatutako mekanizazio-prozesuekin alderatuta.

Gainera, pieza honetan, IV. kapituluan altzairuzko balioztatze-pieza gisa egindako alabedun piezan bezala, geometriaren eta ezarpen-estrategiaren arabera, geruza bereko zati guztiak modu berean hazi ez direla ikusi da. Adibidez, gainjartzea duten eremuak kordoi bakarreko eremuak baino gehiago hazi dira. Kasu honetan, arazo hori geruzaren zati bakoitzerako fabrikazio-parametroak (ezarpen-parametroak) doituz konpondu da, V-10. taulan ikusten den bezala. Konponbide hori, IV. kapituluan alabeak dituen piezarentzat planteatu dena (noizean behin geruzen zati batzuetan ezarpen-betegarriak sartzea) baino hobea da, hazkunde homogeneoa izateko. Izan ere, ezarpen-betegarriak sartzeko, horien ibilbideak diseinatu eta postprozesatu behar dira eta gainera, langileak adi egon behar du uneoro, betegarri horiek noiz sartu behar diren jakiteko eta ondorioz, prozesua askoz ere nekezagoa da. Horregatik guztiagatik, baldin eta geruza berean ezarpen mota desberdinak badaude beti prozesu-parametroak doituko dira, hazkunde homogeneoa lortzeko.

### 3.6.2 Aluminiozko dorreak

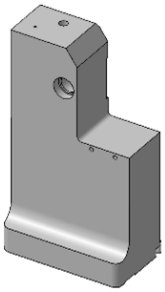
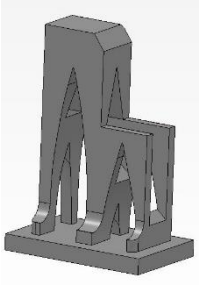
5356 aluminio-aleaziozko dorreen jatorrizko diseinutik azken fabrikaziora egindako prozesua V-16. irudian ikus daiteke. Lehenik, dorrearen diseinu originaletik abiatuta, WAAM prozesuaren murrizketak kontuan hartu gabe diseinua topologikoki optimizatu da. Ondoren, kapitulu honen aurreko ataletan egindako materialaren (WAAM bidez fabrikatutako 5356 aluminio-aleazioa) karakterizazioaren bidez, lortutako ezaugarri geometrikoak eta propietate mekanikoak zehaztu dira. Jarraian, informazio horrekin dorrearen birdiseinu topologikoki optimizatuak egin dira, WAAM prozesuaren murrizketak kontuan hartuta. Gero, PowerMill softwarearen bidez (Autodesk, Estatu Batuak) ezarpen-ibilbideak sortu dira eta azkenik, doktore-tesi honetan diseinatutako sistema robotikoaren bidez dorreak fabrikatu dira.




*V-16. irudia. Dorreak diseinatzeko eta fabrikatzeko prozesua*

Aurrez aipatu bezala, lehenik eta behin, diseinu originaletik abiatuta dorrearen diseinua optimizatu da optimizazio topologikoaren bidez, WAAM prozesuaren murrizketak kontuan hartu gabe. Diseinu hau ezin da WAAM prozesuaren bidez fabrikatu. Bigarrenik, WAAM prozesuaren murrizketak eta aluminio-aleazio horretan lortutako propietate geometrikoak eta mekanikoak kontuan hartuta, bi birdiseinu egin dira optimizazio topologikoaren bidez. V-11. taulan jatorrizko diseinuaren pisuak eta diseinu arinduenak alderatzen dira. Fabrikazio-gehigarrirako topologikoki optimizatutako diseinuan pisu-murrizketa %61-ekoa da. Aldiz, WAAMerako egokitutako lehen birdiseinuan, %31-ko pisu murrizketa lortzen da, jatorrizko diseinuarekin alderatuta. Azkenik, WAAMerako egokitutako bigarren birdiseinuan pisu-murrizketa %62,8-koa da. Hori dela eta, fabrikaziorako azken diseinu hori aukeratu da material gehiago aurrezten baita bertan.

*V-11. taula. Diseinu originalaren, FGrako topologikoki optimizatutako birdiseinuaren eta WAAMerako topologikoki optimizatutako bi birdiseinuen pisuen alderaketak*

| | **Diseinu originala** | **FGrako top. optimizatutako diseinua** | **WAAMerako top. optimizatutako diseinua 1** | **WAAMerako top. optimizatutako diseinua 2** |
|---|---|---|---|---|
| **Diseinua** |  |  |  |  |
| **Pisua** | 6 kg | 2,3 kg (↓%61) | 4,1 kg (↓%31) | 2,23 kg (↓%62,8) |

Al 5356-an dorrearen WAAMerako topologikoki optimizatutako bigarren birdiseinua egingo dela zehaztu ondoren, dorre bakar batez osatutako balioztatze-pieza eta diseinu bera duten era matrizialean fabrikatutako lau dorrez osatutako balioztatze-pieza bat egitea erabaki da. Oinarri-material gisara 15 mm-ko 5083 aluminio-aleaziozko plaka lauak erabili dira. Bestalde, piezak geruzaz geruza fabrikatzea erabaki da, modu ez jarraian. Hau da, geruzen artean geldialdiak egin dira, III. kapituluan diseinatutako sistema robotikoan instalatutako pirometroaren bidez kontrolatutako erreferentziazko itxaron-tenperatura baten zain. Hala ere, aluminioaren beroa disipatzeko gaitasun handia dela eta, kasu honetan, ez da beharrezkoa izango itxaronaldi horiek egitea.

Bi balioztatze-piezak AC pultsatu (Job 392) funtzionamendu-modua erabilita fabrikatu dira, aurreko atalean modu horrekin lortu baitira porositate baliorik baxuenak. Gainera, kasu honetan, fabrikatu beharreko piezak ez dira handiegiak; beraz, ez da hain kritikoa ezarpen-tasa balioak maximoak izatea eta nahikoa izango da AC pultsatu moduarekin lortzen direnekin eta ez da beharrezkoa izango GMAW pultsatu funtzionamendu-modua erabiltzea. V-12. taulan ikus daitezke erabilitako ezarpen-parametroak.

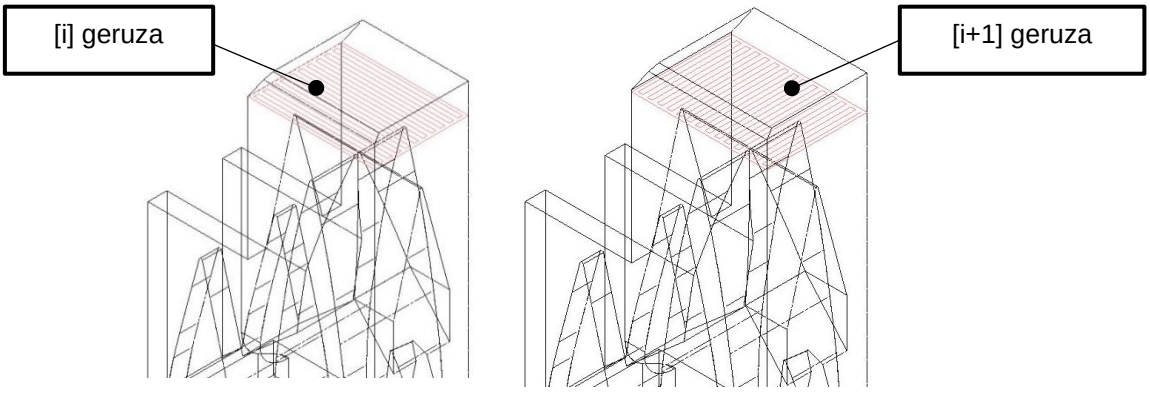
*V-12. taula. Dorre bakarra eta lau dorre matrizialak fabrikatzeko parametroak*

| Geruza zbk. | WFR (m/min) | DR (kg/h) | TS (mm/min) |
|---|---|---|---|
| 1-2 | 8 | 1,44 | 1140 |
| Gainontzekoak | 8 | 1,44 | 1540 |

Dorreen ezarpen-ibilbideak PowerMill softwarearen bidez diseinatu dira. Software honetan geruzako hazkundea eta jarraitu beharreko ibilbide mota defini daitezke eta programak nahi diren ibilbideak automatikoki kalkulatzen ditu barne algoritmoak erabiliz. Kasu honetan, piezak oszilazio-estrategiarekin fabrikatzea aukeratu da, hau da, lehenik ingurua ezartzen da eta ondoren mugimendu oszilatzaileen bidez barnealdea betetzen da (V-17. irudia).

Horretarako, kapitulu honen aurreko ataletan egindako azterketei esker (zabalera- eta altuera-ereduak, 18. eta 21. ekuazioak), erabilitako parametroekin lortutako kordoien ezaugarri geometrikoak zehaztu dira eta informazio horren bidez ezarpen-ibilbideak programatu ahal izan dira. Horrela, kordoiaren zabalera teorikoa 5 mm-tan finkatu da eta geruzaren altuera teorikoa 1,6 mm-tan. Oszilazioaren ondoz ondoko iraganaldien arteko distantzia, berriz, 3 mm-koa izan da eta oszilazioaren eta inguruko pasadaren arteko distantzia 2 mm-koa. Geruza jarraietan, oszilazioaren norabidea aldatu egin da, oszilazioak

perpendikular bihurtuz batengandik hurrengora, [i] geruzan eta [i + 1] geruzan V-17. irudian ikusten den bezala. Gainera, inguruko kordoiaren norantza ere aldatzen da geruzatik geruzara.




*V-17. irudia. Aluminiozko dorrean ondoz ondoko bi geruzaren ezarpen-ibilbideak*

Azkenik, lau dorreek osatzen duten balioztatze-pieza matriziala dorre bakarra bezala programatzen da. Hala ere, kasu honetan lau dorreak batera fabrikatzen dira, hau da, laurak aldi berean fabrikatzen dira geruzaz geruza, lehenik guztien lehen geruza eginez eta ondoren guztien hurrengo geruzara pasatuz. V-18. irudian, fabrikatutako balioztatze-pieza matriziala ikus daiteke.



*V-18. irudia. Matrizialki fabrikatutako lau dorreak*

Piezak modu matrizialean egitearen zentzua, normalean, WAAM bidez fabrikatutako piezetan fabrikazio-denbora, ezarpen-denboran (soldadura-zuzia piztuta dagoen eta materiala ezartzen ari denean), hutseko mugimendu-denboran eta geruzen arteko hozte-denboran bereizten dela da. Hozte-denboretan robota geldirik dago, pirometroak hurrengo geruza ezarri aurretik erabakitako erreferentziazko itxaron-tenperatura noiz markatuko zain. Hozteko eta mugitzeko erabiltzen diren denborek jarduerarik gabeko denbora osatzen dute (*Idle time*).

Pentsatzekoa da hozte-denbora horiek beste pieza batzuk ezartzeko erabiltzen badira, sistemaren produktibitatea nabarmen handituko dela. Hain zuzen ere, horixe egiten da ezarpen-estrategia matrizialetan, jarduerarik gabeko denborak aprobetxatzen dira beste pieza bat paraleloan fabrikatzeko. Zehazki, aluminiozko dorreetan, estrategia horrek ez du hainbesteko zentzurik, aluminio-aleazioen beroa disipatzeko gaitasun handiari esker hozte-denborak nuluak direlako. Hala ere, beste material batzuetan, hala nola, altzairuetan, nikel-aleazioetan eta Invar materialean, oso erabilgarria izan daiteke estrategia mota hori.

# 4 Ondorioak

Kapitulu honetan, III. kapituluan diseinatutako sistema robotikoaren bidez 5356 aluminio-aleazioan egindako esperimentazio guztia bildu da. Esperimentazio hau aluminio-aleazio zehatz batean gauzatzen bada ere, emaitza orokorrak, emaitza metalurgikoak eta propietate mekanikoenak izan ezik, beste aluminio-aleazio batzuetara estrapola daitezke.

Lehenik eta behin, kapitulu honetan AC pultsatu funtzionamendu-modua aztertu da eta orain arte aluminio-aleazioetarako literaturan gehien erabili diren bi funtzionamendu-moduekin alderatu da: GMAW pultsatua eta Cold Arc. Horretarako, modu bakoitzean kordoi bakarrez eta horma sinplez osatutako entsegu-bateria bat egin da. Hona hemen ateratako ondorio nagusiak:

- Soldadura-iturri sinergikoen intentsitate-seinalea, aldez aurretik funtzionamendu-modua, materiala, hariaren diametroa eta gas-babeslea ezarri badira, hariaren elikatze-abiadurak soilik kontrolatzen du. AC pultsatu moduko intentsitate-seinalea polaritate aldakorreko seinale pultsatua da; GMAW pultsatu modukoak, berriz, balio positibodun pultsuak baino ez ditu. Bestalde, Cold Arc moduko seinaleak pultsu forma desberdina du, balio positibo eta maiztasun baxuagoekin, hain sarriak ez diren tanta handiagoak lortuz. Zehazki, Cold Arc moduan transferitutako tanten bolumena ia hiru aldiz handiagoa da ezarpen-tasa altuko AC pultsatu moduan baino.
- Berriro frogatu da WAAM prozesuan bero-ekarpenak berebiziko garrantzia duela, lortutako kordoien forma geometrikoan eragin dezakeelako. GMAW pultsatu moduak bero-ekarpen handiena du, AC pultsatu moduak bigarrena eta azkenik, Cold Arc moduak baxuena. Zenbat eta handiagoa izan bero-ekarpena, orduan eta handiagoa izango da kordoiaren zabalera eta txikiagoa altuera.
- Oro har, AC pultsatu eta Cold Arc moduetan, batez beste, GMAW pultsatu moduan baino %14 eta %20 gutxiago da penetrazioa, intentsitate balio

maximoak handiagoak direlako. Hau da, zenbat eta handiagoa izan gailur-intentsitatearen balioa, orduan eta handiagoa izango da penetrazioaren sakonera.

- Entsegu-bateriari esker, halaber, funtzionamendu-modu bakoitzerako kordoi bakarren zabalera- eta altuera-ereduak sortu ahal izan dira, kapitulu honetako 16-21. ekuazioen bidez formulatuak. Eredu horiekin, ezarpen-ibilbideak programatzeko behar diren datuak lor daitezke, hala nola, gainjartze-distantzia eta geruzako hazkundea.
- Banakako kordoietan izandako emaitzen arabera, hormarik zabalena GMAW pultsatu moduarekin lortutakoa da eta estuena Cold Arc moduarekin lortua. Era berean, ondorioztatu da, bai GMAW pultsatu hormak bai AC pultsatu hormak, ondulazio gutxiago zutela Cold Arc hormarekin alderatuta.
- Hiru funtzionamendu-moduekin fabrikatutako hormetako mikroegiturak antzekoak dira: ale ekiaxialeko guneak eta ale kolumnarreko guneak tartekatzen dira, ale kolumnarrak geruza-mugetan daudelarik. Hala ere, desberdintasunak ikus daitezke banaketa granulometrikoan. AC pultsatuak batez besteko ale tamaina handiena du eta GMAW pultsatu eta Cold Arc moduetan, berriz, %17,9 eta %54,9 txikiagoa da ale tamainak, hurrenez hurren. Cold Arc moduan lortutako batez besteko ale tamaina txikiagoa prozesuko bero-ekarpen baxuari zor zaio.
- Azkenik, porositate mailaren azterketa funtsezko gaia da aluminio-aleazioen fabrikazio-gehigarrian. Pultsatutako AC moduak nabarmen murrizten du porositate maila eta ezarritako materialaren %0,13-ko balioak lortzen ditu, prozesuaren polaritate aldakorraren ondorioz.

Bigarrenik, aluminio-aleazio honetan egindako horma gainjarriaren mikroegitura eta propietate mekanikoak aztertzen dira. Horma honetan ez da akats makroskopikorik ikusten eta ale ekiaxialeko mikroegitura bat lortzen da, oinarri-materialarekin interfasea dagoen eremua aparte utzita. Gainera, 100 µm-tik beherako tamaina duten poro mikroskopikoak ere ikusi dira. Oinarri-materialarekiko lotura-eremuari dagokionez, mikroegitura kolumnar bihurtzen da eta gogortasun balioak zertxobait handitzen dira. Propietate mekanikoei dagokienez, lortutako balioak II. kapituluko 5.2 atalean adierazitako eta aurretiazko literaturan 5356 aluminio-aleazioan GMAW teknologian oinarritutako WAAM bidez fabrikatutako hormetatik ateratako balioen antzekoak dira, bai eta hariaren hornitzaileak erreferentziazko material gisara aukeratutakoaren antzekoak ere.

Azkenik, lortutako emaitzak balioztatzeko, bi balioztatze-pieza fabrikatu dira. Alde batetik, karbono-zuntzezko piezak fabrikatzeko molde bat egin da, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuak aluminiozko piezak modu lehiakorrean fabrikatzeko ahalmen handia duela frogatuz. Gainera, pieza honetan, IV. kapituluan altzairuan balioztatze-pieza gisa fabrikatutako alabedun piezan bezala, geometriaren eta ezarpen-estrategiaren arabera, geruza bereko zati guztiak ez direla modu uniformean hazten ikusi da. Kasu horietan onena geruzen zati desberdinetarako fabrikazio-parametroak doitzea dela ondorioztatu da.

Bestalde, aluminiozko dorreak egin dira, pieza bakarrak fabrikatuz eta era matrizialean aldi beran lau pieza eginez. Dorre horien jatorrizko diseinua topologikoki optimizatu da, WAAM prozesuaren murrizketak eta aluminio-aleazio horretan lortutako propietate geometrikoak eta mekanikoak kontuan hartuta. Horrela, optimizazio topologikoak diseinu arinduak lortzeko balio duela frogatu da. Optimizazio topologikoko prozesu honen emaitza %62,8-ko pisu murrizketa izan da. Bestalde, oso lagungarria izan da kapitulu honen aurreko ataletan egindako aurretiazko ikerketetan lortutako informazioa (zabalera- eta altuera-ereduak, 18. eta 21. ekuazioak) erabilitako parametroekin lortutako kordoien ezaugarri geometrikoak zehazteko eta hala, balioztatze-pieza hauen fabrikaziorako ezarpen-ibilbideak programatzeko. Kasu honetan, piezak oszilazio-ibilbideekin fabrikatzeko erabakia hartu da, hau da, lehenik piezaren ingurua egin da eta ondoren mugimendu oszilatzaile baten bidez barnea bete da.

Azkenik, lau aluminiozko dorre fabrikatu dira era matrizialean. Matrize-estrategian, pieza baten hozte-denborak erabiltzen dira beste pieza batzuk oinarri-material berean ezartzeko. Horrela, sistemaren produktibitatea nabarmen handitzen da, batez ere iraupen luzeko hozte-denborak behar dituzten materialetan.

Emaitza horiek artikulu hauetan argitaratu dira: [Aldalur, 2021-a], [Aldalur, 2021-b], [Veiga, 2021] eta [Suárez, 2021].

# *VI. KAPITULUA*

# VI. KAPITULUA: EKARPENAK ETA LANAREN ETORKIZUNEKO ILDOAK

## 1 Ekarpenak

Doktore-tesi honetan, lehenik eta behin, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuari buruzko artearen egoeraren berrikuspena burutu da. Jarraian, teknologia horren bidez piezak ezartzeko prozesu honetarako zehazki diseinatutako monitorizazio- eta kontrol-sistemak barnean dituen sistema robotiko automatiko bat garatu da. IV. kapituluan, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren azterketa sakon bat burutu da, ER70S-6 altzairu gozoan oinarrituta eta prozesu-parametroen eta ezarpen-estrategien eragina zehaztu da. Azkenik, V. kapituluan 5356 aluminio-aleazioaren ezarpena aztertu da, funtzionamendu-modu ezberdinen eragina zehaztuz.

Horrela, ikerketa-lan honen ekarpen nagusiak honako puntu hauetan laburbildu daitezke:

1- GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez piezak fabrikatzeko sistema robotiko bat garatu da. Sistema honetan, soldadura-zuzi bat, geometria *in-situ* neurtzeko eskaner laser bat eta pirometro bat ezartzen dira robot antropomorfiko baten eskumuturrean.

2- Garatutako sistema robotikoan altuera kontrolaren algoritmoa garatu eta ezarri da. Kontrol horretan, geruza bakoitzaren altuera prozesuan monitorizatutako benetako intentsitatearen arabera doitzen da, intentsitate hori balore optimoen tarte baten barruan mantentzeko.

3- GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesua egonkorra eta sendoa dela frogatu da, bai altzairuentzat eta baita aluminio-aleazioentzat ere. Emaitzek erakusten dutenez, piezen propietate mekanikoak eta integritate metalurgikoa beste prozesu batzuetan, esaterako galdaketan, lortutakoen antzekoak dira.

4- GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuko parametro nagusien eta funtzionamendu-modu desberdinen eragina aztertu da. Zehazki, hariaren elikatze-abiaduraren (WFR) eta aitzinamendu-abiaduraren (TS) eraginak aztertu dira. Gainera, hainbat funtzionamendu-moduren erabileraren analisia ere burutu da, kordoi bakarretan lortutako penetrazio, diluzio, mikroegitura eta gogortasunetan duten eragina ikertuz. Ikerketa honen bidez frogatu da Force Arc funtzionamendu-modua ez dela egokia prozesu gehigarrietarako, bero-ekarpen handia sortzen duelako. Aldiz, Cold Arc modua oso horma finak dituzten pieza zehatzak fabrikatzeko baino ez dago gomendatuta.

5- Bi ezarpen-estrategia alderatu dira, oszilazio-estrategia eta gainjartze-estrategia, geruzako hazkundeari, bero-ekarpenari, hozte- eta fabrikazio-denborei, makroegiturari, mikroegiturari, gogortasunei, propietate mekanikoei eta geometriari dagokienez. Esperimentazio horretatik ondorioztatu da estrategia oszilatuan energiaren eta beroaren kontzentrazioa handiagoa dela eta produktibitatea ere handitu egiten dela. Lortutako mikroegiturari dagokionez, desberdinak dira bi estrategietan eta UTS eta YS balioak handiagoak dira horma gainjarrian oszilatuan baino, lortutako ale tamaina txikiagoa dela eta. Azkenik, hormaren goiko gainazaleko lautasuna hobetu egiten da oszilazio-estrategiaren erabilerari esker.
6- Aluminio-aleazioetarako egokiak diren funtzionamendu-moduen eragina aztertu da: GMAW pultsatua, Cold Arc eta AC pultsatua. Lan egiteko modu hauek alderatzeko, lehenik eta behin, hiru moduekin kordoi sortak fabrikatu dira, ondoren horma sinpleak egiteko parametro optimoak zehazteko. Hiru horma sinpleak geometriari, mikroegiturari eta porositateari dagokienez aztertu eta alderatu dira. Lortutako ondorio nagusia AC pultsatu moduaren bidez ezarritako materialean porositatea nabarmen murrizten dela da.
7- Horrez gain, kordoi sorta horiei esker, kordoien zabalera- eta altuera-ereduak ere kalkulatu dira, ezarpen-ibilbideak diseinatzeko oso erabilgarriak direnak.

Ikerketa lan honen emaitzekin, hamalau argitalpen egin dira aldizkari zientifiko ezberdinetan eta hitzaldi bat eman da kongresu nazional batean.

Argitalpenak egile nagusi gisara:

- ✓ **E. Aldalur**, F. Veiga, A. Suárez, J. Bilbao, A. Lamikiz, **Analysis of the wall geometry with different strategies for high deposition wire arc additive manufacturing of mild steel**, Metals. 10 (2020) 1-19, https://doi.org/10.3390/met10070892
- ✓ **E. Aldalur**, F. Veiga, A. Suárez, J. Bilbao, A. Lamikiz, **High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties**, Journal of Manufacturing Processes. 58 (2020) 615-626, https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.08.060
- ✓ **E. Aldalur**, A. Suárez, F. Veiga, **Metal transfer modes for Wire Arc Additive Manufacturing Al-Mg alloys: Influence of heat input in microstructure and porosity**, Journal of Material Processing Technology, 297 (2021) 117271, https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2021.117271

- ✓ **E. Aldalur**, A. Panfilo, A. Súarez, J. M. Ugartemendia, **Hari metalikoetan eta arku elektrikoan oinarritutako fabrikazio-gehigarriko WAAM teknologiaren oinarriak eta aplikazioak**, EKAIA Euskal Herriko Unibertsitateko Zientzia eta Teknologia Aldizkaria. (2021), https://doi.org/10.1387/ekaia.22367
- ✓ **E. Aldalur**, A. Suárez, T. Artaza, F. Veiga, **Thermal expansion behaviour of Invar 36 alloy parts fabricated by wire-arc additive manufacturing** (Under review)

Ko-egile gisara:

- ✓ 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)

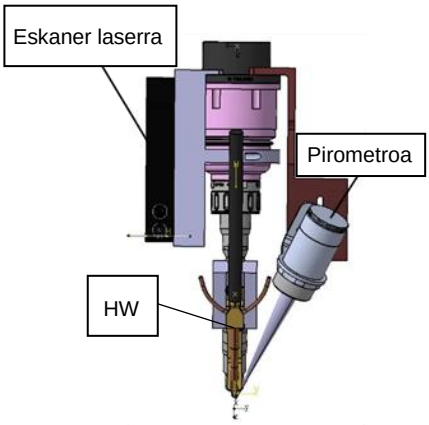
Kongresu nazionaletan ponentziak:

- ✓ **E. Aldalur,** A. Suárez, I. Tabernero, A. Lamikiz, **Desarrollo de la fabricación aditiva mediante arco eléctrico y aporte de hilo (WAAM) de alta deposición basado en** GMAW, Congreso de Máquina Herramienta (CMH), 2019.

## 2 Etorkizuneko ildoak

Doktore-tesi honetan landu den ikerketa-lerro honek GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren arlo gehiagotan lan egiteko ildo berriak irekitzen ditu. Horien artean, honako hauek nabarmendu behar dira:

- GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuan bigarren hari bero bat (HW) sartu daiteke, produktibitatea handitzeko eta material anitzeko piezak fabrikatzeko. VI-1. irudian ikusten den bezala, HWa, hari nagusiaren (elektrodoa) arku elektrikoak sortutako bainu urtuan sartzen den bigarren hari bat da. Bigarren hari horri intentsitate baxua ezartzen zaio soilik berotzeko. Lehen hariaren arku elektrikoak sortutako bero soberakina aprobetxatzen da bigarrena urtzeko. Hala, material gehiago sar daiteke prozesuan, hozte-denborak murriztuz eta diluzioa txikituz. VI-1. irudian, egun aurrera eramaten ari diren ikerketetan egileak HWari dagokionez garatu duen hasierako ideia erakusten da, bigarren hari hori III. kapituluan diseinatutako sistema robotikoan txertatzeko.




*VI-1. irudia. Doktore-tesi honetan garatu den sistema robotikoaren zuziaren irudikapena, HW gehituta*

- Etorkizuneko ikerketetan doktore-tesi honetan garatutako sistema robotikoan prozesuan zehar lanean jardungo duten monitorizazio- eta -kontrol sistema gehiago integratzeko aukera balora liteke prozesua hobeto kontrolatzeko. Aukera interesgarria litzateke bainu urtua neurtu eta kontrolatu dezakeen kamera termografiko bat gehitzea prozesuari eta beronek lortzen dituen datuei esker akatsak saihestu eta prozesua kontrolatzea.

- Doktore-tesi honetan, kordoien zabalera eta altuera ereduak sortu dira 5356 aluminio-aleaziorako. Eredu horiek material gehiagotara eta parametro-tarte handiagoetara hedatu beharko lirateke, oso baliagarriak baitira geruzen ibilbideak eta hazkundeak definitzeko.

- Etorkizuneko ikerketetan ezarpen-estrategia mota gehiago aztertu daitezke, fabrikatu beharreko geometriara hobeto egokitzeko eta ezarpen-denborak nahiz hozte eta hutsean mugitzeko denborak laburtzeko.

- Aztertu beharreko beste ildo bat, tesi honetan alde batera utzi diren hainbat ezarpen-parametroren eragina aztertzea litzateke. Izan ere, parametro guztiak kontuan hartzeak konplexutasun handia du. Hala, adibidez, tesi honetan, une oro zuzia substratuarekiko orientazio perpendikularrean erabili da, baina etorkizuneko azterketetan parametro hori aldatzea posible litzateke, ezarritako materialaren ezaugarrietan duen eragina ikusteko. Bestalde, etorkizuneko azterketetan, bi denbora bereziko prozesuaren erabilera ere aztertu beharko litzateke, material bakoitzerako arrapalen parametro onenak zehaztuz.

- Gainera, interesgarria litzateke NDT tekniken bidez GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuarekin ezarritako piezak aztertzea, haien osotasun metalurgikoa eta materialaren kalitatea ziurtatzeko. Bereziki, interesgarria izango litzateke horrelako teknikak aluminio-aleazioetan erabiltzea, mota honetako materialetan fabrikazio-gehigarriko prozesuek berez sortzen duten porositatea sakonki aztertzeko.

- Azkenik, GMAW teknologian oinarritutako WAAM prozesuaren bidez fabrikatutako piezetan beharrezkoak diren postprozesuak azter litezke, ondorengo mekanizazio prozesuak barne. Gainera, WAAM prozesua eta ondorengo mekanizazioa zinematika berean integratzeko gai diren makina hibridoen ideia ere planteatu daiteke.

# ***ERREFERENTZIAK***

# ERREFERENTZIAK


[Abe, 2020] Abe, T., Kaneko, J., & Sasahara, H. *Thermal sensing and heat input control for thin-walled structure building based on numerical simulation for wire and arc additive manufacturing*. Additive Manufacturing, 2020, 35, 101357.

[ADDILAN, 2021] ADDILAN S.L., www.addilan.com, 2021.

[Aldalur, 2020-a] Aldalur, E., Veiga, F., Suárez, A., Bilbao, J., & Lamikiz, A. *High deposition wire arc additive manufacturing of mild steel: Strategies and heat input effect on microstructure and mechanical properties.* Journal of Manufacturing Processes, 2020, 58, 615–626.

[Aldalur, 2020-b] Aldalur, E., Veiga, F., Suárez, A., Bilbao, J,. & Lamikiz, A. *Analysis of the wall geometry with different strategies for high deposition wire arc additive manufacturing of mild steel.* Metals, 2020, 10(7), 1–19.

[Aldalur, 2021-a] Aldalur, E., Panfilo, A., Súarez, A., & M. Ugartemendia, J. *Hari metalikoetan eta arku elektrikoan oinarritutako fabrikazio-gehigarriko WAAM teknologiaren oinarriak eta aplikazioak*. EKAIA Euskal Herriko Unibertsitateko Zientzia Eta Teknologia Aldizkaria, 2020.

[Aldalur, 2021-b] Aldalur, E., Suárez, A., & Veiga, F. *Metal transfer modes for Wire Arc Additive Manufacturing Al-Mg alloys: Influence of heat input in microstructure and porosity.* Journal of Material Processing Technology, 2021, 297, 117271.

[AML3D, 2021] AML3D. https://aml3d.com/, 2021.

[AMPOWER, 2020] AMPOWER. https://am-power.de/, 2020.

[Artaza, 2017] Artaza, T., Alberdi, A., Murua, M., Gorrotxategi, J., Frías, J., Puertas, G., … Suárez, A. *Design and integration of WAAM technology and in situ monitoring system in a gantry machine.* Procedia Manufacturing, 2017, 13, 778–785.

[Artaza, 2019] Artaza, T., Suárez, A., Murua, M., Garcia, J., Tabernero, I., & Lamikiz, A. *Wire Arc Additive Manufacturing of Mn4Ni2CrMo Conference Steel : Comparison of Mechanical and Metallographic Properties of PAW and GMAW.* Procedia Manufacturing, 2019, 41, 1071–1078.

[Artaza, 2020-a] Artaza, Teresa, Bhujangrao, T., Suárez, A., Veiga, F., & Lamikiz, A. *Influence of Heat Input on the Formation of Laves Phases and Hot Cracking in Plasma Arc Welding (PAW) Additive Manufacturing of Inconel 718.* Metals, 2020, 1–17.

[Artaza, 2020-b] Artaza, T., Suárez, A., Veiga, F., Braceras, I., Tabernero, I., Larrañaga, O., & Lamikiz, A. *Wire arc additive manufacturing Ti6Al4V aeronautical parts using plasma arc welding: Analysis of heat-treatment processes in different atmospheres.* Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(6), 15454–15466.

[Azarniya, 2019] Azarniya, A., Garmendia, X., Mirzaali, M. J., Yen, C., Ahn, J., Miranda, G., … Zadpoor, A. A. *Additive manufacturing of Ti6Al4V parts through laser metal deposition (LMD): Process, microstructure, and mechanical properties.* Journal of Alloys and Compounds, 2019, 804, 163–191.

[Babu, 2024] Babu, S. S. (2004). *The mechanism of acicular ferrite in weld deposits.* Current Opinion in Solid State and Materials Science, 2024, 8(3–4), 267–278.

[Bai, 2018] Bai, X., Colegrove, P., Ding, J., Zhou, X., Diao, C., Bridgeman, P., … Williams, S. *Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing.* International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 124, 504–516.

[Bandyopadhyay, 2018] Bandyopadhyay, A., & Heer, B. *Additive manufacturing of multi-material structures.* Materials Science and Engineering R: Reports. 2018.

[Baker, 1925] R. Baker. (1925). *Method of making decorative articles*. US Patent, 1–3.

[Bermingham, 2018] Bermingham, M. J., Nicastro, L., Kent, D., Chen, Y., & Dargusch, M. S. *Optimising the mechanical properties of Ti-6Al-4V components produced by wire + arc additive manufacturing with post-process heat treatments*. Journal of Alloys and Compounds, 2018.

[Bhatt, 2019] Bhatt, P. M., Kabir, A. M., Peralta, M., Bruck, H. A., & Gupta, S. K. *A robotic cell for performing sheet lamination-based additive manufacturing.* Additive Manufacturing, 2019, 27, 278–289.

[Bhavar, 2014] Bhavar, V., Kattire, P., Patil, V., Khot, S., Gujar, K., & Singh, R. *A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing.* Conference Paper, 2014.

[Caballero, 2019] Caballero, A., Ding, J., Ganguly, S., & Williams, S. *Wire + Arc Additive Manufacture of 17-4 PH stainless steel: Effect of different processing conditions on microstructure, hardness, and tensile strength*. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 268, 54–62.

[Casuso, 2021] Casuso, M., Veiga, F., Suárez, A., Bhujangrao, T., Aldalur, E., Artaza, T., … Lamikiz, A. *Model for the prediction of deformations in the manufacture of thin-walled parts by wire arc additive manufacturing technology*. Metals, 2021, 11(5).

[Chen, 2015] Chen, D., Chen, M., & Wu, C. *Effects of phase difference on the behavior of arc and weld pool in tandem P-GMAW.* Journal of Materials Processing Technology, 2015, 225, 45–55.

[Chen, 2017] Chen, J., Zong, R., Wu, C., Padhy, G. K., & Hu, Q. *Influence of low current auxiliary TIG arc on high speed TIG-MIG hybrid welding.* Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243, 131–142.

[Chin, 2020] Chin, S. Y., Dikshit, V., Priyadarshini, B. M., & Zhang, Y. *Powder-based 3D printing for the fabrication of device with micro and mesoscale features*. Micromachines, 2020, 11(7), 29–40.

[Choi, 1978] Choi, B. Y. C. L. *A Study of Microstructural Progression in As-Deposited W e l d Metal*, 1978, 1–5.

[Cong, 2015] Cong, B., Ding, J., & Williams, S. *Effect of arc mode in cold metal transfer process on porosity of additively manufactured Al-6.3%Cu alloy.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 76 (9–12), 1593–1606.

[Cong, 2017] Cong, B., Qi, Z., Qi, B., Sun, H., Zhao, G., & Ding, J. *A Comparative Study of Additively Manufactured Thin Wall and Block Structure with Al-6.3%Cu Alloy Using Cold Metal Transfer Process*. Applied Sciences, 2017, 7(3), 275.

[Cook, 2020] Cook, P. S., & Murphy, A. B. *Simulation of melt pool behaviour during additive manufacturing: Underlying physics and progress.* Additive Manufacturing, 2020, 31, 100909.

[Craveiro, 2019] Craveiro, F., Duarte, J. P., Bartolo, H., & Bartolo, P. J. *Additive manufacturing as an enabling technology for digital construction: A perspective on Construction 4.0.* Automation in Construction, 2019, 103, 251–267.

[Cunningham, 2018] Cunningham, C. R., Flynn, J. M., Shokrani, A., Dhokia, V., & Newman, S. T. *Invited review article: Strategies and processes for high quality wire arc additive manufacturing*. Additive Manufacturing, 2018, 22, 672–686.

[Damen, 2021] Damen Shipyard, https://www.damen.com/, 2021.

[Delic, 2020] Delic, M., & Eyers, D. R. *The effect of additive manufacturing adoption on supply chain flexibility and performance: An empirical analysis from the automotive industry*. International Journal of Production Economics, 2020, 228, 107689.

[Denlinger, 2015] Denlinger, E. R., Heigel, J. C., Michaleris, P., & Palmer, T. A. *Effect of inter-layer dwell time on distortion and residual stress in additive manufacturing of titanium and nickel alloys.* Journal of Materials Processing Technology, 2015, 215, 123–131.

[Derekar, 2019] Derekar, K., Lawrence, J., Melton, G., Addison, A., Zhang, X., & Xu, L. *Influence of Interpass Temperature on Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminium Alloy Components.* MATEC Web of Conferences, 2019, 269, 05001.

[Derekar, 2018] Derekar, K. S. *A review of wire arc additive manufacturing and advances in wire arc additive manufacturing of aluminium*. Materials Science and Technology, 2018.

[Derekar, 2020] Derekar, Karan S., Addison, A., Joshi, S. S., Zhang, X., Lawrence, J., Xu, L., … Griffiths, D. *Effect of pulsed metal inert gas (pulsed-MIG) and cold metal transfer (CMT) techniques on hydrogen dissolution in wire arc additive manufacturing (WAAM) of aluminium.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 107(1–2), 311–331.

[Dev Singh, 2020] Dev Singh, D., Mahender, T., & Raji Reddy, A. *Powder bed fusion process: A brief review*. Materials Today: Proceedings, 2020, 2–7.

[Dhinakaran, 2020] Dhinakaran, V., Ajith, J., Fathima Yasin Fahmidha, A., Jagadeesha, T., Sathish, T., & Stalin, B. *Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) process of nickel based superalloys- A review.* Materials Today: Proceedings, 2020, 21, 920–925.

[Dilberoglu, 2017] Dilberoglu, U. M., Gharehpapagh, B., Yaman, U., & Dolen, M. *The Role of Additive Manufacturing in the Era of Industry 4.0*. Procedia Manufacturing, 2017, 11, 545–554.

[Ding, 2015-a] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. *A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM).* Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2015, 31, 101–110.

[Ding, 2015-b] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. *Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2015, 81, 465–481.

[Dinovitzer, 2019] Dinovitzer, M., Chen, X., Laliberte, J., Huang, X., & Frei, H. *Effect of wire and arc additive manufacturing (WAAM) process parameters on bead geometry and microstructure*. Additive Manufacturing, 2019, 26, 138–146.

[Dirisu, 2019] Dirisu, P., Ganguly, S., Mehmanparast, A., Martina, F., & Williams, S. *Analysis of fracture toughness properties of wire + arc additive manufactured high strength low alloy structural steel components.* Materials Science and Engineering A, 2019, 765, 138285.

[Dos Santos, 2017] Dos Santos, E. B. F., Pistor, R., & Gerlich, A. P. *High frequency pulsed gas metal arc welding (GMAW-P): The metal beam process*. Manufacturing Letters, 2017 11, 1–4.

[Ermakova, 2019] Ermakova, A., Mehmanparast, A., & Ganguly, S. *A review of present status and challenges of using additive manufacturing technology for offshore wind applications*. Procedia Structural Integrity, 2019, 17, 29–36.

[Everton, 2016] Everton, S. K., Hirsch, M., Stavroulakis, P. I., Leach, R. K., & Clare, A. T. *Review of in-situ process monitoring and in-situ metrology for metal additive manufacturing*. Materials and Design, 2016, 95, 431–445.

[EWM, 2021] EWM. *EWM Hightec Welding.* http://www.ewm-group.com, 2021.

[ExOne, 2021] ExOne. *X1 160Pro ExOne.* https://www.exone.com/en-US/X1-160Pro, 2021.

[Eyers, 2017] Eyers, D. R., & Potter, A. T. I*ndustrial Additive Manufacturing: A manufacturing systems perspective*. Computers in Industry, 2017, 92–93, 208–218.

[Fang, 2012] Fang, C. fu, Meng, X. hui, Hu, Q. xian, Wang, F. jiang, Ren, H., Wang, H. song, … Mao, M. *TANDEM and GMAW Twin Wire Welding of Q690 Steel Used in Hydraulic Support*. Journal of Iron and Steel Research International, 2012, 19(5), 79–85.

[Fang, 2021] Fang, X., Zhang, L., Chen, G., Huang, K., Xue, F., Wang, L., … Lu, B. *Microstructure evolution of wire-arc additively manufactured 2319 aluminum alloy with interlayer hammering*.” Materials Science and Engineering A, 2021, 800(99), 140168.

[Ferraresi, 2003] Ferraresi, V. A., Figueiredo, K. M., & Ong, T. H. *Metal transfer in the aluminum gas metal arc welding.* Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2003, 25(3), 229–234.

[Frazier, 2014] Frazier, W. E. *Metal additive manufacturing: A review.* Journal of Materials Engineering and Performance, 2014, 23(6), 1917–1928.

[Fronius, 2021] Fronius, https://www.fronius.com/es-es/spain, 2021.

[GEFERTEC, 2021] GEFERTEC, https://www.gefertec.de/, 2021.

[General Electric, 2017] General Electric, *GE Global Research, 3D Printing New Parts for Aircraft Engines, 2017*.

[GE Additive, 2021-a] General Electric Additive,. X Line 2000R-Concept Laser. https://www.ge.com/additive/additive-manufacturing/machines/dmlm-machines/x-line-2000r, 2021.

[GE Additive, 2021-b] General Electric Additive. Arcam EBM Spectra L. https://www.ge.com/additive/additive manufacturing/machines/arcam-ebm-spectra-l, 2021.

[Geng, 2017] Geng, H., Li, J., Xiong, J., Lin, X., & Zhang, F. *Optimization of wire feed for GTAW based additive manufacturing*. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 243, 40–47.

[Ghaffari, 2019] Ghaffari, M., Vahedi Nemani, A., Rafieazad, M., & Nasiri, A. *Effect of Solidification Defects and HAZ Softening on the Anisotropic Mechanical Properties of a Wire Arc Additive-Manufactured Low-Carbon Low-Alloy Steel Part*. Jom, 2019, 71(11), 4215–4224.

[Gisario, 2019] Gisario, A., Kazarian, M., Martina, F., & Mehrpouya, M. *Metal additive manufacturing in the commercial aviation industry: A review*. Journal of Manufacturing Systems, 2019, 53, 124–149.

[Gokuldoss, 2017] Gokuldoss, P. K., S. K. and J. E. *Additive Manufacturing Processes : Selective Laser Melting, Electron Beam Melting and Binder Jetting — Selection Guidelines*. Materials, 2017, 10(672).

[González, 2017] González, H., Arrizubieta, I., Calleja, A., Ruiz, J. E., & Lamikiz, A. *CAM development for additive manufacturing in turbo-machinery components.* Procedia Manufacturing, 2017, 13, 802–809.

[Greer, 2019] Greer, C., Nycz, A., Noakes, M., Richardson, B., Post, B., Kurfess, T., & Love, L. *Introduction to the design rules for Metal Big Area Additive Manufacturing*. Additive Manufacturing, 2019, 27, 159–166.

[Grong, 1986] Grong, O., & Matlock, D. K. *Microstructural development in mild and low-alloy steel weld metals.* International Metals Reviews, 1986, 31(1), 27–48.

[Gu, 2014] Gu, J., Cong, B., Ding, J., Williams, S. W., & Zhai, Y. *WIRE+ARC additive manufacturing of aluminium*. *25th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium*; An Additive Manufacturing Conference, SFF 2014, 451–458.

[Gu, 2016] Gu, J., Ding, J., Williams, S. W., Gu, H., Ma, P., & Zhai, Y. *The effect of inter-layer cold working and post-deposition heat treatment on porosity in additively manufactured aluminum alloys.* Journal of Materials Processing Technology, 2016, 230, 26–34.

[Gu, 2018] Gu, J., Wang, X., Bai, J., Ding, J., Williams, S., Zhai, Y., & Liu, K. *Deformation microstructures and strengthening mechanisms for the wire+arc additively manufactured Al-Mg4.5Mn alloy with inter-layer rolling.* Materials Science and Engineering A, 2018, 712, 292–301.

[Gu, 2019] Gu, J., Gao, M., Yang, S., Bai, J., Ding, J., & Fang, X. *Pore formation and evolution in wire + arc additively manufactured 2319 Al alloy*. Additive Manufacturing, 2019, 30, 100900.

[Gu, 2020] Gu, J., Yang, S., Gao, M., Bai, J., Zhai, Y., & Ding, J. *Micropore evolution in additively manufactured aluminum alloys under heat treatment and inter-layer rolling*. Materials and Design, 2020, 186, 108288.

[Günther, 2018-a] Günther, K., Bergmann, J. P., Zhang, C., Rosenberger, M., & Notni, G. *Hot Wire-Assisted Gas Metal Arc Welding of Ni-Based Hardfacing.* Welding Journal, 2018, 97, 99–107.

[Günther, 2018-b] Günther, K., Bergmann, J. P., & Suchodoll, D. *Hot wire-assisted gas metal arc welding of hypereutectic FeCrC hardfacing alloys: Microstructure and wear properties.* Surface and Coatings Technology, 2018, 334, 420–428.

[Guo, 2013] Guo, N., & Leu, M. C. *Additive manufacturing : technology , applications and research needs.* Front. Mech. Eng., 2013, 8(3), 215–243.

[Haden, 2017] Haden, C. V., Zeng, G., Carter, F. M., Ruhl, C., Krick, B. A., & Harlow, D. G. *Wire and arc additive manufactured steel: Tensile and wear properties*. Additive Manufacturing, 2017, 16, 115–123.

[Hao, 2021] Hao, B., & Lin, G. *Additive manufacturing technology and its application in die manufacturing*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 632, 022077.

[Harrop, 2020] Harrop, J., & Collins, R. *3D Printing and Additive Manufacturing 2020-2030: COVID Edition*, 2020, Idtechex report.

[Haselhuhn, 2016] Haselhuhn, A. S., Buhr, M. W., Wijnen, B., Sanders, P. G., & Pearce, J. M. *Structure-property relationships of common aluminum weld alloys utilized as feedstock for GMAW-based 3-D metal printing*. Materials Science and Engineering A, 2016.

[Hauser, 2020] Hauser, T., Silva, A. Da, Reisch, R. T., Volpp, J., Kamps, T., & Kaplan, A. F. H. *Fluctuation effects in Wire Arc Additive Manufacturing of aluminium analysed by high-speed imaging.* Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56, 1088–1098.

[He, 2016] He, Y., Xu, Y., Chen, Y., Chen, H., & Chen, S. *Weld seam profile detection and feature point extraction for multi-pass route planning based on visual attention model.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2016, 37, 251–261.

[Hejripour, 2019] Hejripour, F., Binesh, F., Hebel, M., & Aidun, D. K. *Thermal modeling and characterization of wire arc additive manufactured duplex stainless steel*. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 272, 58–71.

[Herderick, 2011] Herderick, E. *Additive manufacturing of metals: A review*. Materials Science and Technology Conference, 2011, 2(176252), 1413–1425.

[Herzog, 2016] Herzog, D., Seyda, V., Wycisk, E., & Emmelmann, C. *Additive manufacturing of metals*. Acta Materialia, 2016, 117, 371–392.

[Horgar, 2018] Horgar, A., Fostervoll, H., Nyhus, B., Ren, X., Eriksson, M., & Akselsen, O. M. *Additive manufacturing using WAAM with AA5183 wire.* Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259, 68–74.

[Hosseini, 2019] Hosseini, E., & Popovich, V. A. *A review of mechanical properties of additively manufactured Inconel 718.* Additive Manufacturing, 2019, 30, 100877.

[Hu, 2021] Hu, Z., Hua, L., Qin, X., Ni, M., Ji, F., & Wu, M. *Molten pool behaviors and forming appearance of robotic GMAW on complex surface with various welding positions.* Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64, 1359–1376.

[Hughes, 2019] Hughes, J. P., Dos Santos, P. L., Down, M. P., Foster, C. W., Bonacin, J. A., Keefe, E. M., … Banks, C. E. *Single step additive manufacturing (3D printing) of electrocatalytic anodes and cathodes for efficient water splitting*. Sustainable Energy and Fuels, 2019, 4(1), 302–311.

[INTEGRADDE, 2021] INTEGRADDE project. http://www.integraddeproject.eu/.

[ISO/ASTM, 2015] ISO/ASTM. *ISO/ASTM 52900: Additive manufacturing - General principles - Terminology.* International Standard, 2015, 5, 1–26.

[Jafari, 2021] Jafari, D., Vaneker, T. H. J., & Gibson, I. *Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts*. Materials and Design, 2021, 202, 109471.

[Jafferson, 2021] Jafferson, J. M., & Chatterjee, D. *A review on polymeric materials in additive manufacturing.* Materials Today: Proceedings, 2021.

[Jardon, 2020] Jardon, Z., Guillaume, P., Ertveldt, J., Hinderdael, M., & Arroud, G. *Offline powder-gas nozzle jet characterization for coaxial laser-based Directed Energy Deposition*. Procedia CIRP, 2020, 94, 281–287.

[Jia, 2020] Jia, C., Liu, W., Chen, M., Guo, M., Wu, S., & Wu, C. *Investigation on arc plasma, droplet, and molten pool behaviours in compulsively constricted WAAM*. Additive Manufacturing, 2020, 34, 101235.

[Jin, 2020] Jin, W., Zhang, C., Jin, S., Tian, Y., Wellmann, D., & Liu, W. *Wire arc additive manufacturing of stainless steels: A review*. Applied Sciences, 2020, 10(5).

[Kah, 2013] Kah, P., Suoranta, R., & Martikainen, J. *Advanced gas metal arc welding processes.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(1–4), 655–674.

[Karlsson, 2019] Karlsson, D., Lindwall, G., Lundbäck, A., Amnebrink, M., Boström, M., Riekehr, L., … Jansson, U. *Binder Jetting of the AlCoCrFeNi Alloy.* Additive Manufacturing, 2019.

[Kim, 1993] Kim, Y.-S., & Eagar, T. W. *Metal Transfer in Pulsed Current Gas Metal Arc Welding.* Welding Research Supplement, 1993, 279–287.

[Kittel, 2020] Kittel, J., Gasser, A., Wissenbach, K., Zhong, C., Schleifenbaum, J. H., Palm, F., … Siadat, A. *Case study on AM of an IN718 aircraft component using the LMD process*. Procedia CIRP, 2020, 94, 324–329.

[Klein, 2020] Klein, T., Schnall, M., Gomes, B., Warczok, P., Fleischhacker, D., & Morais, P. J. *Wire-arc additive manufacturing of a novel high-performance Al-Zn-Mg-Cu alloy: Processing, characterization and feasibility demonstration.* Additive Manufacturing, 2020, 101663.

[Kunchala, 2018] Kunchala, P., & Kappagantula, K. *3D printing high density ceramics using binder jetting with nanoparticle densifiers*. Materials and Design, 2018, 155, 443–450.

[Lee, 2017] Lee, J. Y., An, J., & Chua, C. K. *Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials.* Applied Materials Today, 2017, 7, 120–133.

[Lee, 2013] Lee, K. B., Kim, C., & Kim, D. S. *High deposition rate pulse gas metal arc welding for Al 5083 thick plate*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227(6), 848–854.

[Li, 2019] Li, N., Huang, S., Zhang, G., Qin, R., Liu, W., Xiong, H., … Blackburn, J. *Progress in additive manufacturing on new materials: A review.* Journal of Materials Science and Technology, 2019, 35(2), 242–269.

[Li, 2020-a] Li, C., Gu, H., Wang, W., Wang, S., Ren, L., & Wang, Z. *Effect of Heat Input on Formability , Microstructure , and Properties of Al–7Si–0.6Mg Alloys Deposited by CMT-WAAM Process.* Applied Sciences, 2020, 10, 70.

[Li, 2020-b] Li, S., Zhang, L. J., Ning, J., Wang, X., Zhang, G. F., Zhang, J. X., … Fatemeh, B. *Comparative study on the microstructures and properties of wire+arc additively manufactured 5356 aluminium alloy with argon and nitrogen as the shielding gas*. Additive Manufacturing, 2020, 34, 101206.

[Liang, 2018] Liang, Z., Jinglong, L., Yi, L., Jingtao, H., Chengyang, Z., Jie, X., & Dong, C. *Characteristics of metal droplet transfer in wire-arc additive manufacturing of aluminum alloy*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018.

[Liberini, 2017] Liberini, M., Astarita, A., Campatelli, G., Scippa, A., Montevecchi, F., Venturini, G., … Squillace, A. *Selection of Optimal Process Parameters for Wire Arc Additive Manufacturing.* In Procedia CIRP, 2017, 470–474.

[Lincoln Electric Additive, 2021] Lincoln Electric Additive. https://additive.lincolnelectric.com/, 2021.

[Lu, 2018] Lu, X., Lin, X., Chiumenti, M., Cervera, M., Li, J. J., Ma, L., … Huang, W. *Finite element analysis and experimental validation of the thermomechanical behavior in laser solid forming of Ti-6Al-4V.* Additive Manufacturing, 2018, 21, 30–40.

[Luo, 2018] Luo, Y., Li, J., Xu, J., Zhu, L., Han, J., & Zhang, C. *Influence of pulsed arc on the metal droplet deposited by projected transfer mode in wire-arc additive manufacturing*. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 259, 353–360.

[Ma, 2019] Ma, G., Zhao, G., Li, Z., Yang, M., & Xiao, W. *Optimization strategies for robotic additive and subtractive manufacturing of large and high thin-walled aluminum structures*. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019, 101, 1275–1292.

[Martina, 2015-a] Martina, F., & Williams, S. *Wire + arc additive manufacturing vs. traditional machining from solid: a cost comparison*, 2015.

[Martina, 2015-b] Martina, F., Colegrove, P. A., Williams, S. W., & Meyer, J. *Microstructure of Interpass Rolled Wire + Arc Additive Manufacturing Ti-6Al-4V Components.* Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science, 2015, 46(12), 6103–6118.

[Martina, 2018] Martina, F., Ding, J., Williams, S., Caballero, A., Pardal, G., & Quintino, L. *Tandem Metal Inert Gas process for high productivity Wire Arc Additive Manufacturing in stainless steel.* Additive Manufacturing, 2018.

[McAndrew, 2018] McAndrew, A. R., Alvarez Rosales, M., Colegrove, P. A., Hönnige, J. R., Ho, A., Fayolle, R., … Pinter, Z. *Interpass rolling of Ti-6Al-4V wire + arc additively manufactured features for microstructural refinement*. Additive Manufacturing, 2018, 21, 340–349.

[Mcwilliams, 2017] Mcwilliams, A., & Spivey, C. *3D Metal Printing : Dark Art or Modern Blacksmith?,* 2017.

[Michel, 2019] Michel, F., Lockett, H., Ding, J., Martina, F., Marinelli, G., & Williams, S. *A modular path planning solution for Wire + Arc Additive Manufacturing*. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 60, 1–11.

[Montevecchi, 2018] Montevecchi, F., Venturini, G., Grossi, N., Scippa, A., & Campatelli, G. *Idle time selection for wire-arc additive manufacturing: A finite element-based technique*. Additive Manufacturing, 2018, 21, 479–486.

[Mughal, 2005] Mughal, M. P., Fawad, H., Mufti, R. A., & Siddique, M. *Deformation modelling in layered manufacturing of metallic parts using gas metal arc welding: Effect of process parameters*. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2005, 13(7), 1187–1204.

[MX3D, 2021] MX3D. https://mx3d.com/, 2021.

[Nagesh, 2002] Nagesh, D. S., & Datta, G. L. *Prediction of weld bead geometry and penetration in shielded metal-arc welding using artificial neural networks.* Journal of Materials Processing Technology, 2002.

[Nassan, 2003] Nassan, J. *Gas Metal Arc Welding: Process Overview*, 96. Lincoln Electric.

[Ng, 2009] Ng, G. K. L., Jarfors, A. E. W., Bi, G., & Zheng, H. Y. *Porosity formation and gas bubble retention in laser metal deposition*. Applied Physics A: Materials Science and Processing, 97(3), 641–649.

[Oliveira, 2020] Oliveira, J. P., Santos, T. G., & Miranda, R. M. *Revisiting fundamental welding concepts to improve additive manufacturing: From theory to practice.* Progress in Materials Science, 2020, 107, 100590.

[Pan, 2018] Pan, Z., Ding, D., Wu, B., Cuiuri, D., Li, H., & Norrish, J*. Arc Welding Processes for Additive Manufacturing: A Review*. Transactions on Itelligent Welding Manufacturing, 2018.

[Panchenko, 2020] Panchenko, O., Kurushkin, D., Mushnikov, I., Khismatullin, A., & Popovich, A. *A high-performance WAAM process for Al–Mg–Mn using controlled short-circuiting metal transfer at increased wire feed rate and increased travel speed*. Materials and Design, 2020, 195, 109040.

[Paolini, 2019] Paolini, A., Kollmannsberger, S., & Rank, E. *Additive manufacturing in construction: A review on processes, applications, and digital planning methods.* Additive Manufacturing, 2019, 30, 100894.

[Parandoush, 2017] Parandoush, P., & Lin, D. *A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites.* Composite Structures, 2017, 182, 36–53.

[Ponche, 2014] Ponche, R., Kerbrat, O., Mognol, P., & Hascoet, J. Y. *A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2014, 30(4), 389–398.

[Prado-Cerqueira, 2017] Prado-Cerqueira, J. L., Diéguez, J. L., & Camacho, A. M. *Preliminary development of a Wire and Arc Additive Manufacturing system (WAAM).* Procedia Manufacturing, 2017, 13, 895–902.

[Pragana, 2021] Pragana, J. P. M., Sampaio, R. F. V., Bragança, I. M. F., Silva, C. M. A., & Martins, P. A. F. Hybrid metal additive manufacturing: A state-of-the-art review. Advances in Industrial and Manufacturing Engineering, 2021, 2, 100032.

[Qi, 2018] Qi, Z., Cong, B., Qi, B., Sun, H., Zhao, G., & Ding, J. *Microstructure and mechanical properties of double-wire + arc additively manufactured Al-Cu-Mg alloys*. Journal of Materials Processing Technology, 2018.

[Queguineur, 2018] Queguineur, A., Rückert, G., Cortial, F., & Hascoët, J. Y. *Evaluation of wire arc additive manufacturing for large-sized components in naval applications*. Welding in the World, 2018, 62(2), 259–266.

[RAMLAB, 2021] RAMLAB, https://www.ramlab.com/case-studies/.

[Rezvani, 2021] Rezvani Ghomi, E., Khosravi, F., Neisiany, R. E., Singh, S., & Ramakrishna, S. *Future of additive manufacturing in healthcare.* Current Opinion in Biomedical Engineering, 2021, 17, 100255.

[Rodrigues, 2019-a] Rodrigues, T. A., Duarte, V., Avila, J. A., Santos, T. G., Miranda, R. M., & Oliveira, J. P. *Wire and arc additive manufacturing of HSLA steel: Effect of thermal cycles on microstructure and mechanical properties.* Additive Manufacturing, 2019, 27, 440–450.

[Rodrigues, 2019] Rodrigues, T. A., Duarte, V., Miranda, R. M., Santos, T. G., & Oliveira, J. P. *Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM).* Materials, 2019, 12, 1121.

[Saboori, 2019] Saboori, A., Aversa, A., Marchese, G., Biamino, S., Lombardi, M., & Fino, P. *Application of directed energy deposition-based additive manufacturing in repair.* Applied Sciences, 2019, 9(16).

[Sahasrabudhe, 2018-a] Sahasrabudhe, O. S., & Raut, D. *Effect of heat source positioning on hybrid TIG-MAG arc welding process.* Materials Today: Proceedings, 2018, 5(9), 18518–18526.

[Sahasrabudhe, 2018-a] Sahasrabudhe, O. S., & Raut, D. N. *Analytic framework on parameter ranking for hybrid TIG MAG arc welding of mild steel.* Journal of Advanced Research, 2018, 12, 27–37.

[Sames, 2016] Sames, W. J., List, F. A., Pannala, S., Dehoff, R. R., & Babu, S. S. *The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing*. International Materials Reviews, 2016, 61(5), 315–360.

[Satish Prakash, 2018] Satish Prakash, K., Nancharaih, T., & Subba Rao, V. V. *Additive Manufacturing Techniques in Manufacturing - An Overview.* Materials Today: Proceedings, 2018, 5(2), 3873–3882.

[SCIAKY, 2021] Sciaky, *Sciaky, powder vs wire*. https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/wire-vs-powder, 2021.

[Scotti, 2012] Scotti, A., Ponomarev, V., & Lucas, W. *A scientific application oriented classification for metal transfer modes in GMAW welding.* Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(6), 1406–1413.

[Scotti, 2014] Scotti, A., Ponomarev, V., & Lucas, W. *Interchangeable metal transfer phenomenon in GMA welding: Features, mechanisms, classification.* Journal of Materials Processing Technology, 2014, 214(11), 2488–2496.

[Scotti, 2020] Scotti, F. M., Teixeira, F. R., Silva, L. J. da, de Araújo, D. B., Reis, R. P., & Scotti, A. *Thermal management in WAAM through the CMT Advanced process and an active cooling technique.* Journal of Manufacturing Processes, 2020, 57, 23–35.

[Selvi, 2018] Selvi, S., Vishvaksenan, A., & Rajasekar, E. *Cold metal transfer (CMT) technology - An overview.* Defence Technology, 2018, 14(1), 28–44.

[Shassere, 2019] Shassere, B., Nycz, A., Noakes, M. W., Masuo, C., & Sridharan, N. *Correlation of microstructure and mechanical properties of Metal Big Area Additive Manufacturing.* Applied Sciences, 2019, 9(4).

[Sheoran, 2020] Sheoran, A. J., Kumar, H., Arora, P. K., & Moona, G. *Bio-medical applications of additive manufacturing: A review*. Procedia Manufacturing, 2020, 51, 663–670.

[Shi, 2020] Shi, G., Guan, C., Quan, D., Wu, D., Tang, l., & Gao, T. *An aerospace bracket designed by thermo-elastic topology optimization and manufactured by additive manufacturing*. Chinese Journal of Aeronautics, 2020, 33(4), 1252–1259.

[Shukla, 2020] Shukla, P., Dash, B., Kiran, D. V., & Bukkapatnam, S. *Arc Behavior in Wire Arc Additive Manufacturing Process.* Procedia Manufacturing, 2020, 48, 725–729.

[Simchi, 2003] Simchi, A., Petzoldt, F., & Pohl, H. *On the development of direct metal laser sintering for rapid tooling*. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 141(3), 319–328.

[Singh, 2019] Singh, R., Gupta, A., Tripathi, O., Srivastava, S., Singh, B., Awasthi, A., … Saxena, K. K. *Powder bed fusion process in additive manufacturing: An overview.* Materials Today: Proceedings, 2019, 26, 3058–3070.

[Singh, 2020] Singh, S. R., & Khanna, P. *Wire arc additive manufacturing (WAAM): A new process to shape engineering materials.* Materials Today: Proceedings, 2020.

[Somashekara, 2017] Somashekara, M. A., & Suryakumar, S. *Studies on Dissimilar Twin-Wire Weld-Deposition for Additive Manufacturing Applications.* Transactions of the Indian Institute of Metals, 2017, 70(8), 2123–2135.

[Starke, 2010] Starke, E. A., & Staley, J. T. *Application of modern aluminium alloys to aircraft. Fundamentals of Aluminium Metallurgy: Production,* Processing and Applications, 2010, Woodhead Publishing Limited.

[Su, 2019] Su, C., Chen, X., Gao, C., & Wang, Y. *Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloys fabricated by WAAM.* Applied Surface Science, 2019, 486, 431–440.

[Suárez, 2021] Suárez, A., Aldalur, E., Veiga, F., Artaza, T., Tabernero, I., & Lamikiz, A. *Wire arc additive manufacturing of an aeronautic fitting with different metal alloys: From the design to the part*. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 64, 188–197.

[Subramaniam, 1999] Subramaniam, S., White, D. R., Jones, J. E., & Lyons, D. W. *Experimental approach to selection of pulsing parameters in pulsed GMAW.* Welding Journal (Miami, Fla), 1999, 78(5), 166–172.

[Sun, 2021] Sun, C., Wang, Y., McMurtrey, M. D., Jerred, N. D., Liou, F., & Li, J. *Additive manufacturing for energy: A review.* Applied Energy, 2021, 282.

[Tabernero, 2018] Tabernero, I., Paskual, A., Álvarez, P., & Suárez, A. *Study on Arc Welding Processes for High Deposition Rate Additive Manufacturing.* Procedia CIRP, 2018, 68, 358–362.

[Taşdemir, 2020] Taşdemir, A., & Nohut, S. *An overview of wire arc additive manufacturing (WAAM) in shipbuilding industry*. Ships and Offshore Structures, 2020, 0(0), 1–18.

[Tofail, 2018] Tofail, S. A. M., Koumoulos, E. P., Bandyopadhyay, A., Bose, S., O'Donoghue, L., & Charitidis, C. *Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities.* Materials Today, 2018, 21(1), 22–37.

[Udroiu, 2012] Udroiu, R. *Powder Bed Additive Manufacturing Systems and its applications.* Academic Journal of Manufacturing Engineering, 2012, 10(4), 122–129.

[UNE-EN ISO 148-1] Materiales metálicos. Ensayo de flexión por choque con péndulo Charpy. Parte 1: Método de ensayo, UNE-EN ISO 148-1, Abril 2016.

[UNE-EN ISO 6507-1] Normalización Española, Materiales Metálicos. Ensayo de dureza Vickers. Parte 1: Método de ensayo, UNE- EN ISO 6507-1, October 2018.

[UNE-EN ISO 6892- 1] Normalización Española, Materiales Metálicos. Ensayo de tracción. Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente, UNE-EN ISO 6892- 1, February 2017.

[Urhal, 2019] Urhal, P., Weightman, A., Diver, C., & Bartolo, P. *Robot assisted additive manufacturing: A review.* Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2019, 59, 335–345.

[Veiga, 2019] Veiga, F., Del Val, A. G., Suárez, A., & Alonso, U. *Analysis of the machining process of titanium Ti6Al-4V parts manufactured by wire arc additive manufacturing (WAAM).* Materials, 2019, 13(3), 766.

[Veiga, 2021] Veiga, F., Suárez, A., Aldalur, E., Goenaga, I., & Amondarain, J. *Wire arc additive manufacturing process for topologically optimized aeronautical fixtures*. 3D Printing and Additive Manufacturing, 2021, 0, 0.

[Venturini, 2016] Venturini, G., Montevecchi, F., Scippa, A., & Campatelli, G. *Optimization of WAAM Deposition Patterns for T-crossing Features.* Procedia CIRP, 2016, 55, 95–100.

[Vimal, 2020] Vimal, K. E. K., Naveen Srinivas, M., & Rajak, S. *Wire arc additive manufacturing of aluminium alloys: A review*. Materials Today: Proceedings, 2020.

[WAAMMAT, 2021] WAAMMAT, https://waammat.com/, 2021.

[Wang, 2019] Wang, L., Xue, J., & Wang, Q. *Correlation between arc mode, microstructure, and mechanical properties during wire arc additive manufacturing of 316L stainless steel.* Materials Science and Engineering A, 2019, 751, 183–190.

[Wang, 2017] Wang, Q., Qi, B., Cong, B., & Yang, M. *Output characteristic and arc length control of pulsed gas metal arc welding process.* Journal of Manufacturing Processes, 2017, 29, 427–437.

[Williams, 2016-a] Williams, S. *WAAM - Current and Future Developments*. In Defence IQ Additive Manufacturing for Aerospace, Defence and Space conference, 2016.

[Williams, 2016-b] Williams, S. W., Martina, F., Addison, A. C., Ding, J., Pardal, G., & Colegrove, P. *Wire + Arc additive manufacturing*. Materials Science and Technology, 2016, 32(7), 641–647.

[Wu, 2018-a] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., & Li, H. *Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing*. Additive Manufacturing, 2018, 23, 151–160.

[Wu, 2018-b] Wu, B., Pan, Z., Ding, D., Cuiuri, D., Li, H., Xu, J., & Norrish, J. *A review of the wire arc additive manufacturing of metals: properties, defects and quality improvement*." Journal of Manufacturing Processes, 2018, 35, 127–139.

[Wu, 2004] Wu, C. S., Chen, M. A., & Li, S. K. *Analysis of excited droplet oscillation and detachment in active control of metal transfer.* Computational Materials Science, 2004, 31(1–2), 147–154.

[Xia, 2020] Xia, C., Pan, Z., Polden, J., Li, H., Xu, Y., Chen, S., & Zhang, Y. *A review on wire arc additive manufacturing: Monitoring, control and a framework of automated system*. Journal of Manufacturing Systems, 2020, 57, 31–45.

[Xiong, 2018] Xiong, J., Li, Y., Li, R., & Yin, Z. *Influences of process parameters on surface roughness of multi-layer single-pass thin-walled parts in GMAW-based additive manufacturing*. Journal of Materials Processing Technology, 2018, 252, 128–136.

[Xiong, 2016] Xiong, J., Yin, Z., & Zhang, W. *Closed-loop control of variable layer width for thin-walled parts in wire and arc additive manufacturing.* Journal of Materials Processing Technology, 2016, 233, 100–106.

[Xiong, 2013] Xiong, J., & Zhang, G. *Online measurement of bead geometry in GMAW-based additive manufacturing using passive vision.* Measurement Science and Technology, 2013, 24(11).

[Xu, 2019] Xu, X., Ding, J., Ganguly, S., Diao, C., & Williams, S. *Preliminary Investigation of Building Strategies of Maraging Steel Bulk Material Using Wire + Arc Additive Manufacture*. Journal of Materials Engineering and Performance, 2019, 28(2), 594–600.

[Ya, 2018] Ya, W., & Hamilton, K. *On-Demand Spare Parts for the Marine Industry with Directed Energy Deposition: Propeller Use Case.* Industrializing Additive Manufacturing-Proceedings of Additive Manufacturing in Products and Applications - AMPA2017, 2018, 4.

[Yang, 2016] Yang, D., He, C., & Zhang, G. *Forming characteristics of thin-wall steel parts by double electrode GMAW based additive manufacturing.* Journal of Materials Processing Technology, 2016, 227, 153–160.

[Yang, 2017] Yang, D., Wang, G., & Zhang, G. *Thermal analysis for single-pass multi-layer GMAW based additive manufacturing using infrared thermography.* Journal of Materials Processing Technology, 2017, 244, 215–224.

[Yao, 2016] Yao, P., Xue, J., Zhou, K., Wang, X., & Zhu, Q. *Symmetrical transition waveform control on double-wire MIG welding.* Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229, 111–120.

[Yili, 2018] Yili, D., Shengfu, Y., Yusheng, S., Tianying, H., & Lichao, Z. *Wire and arc additive manufacture of high-building multi-directional pipe joint.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2018 96(5–8), 2389–2396.

[Zhang, 2019] Zhang, B., Zhang, L., Wang, C., Wang, Z., & Gao, Q. *Microstructure and properties of Al alloy ER5183 deposited by variable polarity cold metal transfer.* Journal of Materials Processing Technology, 2019, 267, 167–176.

[Zhang, 2018-a] Zhang, C., Li, Y., Gao, M., & Zeng, X. *Wire arc additive manufacturing of Al-6Mg alloy using variable polarity cold metal transfer arc as power source.* Materials Science and Engineering A, 2018, 711, 415–423.

[Zhang, 2020-a] Zhang, G., Xiong, H., Yu, H., Qin, R., Liu, W., & Yuan, H. *Microstructure evolution and mechanical properties of wire-feed electron beam additive manufactured Ti-5Al-2Sn-2Zr-4Mo-4Cr alloy with different subtransus heat treatments*. Materials and Design, 2020, 195(8), 109063.

[Zhang, 2020-b] Zhang, P., Li, G., Yan, H., & Tian, Y. *Effect of positive/negative electrode ratio on cold metal transfer welding of 6061 aluminum alloy.* International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2020, 106(3–4), 1453–1464.

[Zhang, 2020-c] Zhang, X., Wu, X., & Shi, J. *Additive manufacturing of zirconia ceramics: a state-of-the-art review*. Journal of Materials Research and Technology, 2020, 9(4), 9029–9048.

[Zhang, 2003] Zhang, Y. M., Chen, Y., Li, P., & Male, A. T. *Weld deposition-based rapid prototyping: A preliminary study.* Journal of Materials Processing Technology, 2003, 135(2-3 SPEC.), 347–357.

[Zhang, 2002] Zhang, Y. M., Li, P., Chen, Y., & Male, A. T. *Automated system for welding-based rapid prototyping.* Mechatronics, 2002 12(1), 37–53.

[Zhang, 2018-b] Zhang, Y., Wu, L., Guo, X., Kane, S., Deng, Y., Jung, Y. G., … Zhang, J. *Additive Manufacturing of Metallic Materials: A Review.* Journal of Materials Engineering and Performance, 2018, 27(1), 1–13.

[Zheng, 2021] Zheng, H., Qi, B., & Yang, M. *Dynamic analysis of the ultrasonic-frequency pulsed GMAW metal transfer process.* Journal of Manufacturing Processes, 2020, 62, 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.