

Aurrerapenak hari bidezko fabrikazio gehigarriko ereduetan

(*Advances in wire based Additive Manufacturing modeling*)

Amaia Montilla*, Jon Iñaki Arrizubieta, Aizpea Urresti, Eneko Ukar, Aitzol Lamikiz

Mekanika Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola, Euskal Herriko Unibertsitatea (EHU)


LABURPENA: Lan honetan hari bidezko fabrikazio gehigarriko prozesuen (WAAM eta DED-LB) modelaketa aztertzen da multieskala ikuspuntutik, prozesuaren ulermen osoa lortzeko mikro, meso eta makroeskalen arteko elkarrekintza kontuan hartuz. Nahiz eta eskala guztiek duten garrantzia nabarmendu, lanaren ardatza mesoeskalan jartzen da, kordioen sekzio-geometria, galda-bainuaren portaera eta tenperatura-banaketa lokalak erabakitzen baitituzte prozesuaren emaitzak. Mesoeskalan erabilitako eredu desberdinak aztertzen dira: formulazio analitikoak, oreka termo-kapilarrean eta grabitatorioan oinarritutako ereduak, fisika sakonean oinarritutako ordenagailuzko jariakinen dinamika (CFD) simulazioak eta azken urteotan garatutako datuetan oinarritutako *Machine Learning* (ML) eta eredu hibridoak. Azterketa horren bidez erakusten da CFD ereduak direla akademikoki egokienak fisika sakon eta koherentea jasotzeko, nahiz eta kalkulu-kostu handia duten; aldiz, MLean oinarritutako hurbilketek konputazio-efizientzia eta aplikagarritasun handiagoa dute industria testuinguruan. Mikroeskalaren ikuspegitik, solidifikazio-fenomenoen azalpena txertatzen da, eta makroeskalen, beroaren hedapenak eta distortsioen bilakaerak duten garrantzia azpimarratzen da. Azkenean, prozesua modu integralean ulertzeko, hiru eskalen arteko datuen transferentzia eta bateragarritasuna funtsezkoak direla ondorioztatzen da.

GAKO-HITZAK: Fabrikazio Gehigarria; WAAM; DED-LB; Multieskala; Mesoeskala.

ABSTRACT: *This work analyzes the modeling of wire-based additive manufacturing processes (WAAM and DED-LB) from a multiscale perspective, considering the interaction between the micro, meso, and macroscales to achieve a comprehensive understanding of the process. Although the relevance of all scales is acknowledged, the core focus of the work is placed on the mesoscale, as bead cross-sectional geometry, meltpool behavior, and local temperature distribution largely govern the final process outcomes. Several modeling approaches used at the mesoscale are examined, including analytical formulations, thermo-capillary and gravitational balance models, physics-based computational fluid dynamic (CFD) simulations, and recent data-driven Machine Learning (ML) and hybrid approaches. The analysis shows that CFD models are the most suitable in academic contexts due to their ability to capture detailed and coherent physics, despite their high computational cost; conversely, ML-based approaches offer greater computational efficiency and practical applicability in industrial environments. From the microscale perspective, the role of solidification phenomena is outlined, while at the macroscale, the influence of heat propagation and distortion evolution is highlighted. Ultimately, it is concluded that achieving an integral understanding of the process requires consistent data transfer and compatibility across the three scales.*

KEYWORDS: Additive Manufacturing; WAAM; DED-LB; Multiscale; Mesoscale.

1

***Harremanetan jartzeko/ Corresponding author:** Amaia Montilla Allende, Bilboko Ingeniaritza Eskola, Plaza Ingeniero Torres Quevedo, 1, Bilbao.  amaia.montilla@ehu.eus

Nola aipatu / How to cite: Montilla, Amaia; Arrizubieta, Iñaki; Urresti, Aizpea; Ukar, Eneko; Lamikiz, Aitzol (2026). << Aurrerapenak hari bidezko fabrikazio gehigarriko ereduetan >>, Ekaia, 49, xx-xx. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.28195>)

Jasoa: urtarrilak 20, 2026; Onartua: martxoak 24, 2026

ISSN 0214-9001-e-ISSN 2444-3225 / © 2026 UPV/EHU



Obra Creative Commons Atribución 4.0 Internacional-en lizentzian dago

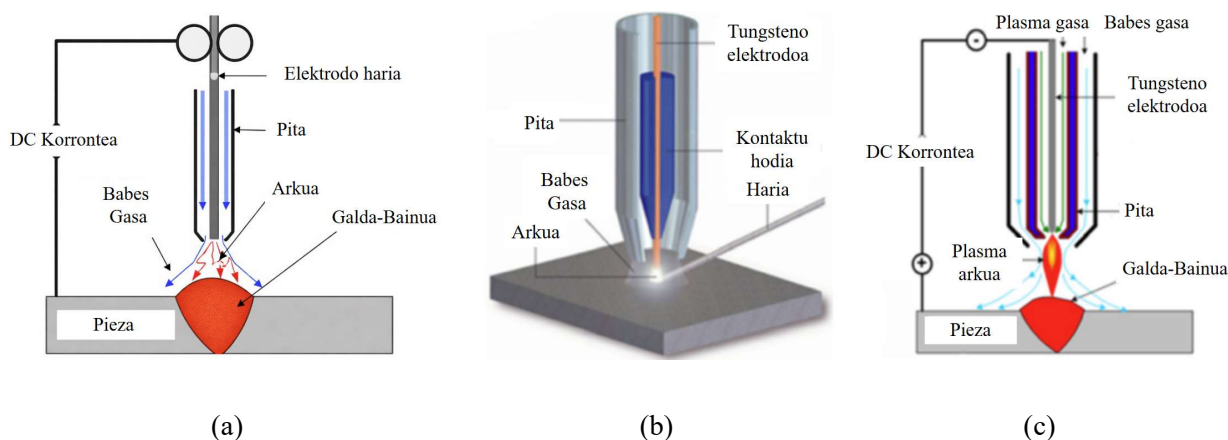
1. SARRERA

Arku eta hari bidezko fabrikazio gehigarria (WAAM, *Wire Arc Additive Manufacturing*) eta hari eta laser bidezko zuzeneko energia-jalkitzea (DED-LB, *Laser-Based Directed Energy Deposition*) tamaina handiko pieza metalikoak fabrikatzeko teknika eraginkor gisa finkatu dira, geruzaz geruza urrutako materiala gehituz. Hari eta laser bidezko DEDan, laser-iturri batek gehikuntza-materiala urtzen du (haria); WAAMean, berriz, arku elektriko bat erabiltzen da haria urtzeko, eta, horrela, tamaina handiko osagaietarako egokiak diren gehikuntza-tasa handiak lortzen dira. Prozesu horiek abantaila anitzak eskaintzen dituzte, ondoren zerrendatuko direnak, baina baita erronka handiak ere: ziklo termiko azkarrek tenperatura-gradiente handiak, bero-metaketa, hondar-tentsioak eta akatsak sortzen dituzte (porositatea, arrakalak, gainazal-akabera eskasa, etab.), eta piezen kalitateari negatiboki eragiten diote [1], [2].

Prozesu hauek dakartzaten onuren artean, ondorengoak dira adierazgarriak:

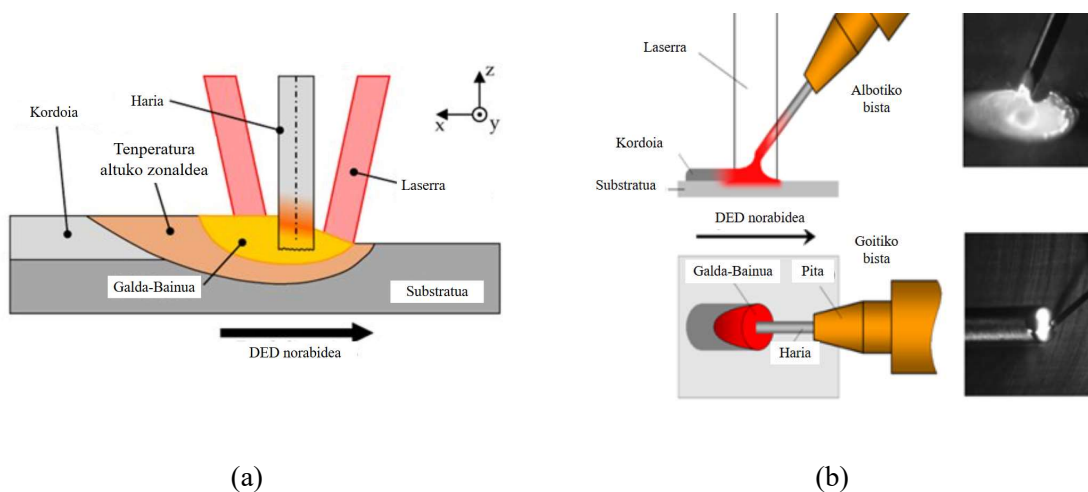
- Materialaren aprobetxamendu eraginkorra: bukaerako geometriara hurbiltzen diren formak lortzen dira, material hondakinak minimizatuz.
- Diseinuaren malgutasun handia: piezen konfigurazio geometrikoak askatasunez planteatzeko aukera eskaintzen du fabrikazio tradizionalarekin konparatuta.
- Tamaina handiko piezak fabrikatzeko ahalmena: ez dute tamaina-mugarik, beste fabrikazio gehigarriko prozesu batzuek ez bezala.
- Piezak konpontzeko gaitasuna: higitutako edo kalteturiko elementuak konpondu daitezke, horien bizi-zikloa luzatuz.
- Segurtasun handiagoa erabiltzailearentzat eta inguruko langileentzat: gehitutako materiala hari-formatuan aplikatzen denez, hauts-formatuan oinarritutako prozesuek sortzen dituzten arriskuak murrizten dira.

WAAM mota nagusiak erabilitako soldadura-prozesuaren arabera sailkatzen dira: GMAW, *Gas Metal Arc Welding* (MIG/MAG, *Metal Inert Gas/Metal Active Gas*); GTAW, *Gas Tungsten Arc Welding* (TIG, *Tungsten Inert Gas*) eta PAW, *Plasma Arc Welding*. Bero-iturria, arkuaren kontrola eta lortutako akaberaren kalitatearen arabera bereizten dira [3]. 1. Irudian prozesu bakoitzaren eskema ageri da.



1. irudia. WAAM prozesu mota desberdinen eskemak [3] erreferentziatik egokituak: (a) GMAW, (b) GTAW, (c) PAW.

Laser eta hari bidezko DED prozesuari dagokionez, prozesua koaxiala edo albokoa izan daiteke, baina prozesuaren oinarriak berdinak dira bi kasuetan [4], [5], ikusi 2. irudia.



2. irudia. Laser eta Hari bidezko DED (a) Konfigurazio koaxiala, [4] erreferentziatik egokitua (b) Alboko konfigurazioa, [5] erreferentziatik egokitua.

WAAM eta DED-LB prozesuek eskala anitzak eta denbora laburra barne hartzen dituzte, eta beharrezkoa da aurreikuspen emaitzetarako hainbat eredu desberdin garatzea. Lehenik eta behin, mikroegiturak eta mikrosegregazioak zuzenean eragingo dute propietate mekaniko makroskopikoetan. Piezen propietate mekanikoak bermatzeko, mikroegituraren eboluzioaren mekanismoa aurkitzea beharrezkoa da. Gainera, elementuen banaketak eta horrek sortzen duen indartze-efektuak propietate mekanikoetan eragin nabarmena dute. Bigarrenik, galda bainuaren eboluzio-jokabideak eta historia-

termikoak solidotzearen hasierarako baldintza orokorrak zehazten dituzte. Fase-aldaketak dakartzan dinamika termikoek piezan zeharreko tenperatura-banaketan eragingo dute; horretaz gain, kordioen geometriak badu garrantzia ere piezaren bukaerako propietateetan. Beraz, galda-bainuaren baldintzak ezagutu eta kontrolatzea ere garrantzitsua da. Azkenik, egoera makroskopikoari dagokionez, fabrikazio prozesuan zehar pieza osoko historial-termikoa eta distorsioak aztertzea premiazkoa da pieza horren bukaerako emaitza zehazte aldera [6].

WAAM eta DED-LB prozesuek duten konplexutasuna dela eta, simulazio aurreratua prozesu hauen optimizaziorako eta materialaren portaeraren iragarpenerako erreminta erabilgarria da, soilik saiakuntza enpirikoen mende egon gabe, kostuak eta denbora murriztuz. Gainera, eskala anitzeko simulazioa (mikroeskala, mesoeskala, makroeskala) funtsezkoa da: fenomenoak eskala desberdinetan konektatzen ditu (ale mikroskopikoak sortzetik pieza osoaren bukaerako propietateetaraino) eta osagaiaren azken errendimendua hobeto ulertzea ahalbidetzen du, akatsak aurreikusten lagunduz [6]. 1. Taulan prozesu hauen konplexutasunak aipatzen dira, konplexutasun bakoitza aurreikusi eta aztertzeko zein eskalako analisiak duen garrantzia azpimarratuz.

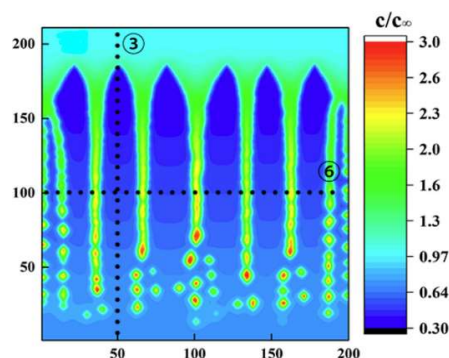
1. Taula. WAAM eta DED-LB prozesuen onurak eta konplexutasunak, eskala bakoitzak ekartzen duen jakintasuna azpimarratuz.

ESKALA	KONPLEXUTASUNAK
Mikroeskala	DED eta WAAM prozesuen izaera termikoa; gehitutako materiala eta oinarria urtzen diren heinean, lortutako tenperaturak ez dira soilik bero-iturriaren eta prozesu-parametroen menpekoak; oinarri-materialaren geometria eta konposizioak ere eragin zuzena dute. Horren ondorioz, pieza bakarraren fabrikazioan tenperatura-aldaketak gerta daitezke geometrian zehar. Eremu termikoaren bilakaerak bukaerako piezaren mikroegituran eta, beraz, haren propietateetan eragin zuzena dauka.
Mesoeskala	Urtutako materialaren jariatortasuna: prozesuaren egonkortasunean eta emaitzetan eragin zuzena du. Materialaren portaera aurreikustea oso konplexua da, eta horretarako abiadura handiko kamerak erabiltzea beharrezkoa da. Urtutako materialaren portaeraren araberakoa da kordoiaren bukaerako geometria; eta geometria horrek eragin zuzena du piezaren propietateetan.
Makroeskala	Kordoiaren forma eta prozesuaren emaitza; gehitutako materialaren morfologia prozesuaren ondorio zuzena da, eta ezin da aurrez zehaztu. Txirbil-harroketako prozesuetan ez bezala, emaitza ezin da soilik kalkulu geometrikoetan oinarrituta aurreikusi. Gainera, prozesuan sortutako hondar-tentsioek bukaerako pieza deformatzea eragiten dute.

Artikulu honetan simulazio eskala desberdinak laburki azaltzen dira, mesoeskala modeloetan sakonduz; hariaren gehikuntza eta kordoiaren bukaerako geometria simulatzen duen modelo bat bideratzeko aukera desberdinak deskribatu eta eztabaidatuko dira.

2. MIKROESKALA

WAAM eta DED-LB prozesuek abantaila ugari dituzte metalezko osagaiak eskala handian fabrikatzeko; hala ere, mikroegitura eta mikrosegregazioa funtsezko bi faktore dira, eta zuzenean eragiten diete propietate mekaniko makroskopikoei. WAAM eta DED-LB osagaien kalitatea are gehiago hobetzeko, beharrezkoa da mikroegituraren bilakaera-mekanismoa eta solidotze-prozesuan elementuen birbanaketa ikertzea (ikusi 3. irudia) [7]. Gainera, solidotze prozesuaren azterketa sakona funtsezkoa da propietate mekanikak zehazte aldera, adibidez egitura monokristalez osatutako piezetan [8].



3. irudia. Mikroeskala modelo bidez lortutako mikroegitura [7].

Mikroeskala modeloetan jarraitzen den ohiko prozedura honakoa da: lehenik gehitutako materialaren historial-termikoa lortzen da bai datu esperimentaletatik abiatuta edota aurreko modelo makroeskala bat erabiliz. Behin bukaerako piezaren historial termikoa ezagututa, mikroeskala modelo garatzen da intereseko materiala nola solidotu den ikusteko eta mikroegitura aztertzeko.

Pieza metalikoen solidotzeari dagokionez, monokristal egiturak kristal bakar batez osatutako material metalikoak dira, ale-mugarik ez dituztenak. Ezaugarri horri esker, errendimendu bikaina lortzen da materialaren propietate mekanikoei dagokionez, bereziki nekearen aurkako erresistentzian; eta oso garrantzitsuak dira aplikazio zorrotzetan; hala nola turbina aeronautikoetan [8].

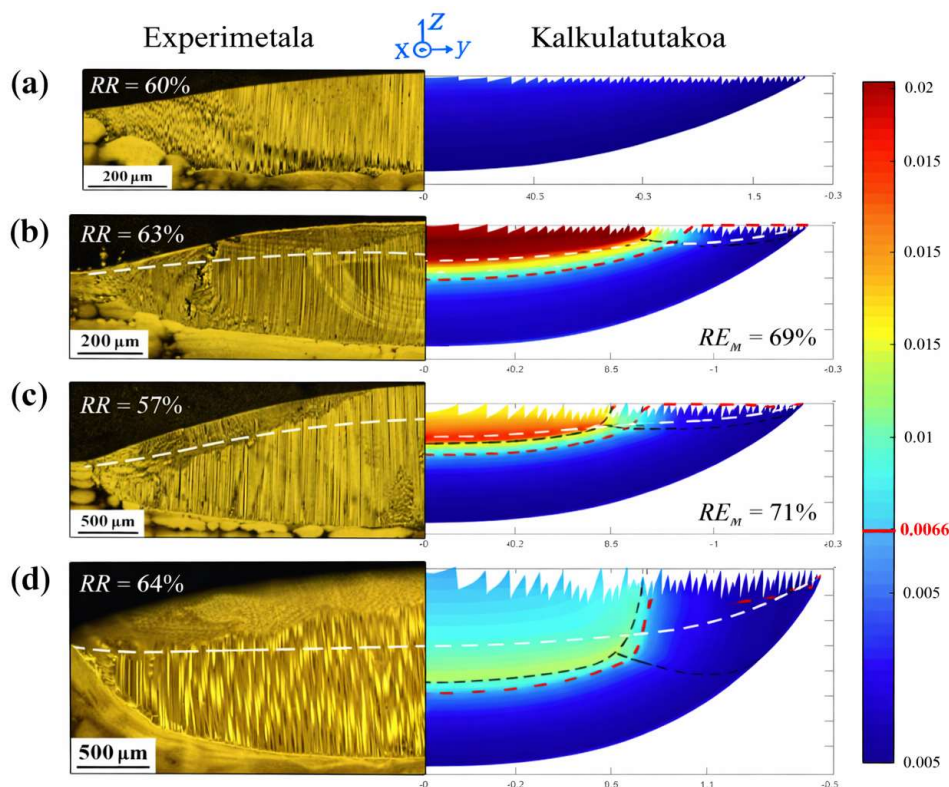
Tradizionalki, monokristal egiturak norabideko solidotzearen bidez fabrikatu dira, baina prozesu konplexu, motel eta oso kontrolatua da, muga esanguratsuak dituena. Fabrikazio gehigarria erabiliz,

solidotze azkarra eta gradiente termiko handiak aprobetxa daitezke egitura hauek modu eraginkorrean lortzeko [8].

Monokristal egituren fabrikazioaren arloan ere simulazioak erreminta baliagarritzat jotzen dira prozesu honen azterketarako; esaterako Acharya et al. [9] PBF prozesuan oinarritutako akoplamendu multifisikoko eredu bat proposatu zuten, hautsak galda bainuaren geometrian duen eragina, solidoaren eta likidoaren arteko trantsizio-eremuaren tamaina (*mushy zone*) eta CETaren kokapena (*Columnar-to-Equiaxed Transition*) agerian utziz.

Jacob D. Miller-en lanak [10] hari eta arku bidezko fabrikazio gehigarriko prozesuaren (WAAM) bidez kristal bakarrek osagaiak fabrikatzeko aukera ikertzen du, fabrikazio prozesu tradizionaletan ematen den solidotzearen ordezko aukera gisa. Lanak simulazio termikoak eta esperimentu praktikoak konbinatzen ditu, kristal bakarrek substratuen gainean nikela jalkiz. Emaitzek erakusten dutenez, kontrol termiko eta gradiente egokiaren baldintza jakin batzuetan, posible da hazkunde epitaxiala eragitea eta substratuaren orientazio kristalografikoari eustea metatutako materialean, nahiz eta prozesua oso sentikorra izan parametro termikoekiko. Oro har, WAAM bidez kristal bakarrek egiturak fabrikatzea alde aurretik bideragarria dela erakusten du ikerketak, propietate mekaniko eta termiko hobeak dituzten osagai aurreratuak modu malguagoan eta eraginkorragoan fabrikatzeko bide potentzial bat irekiz.

Liang et al. [11] hauts-elikaduraren efektuei aurre egiteko eta prozesamendu-mikroegituraren mapak kalkulatzeko erabiltzen den zenbakizko eredu konbinatua zabaltzeko estrategia erraza eta bideragarria aurkezten dute. Monokristal hazkundearen erlazio bereizgarri bat definitzen dute, amaierako solidotze-mikroegitura kuantitatiboki alderatzeko. Prozesamendu-mikroegituraren mapak prozesamendu-aldagai gehien eragina kalkula dezakete, bereziki hauts-elikaduraren abiadura eta zutabetik ardatzekorako trantsizioaren posizioa. Prozesamendu-mikroegitura mapa horien arabera hautatutako prozesamendu-parametroak erabiliz, arrakastaz fabrikatu dute LAM (*Laser Additive Manufacturing*) bidez dendrita finak dituzten kristal bakarrek geruza anitzeko modelo bat. Horrek esan nahi du prozesamendu-mikroegituraren mapa hauek fidagarriak eta erabilgarriak direla, monokristal superaleazioen LAMerako prozesamendu-leiho egokiak zehaztu baititzakete, eta prozesamenduaren eta mikroegituraren arteko erlazioa hobeto uler baitezakete.

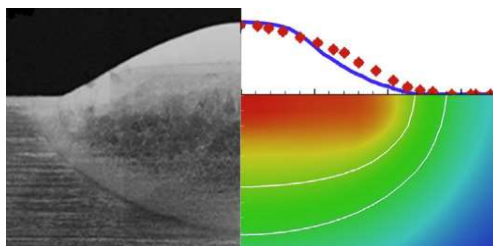


4. irudia. Liang et al. [11] Simulazio bidez kalkulaturako lau banaketa tipikoren eta esperimentalki behatutako mikroegituren arteko konparazioak. Lerro eten gorriak CETa lehen aldiz gerta daitekeen posizioak izanik.

Liu et al. [12] hauts-elikaduraren prozesua kontuan hartzen duen eredu multifisiko bat garatu zuten, substratuaren orientazio desberdinetan mikroegituretan dauden desberdintasunak aztertzeko. Simulazioaren emaitzek erakutsi zuten hautsaren elikadurak CETa gertatzen den lekua alda dezakeela, baina ez du eragin esanguratsurik kristalen hazkuntzan modu orokorrean.

3. MESOESKALA

WAAM eta DED-LB prozesuetan faktore kritikoetako bat jalkitako kordoiaren geometria da (zeharkako sekzioa, altuera, zabalera, etab.); izan ere, dimentsio-doitasuna eta gainazal-kalitatea zehazten ditu, eta eragina du piezaren azken propietate mekanikoetan. Kordoiaren formaren kontrol zehatza erronka bat da, barne hartzen duen fisika konplexuagatik (bero-trukaketa, metal urtuaren fluxua, solidotzea, etab.), bai eta prozesuaren parametroekiko sentikortasun handiagatik ere (jalkitze-abiadura, laser edo arkuaren potentzia, besteak beste). 4. irudian mesoeskala modelo batek aurreikusitako kordoiaren sekzioa ikus daiteke, kordoi errearen sekzioarekin alderatuta, [13] erreferentziatik hartuta.



4. irudia. Mesoeskala modelo kordioaren bukaerako sekzioaren predikzioarako.

Azken urte hauetan ikerketa ugari bideratu dira mesoeskalako kordioaren geometriaren iragarpen eta simulaziora, ikuspegi desberdinak erabiliz. Artikulu honetan, ikuspegi horiek bost kategoria nagusitan sailkatu dira:

- Erregresio estatistikoan oinarritutako modelo analitikoak, datu esperimentaletan oinarrituta kordioaren dimentsioak iragartzen dituzten metodo enpirikoak.
- Indarren orekan oinarritutako modelo analitikoak, grabitatea eta gainazaleko tentsioa bezalako indarrak orekatuz kordioaren forma kalkulatzeko dutenak.
- Eredu fisiko-numerikoak (CFD, *Computational Fluid Dynamics*), fluidoaren eta beroaren fluxua esplizituki ebazten duten simulazio konplexuak.
- *Machine Learning* (ML) bidezko modeloak, datu esperimentaletatik ikasiz iragarpen automatikoak egiteko.
- *Machine Learning* eta fisikadun eredu hibridoak, fisika eta datuak konbinatuz fideltasun handiagoa eta datu-behar txikiagoa lortzeko.

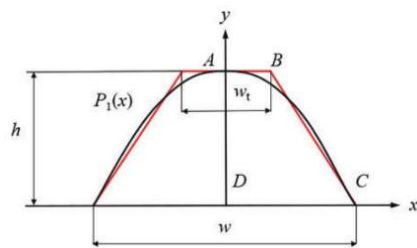
Jarraian, ikuspegi bakoitza sakonago aztertzen da, haien abantailak, mugak eta aplikazio nagusiak azpimarratuz.

3.1. Erregresio Estatistikoan Oinarritutako Modelo Analitikoak

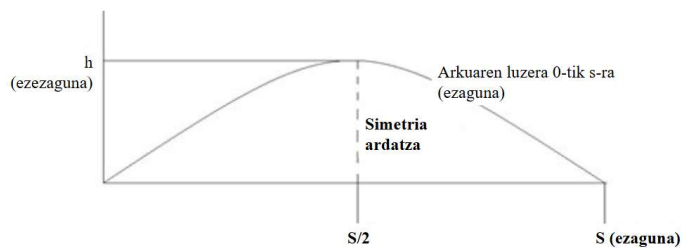
Ikuspegi klasiko honek datu esperimentalak erabiltzen ditu prozesu-parametroak kordioaren geometriarekin lotzen dituzten formula enpirikoak doitzeko. Diseinu esperimentalak (DOE, *Design Of Experiments*) egin ohi dira parametroen laginketarako; adibidez korronea, tentsioa, jalkitze-abiadura, haria elikatze-abiadura; emaitzetatik abiatuta geometria neurtzeko (kordoi-azalera, altuera, zabalera, etab.) eta, ondoren, eredu matematiko bat doitzeko (adibidez, erregresio lineala edo polinomikoa). Eredu hauen helburua ekuazio sinpleak lortzea da, simulazio konplexurik egin gabe kordioaren altuera eta zabalera aurreikusteko, aztertutako parametro-tartearen barruan. Soldaduran eta WAAMen metodo

helduak dira eta parametroak optimizatzeko eta joera orokorrak azkar ulertzeko balio dute, nahiz eta ez duten fenomeno fisiko konplexurik kontutan hartzen eta aztertutako parametro-leihora mugatuta dauden.

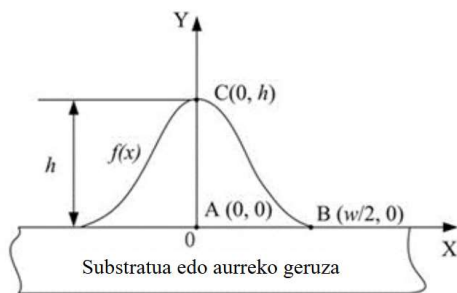
Mota honetako modeloetan, alde batetik, soilik kordoi bakarraren sekzioa aurreikusten dutenak daude. 5. irudian, kordoi bakarraren sekzioa hurbiltzen saiatzeko, eta ondoren aurreikusteko erabiltzen diren funtzio matematiko desberdinen adibideak ageri dira:



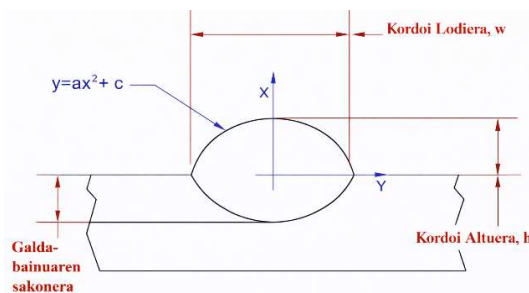
(a)



(b)



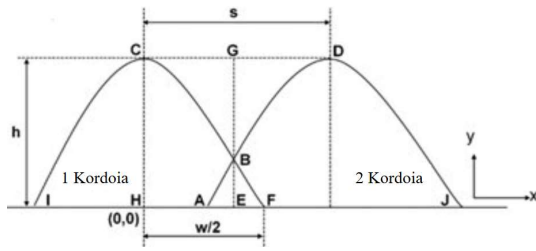
(c)



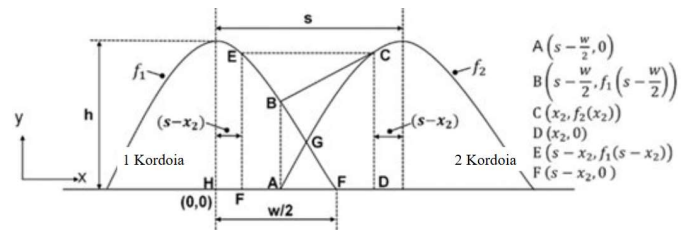
(d)

5. irudia. Kordoi bakarraren zeharkako sekzioa aurreikusteko erregresio estatikoan oinarritutako modelo analitiko ohikoenak. (a) Trapezio isoszelea [14] (b) Arkua [15] (c) Kosinua [16] (d) Parabola [16].

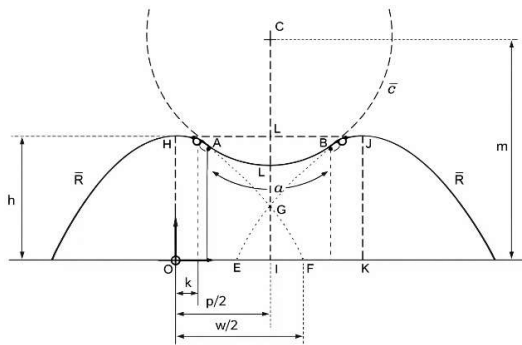
Beste alde batetik, bata bestearen alboan dauden kordoiaren sekzioa kontutan hartzen dutenak ere badaude, ikusi 6. irudia:



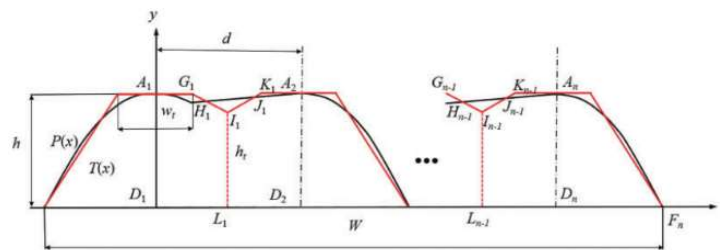
(a)



(b)



(c)



(d)

6. irudia. Kordoi anitzen zeharkako sekzioa aurreikusteko erregresio estatikoan oinarritutako modelo analitiko mota ohikoak. (a) Goialde-lauko Gainjarpen Modeloa (*Flat-Top Overlapping Model*, FOM) [17] (b) Gainjarpen Tangentzialaren Modeloa (*Tangent Overlapping Model*, TOM) [17] (c) Kordoi anitzeko zirkunferentzia bidezko gainjarpen modeloa (*Multi-bead circumference-based overlapping model*) [16] (d) Kordoi anitzeko trapezio isoszele bidezko gainjarpen modeloa (*Multi-bead isosceles trapezoid-based overlapping model*) [14].

Horrela, mota honetako azterlanetan ikertzen da geruzaren sekzioaren geometria zer funtzioak hurbiltzen duen hobekien, eta ondoren, prozesuaren parametroak funtzio horien koefizienteekin erlazionatzen dira, lortu nahi diren kordoi-parametro geometrikoen arabera.

Modelo hauek erabiltzeko errazak eta azkarrak dira eta kordoiaren geometria berehala kalkulatzeko ahalbidetzen dute, sarrerako parametroetatik abiatuta eta zenbakizko simulazio garestirik gabe. Intuzio fisikoa ematen dute aldagai bakoitzak nola eragiten duen erakusteko. Gainera, datu gutxi behar dira *Machine Learning* (ML) metodoekin alderatuta, bereziki diseinu esperimental eraginkorrak erabiltzen badira.

Hala ere, erabilera mugak dituzte: baliagarritasuna tarte esperimentalera mugatua dago, hau da, bildutako parametroetatik kanpo, doitasuna eror daiteke. Ez dute fenomeno ez-lineal konplexurik kontutan hartzen, ezta doikuntzan sartzen ez diren interakzio fisikorik ere. Huts egin dezakete datuetan

adierazita ez dauden modu-aldaketak gertatzen badira. Laburbilduz, kutxa beltzeko ereduak dira, datu espezifikotara egokituak, fisikaren ezagutza espliziturik gabe, eta, beraz, estrapolatzeko gaitasun urria dute. Doitasuna lortzeko, erabilitako datuen menpekotasuna dela eta, material edota prozesu bakoitzerako birkalibrazioa behar izaten da.

Modelo hauen garapena analisi estatistiko edo orokorrerako softwareak erabiliz egin daitezke aurretiaz esan bezala, ez dute simulazio fisikorako tresnarik behar.

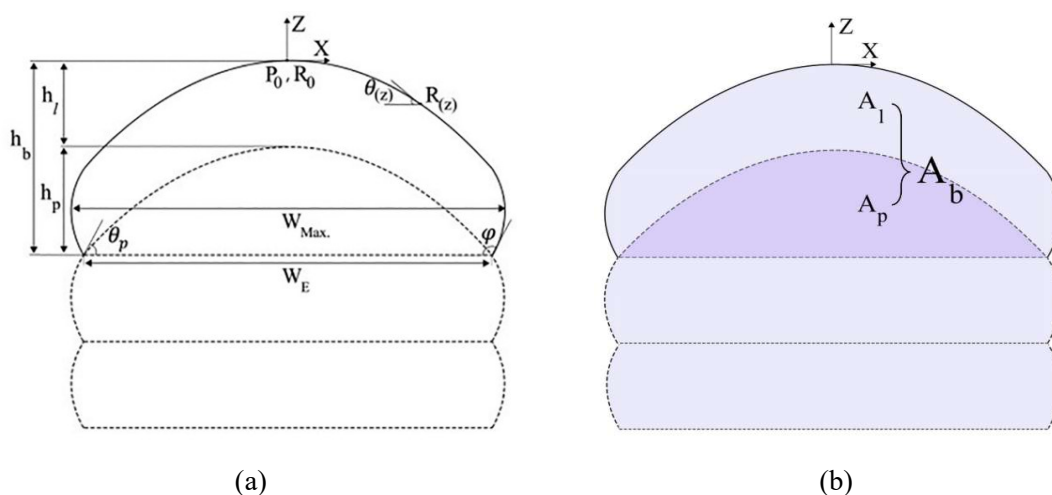
Ikuspegi ezarriena da, oso erabilia soldaduran, eta, WAAM/DED-LB sistemara aplikatuta duela gutxi egindako ikerketetan baliagarria izan da prozesua azkar parametrizatzeko [14-17]. Hala ere, metodo sofistikatuagoen gorakada dela eta, eredu enpiriko hauek gaur egun fideltasun txikiko jotzen dira: hasierako hurbilketetarako eta aurretiazko optimizaziorako egokiak dira, baina oso gutxitan ematen dute xehetasun nahikoa prozesuaren ulermen sakonerako edo kontrol finerako. Laburbilduz, bere heldutasun teknologikoa handia da, baina zehaztasuna eta orokortasuna eredu fisiko-numerikoena edo *Machine Learning* ereduena baino txikiagoa da.

3.2 Modelo analitikoak fenomeno fisikoak kontutan hartuta: *Thermo-Capillary-Gravity* Modeloak

Eredu hauek kordioaren oinarrizko fisikan oinarritzen dira, galda-bainuaren isatsean urtutako metala egoera kuasiestatikoan dagoela suposatuz, kordioaren forma analitikoki kalkulatzen dute (ikus 7. irudia) indarren oreka estatikotik abiatuta, indar garrantzitsuenak grabitatea (kordioa lautzeko joera duena) eta metal urtuaren gainazaleko tentsioa (kordioa goian mantentzeko joera duena) izanik. Beraz, ekuazio sinplifikatuak (adibidez, Young-Laplaceren ekuazioa gainazal librearen formarako) bolumen-eta energia-balantzeekin batera ebatzen dituzte, kordioaren altuera eta zabalera iragartzeko prozesuaren parametroen arabera, hala nola jalkitze-abiadura, ekarpen termikoa, materialaren propietateak (dentsitatea, kontaktu-angelua, gainazaleko tentsioa, biskositatea), eta abar. Azken garapenek alderdi termo-fisikoak ere badituzte [18-20], (tenperaturaren efektua gainazaleko tentsioan, solidotzea kordioaren amaieran, eta abar), baina fluxuaren dinamika konplexua denbora errealean simulatzera iritsi gabe.

Modelo mota hauek hainbat abantaila dituzte; hasteko, fisikan oinarritutako hurbilketa eskaintzen dute, konputazionalki eraginkorra dena. Dinamika iragankorra simulatzen ez denez, kalkulua azkarra da eta doikuntza-datu gutxi behar dira. Funtsezko mendekotasunak atzematen dituzte: dentsitate altuko materialek grabitatearen ondorioz kordoi lauagoak izateko joera dutela antzeman dezakete, eta kontrara, gainazal-tentsio altuak izaten dituztenek kordoi altuagoak. Irizpide analitikoetan oinarrituta (adibidez,

Bond zenbakiaren balio kritiko kalkulatu), geometria akastunetara eramango luketen prozesu-baldintzak identifikatzeko aukera ematen dute (adibidez, gehiegizko altuera edo isuria) [18]. Laburbilduz, iragarpen azkarreko tresnak dira, printzipio fisikoetan oinarrituak, simulazio astunak saihesteko erabilgarriak.



7. irudia. *Thermo-Capillary-Gravity* modeloen bidez ebatzitako geruza anitzeko eta DED bidez fabrikatutako kordioaren sekzioa [19]: (a) aldagai geometrikoak eta (b) azalerak: A_1 jalkitako azalera, A_p urtutako metala aurreko geruzan sartutako azalera eta A_b kordoi osoaren azalera.

Alabaina, metodo hauen desabantaila aipagarria, sinpletasun hori lortzeko suposizio indartsuak egiten dituztela da: 2D geometria simetrikoa, gainazal-tentsio konstantea eta uniformea eta barneko fluxu konbektiboak kontuan ez hartzea, besteak beste. Ez dute bero-transferentzia xehetasunez simulatzen, ezta bainuaren fluido dinamika iragankorra ere; solidotzearen amaierako egoera ia egonkorrean zentratzen dira. Horregatik, Marangoniren fluxua galda-bainuan, materialaren lurruntzea, tantaren etengabeko elkarrekintza jalkitzean, etab. bezalako efektuak ez dituzte kontutan hartzen. Gehitzeko, kalibrazio esperimentalak behar dute material edota prozesu bakoitzerako, bere orokortasuna mugatuz. Laburbilduz, fideltasun ertaineko ereduak dira: oinarritzko fisika dute, baina ez dute konplexutasun garrantzitsurik; beraz, arretaz erabili behar dira.

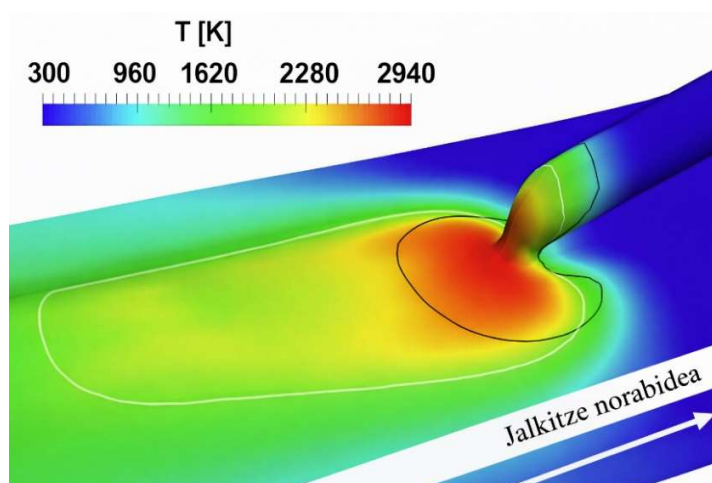
Normalean, ereduaren formulazioa oreka-ekuazio analitikoetan oinarritzen da, eta horiek ebazteko iterazio-metodoak erabiltzen dira, hala nola Newton-Raphsonen metodoa, sistemak ez-linealak konbergitu arte. Lan horietan, modelaketa termo-kapilarra eta grabitatorioa ikuspegi analitikoaren bidez garatzen dira, Laplaceren ekuazioaren eta koherentzia fisikoko baldintzen bidez geometria auresateko.

Kalkuluak konputazio-kostu txikikoak dira eta ereduak analitikoki ebazteko moduan planteatzen dira, beraz ez da beharrezkoa simulazio konputazional sendoagotara jotzea [18-20].

Ikuspegi nahiko berria da WAAM/DED-LB testuinguruan eta oraindik ikerketa-fasean dago; talde gutxi aplikatu dute eta beren gaitasunak zabaltzen ari dira. Etorkizun handiko metodoa izatea aurreikusten da, fisika ezagunean oinarritua, iragarpenaren adibide arrakastatsuekin, baina oraindik garatzen ari dena prozesuaren xehetasun guztiak biltzeko. Ez dago integratuta software komertzial estandarretan; tresna akademiko bat da.

3.3. CFD Modeloak

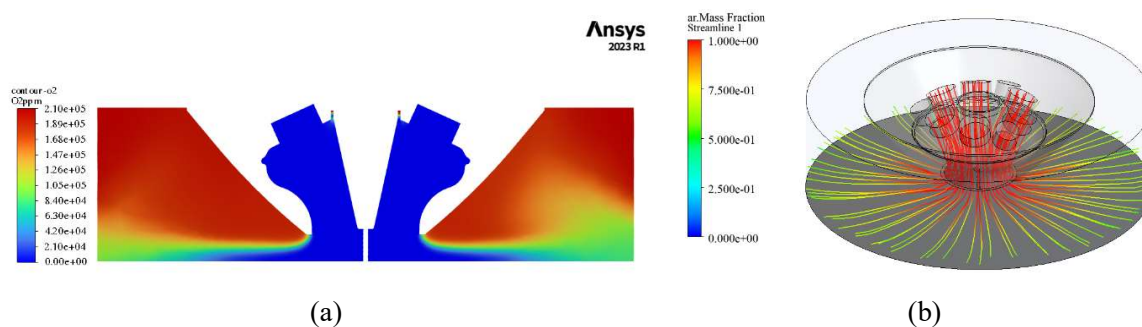
Modelo hauek fluido dinamika konputazionalaren zenbakizko simulazioa (*Computational Fluid Dynamics*, CFD) erabiltzen dute, bero-transferentzia kontuan hartuta, jalkitze-prozesua eta kordioaren eraketa era zehatzagoan simulatzeko. Galda-bainuaren simulazio iragankorrek metal likidorako Navier-Stokes ekuazioak ebazten dituzte, gainazaleko tentsioa, grabitatea, arkuaren indar elektromagnetikoak (WAAMean) eta bero-transferentzietarako energia-ekuazioa kontuan hartuta (laser edo arkuaren bero-iturria, konbekzioa, erradiazioa eta fase-aldaketak barne) [21-25]. Material urtuaren bilakaera esplizituki modelizatzen dute, haria urtzen denetik eta galda bainua solidotu arte, galda bainuko barne-fluxuak (gradiente termiko bidezko konbekzio-korronteak, Marangoniren efektua) eta geruza bidezko solidotzea kontutan hartu ohi dira ere. Azken geometria (kordioaren altuera/zabalera, sarpena) ez ezik, tenperaturen banaketa, abiadurak, historial termikoa eta eman litezkeen akatsak (poroak, adibidez) fideltasun handiz iragartzea dute helburu; adibidez, 8. irudian CFD modelo bidez lortutako tenperaturen banaketa ikus daiteke.



8. irudia. Galda bainuaren eta urtutako hariaren tenperaturen kalkulua CFD modelo bidez [13].

Errealitatetik gertuen dauden modeloak dira orokorrean, esplizituki kontutan hartzen baitituzte prozesuko ia fenomeno garrantzitsu guztiak, eta azken geometria ez ezik, dinamika iragankorra ere xehetasunez aurreikustea ahalbidetzen dute [21]. Adibidez, zipriztinak egongo diren, tenperatura eta abiadura nola aldatzen diren galda-bainuaren barruan, termikoki kaltetutako eremuaren tamaina, etab. [22]. Gainera, ikuspuntu fisiko sakona eskaintzen dute; zenbait baldintzetan kordoi akastunak zergatik sortzen diren azaltzen laguntzen dute; adibidez, hari-gehikuntza-abiadura oso altuek, galda bainuaren ezegonkortasuna eragin dezaketela [22]. Gehitzeko, oso orokorrak dira; izan ere, kalkulu-potentzia nahikoarekin, hainbat material, prozesu (TIG, MIG, laserra) eta parametro desberdinetan aplika daitezke, egoera bakoitzera doituz, lege fisiko unibertsalak ezartzen baitituzte, kasu hauen adibide esanguratsua Cadiou et al. [21] lana da. Ikerketan, hipotesiak probatzeko eta *in situ* neurtu ezin diren xehetasunak ulertzeko baliagarriak dira.

Modelo mota hauetako mugarik esanguratsuen kostu konputazional oso handia da [22]. Simulazio hauek sare finak eta denbora-urrats txikiak behar dituzte aire-likido interfazea zehazteko, eta, horretarako, kalkulu-orduak edo -egunak behar dira, prozesu errealeko segundo gutxiren truke. Horrek erabilgarritasun gutxikoak bihurtzen ditu zuzeneko optimizaziorako edo lineako kontrolerako. Gainera, parametro eta azpi-eredu ugari sartu behar dira: beroaren transferentzia-koefizienteak, gainazaleko tentsio-ereduak (konstantea vs tenperaturaren mendekoa, Marangoniren efektua), tenperatura altuko propietate termofisikoak, arku elektrikoaren edo laserraren ereduak (bero-banaketa, erradiazio-presioa, potentzial elektromagnetikoa), etab. Zehaztasuna azpi-modelo horien kalibrazioaren arabera da eta askotan parametroak doitzen dira simulazioa neurri esperimentalekin bat etor dadin [24], [25]. Gainera, sinplifikapenak ere egin behar izaten dira kostu konputazionala murrizte aldera; edota fenomeno fisikoak banaka aztertu; adibidez, 9. irudian Bilboko Ingeniaritza eskolan garatutako modeloa agertzen da, non DED prozesurako Meltio enpresako buruak eskaintzen duen babes-gasaren portaera eta eraginkortasuna aztertzen den.



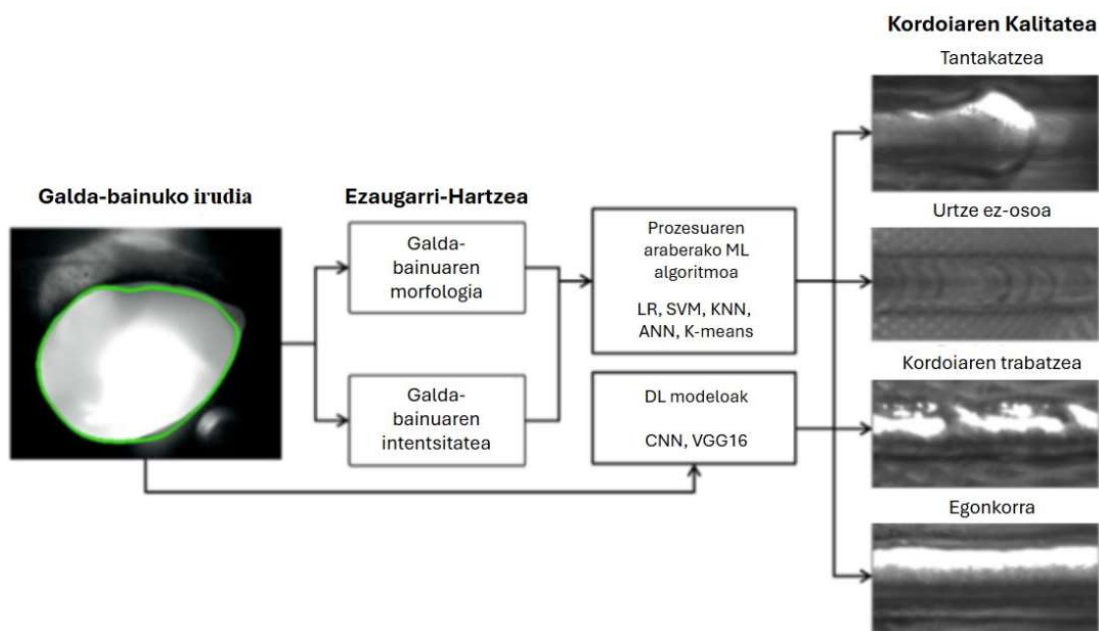
9. irudia. Meltio enpresako DED-LB buruak eskaintzen duen babes-a aztertzen duen modeloa. (a) Erdiko planoko oxigeno kontzentrazioa (b) Gasaren banaketa.

Simulazio aurreratuko softwareak erabiltzen dira modelo hauen garapenerako: ANSYS Fluent, Flow-3D, COMSOL Multiphysics edo soldaduran espezializatutako pakete komertzialak (adibidez, Simufact Welding), baita OpenFOAM motako kode irekiak eta garapen akademikoak ere [21-25]. Modelo askok kode horiek pertsonalizatzen dituzte errutinak gehituz arku edo laserraren bero-iturrirako, tanta-jalkipenerako (askotan *Volume of Fluid* edo VOF, edota *Level Set* edo LS metodoak erabiliz gainazal libre kontutan hartzeko), eta solidotzeko [22].

Ikerketa eremuan modelo hauek oso garatuak daude; hala ere, industrian heldutasun txikia dute, oraindik ez baitira aplikagarriak eguneroko erabilerarako, eskatzen den kostu konputazional eta esperientzia handia dela eta. Ikerketarako eta garapenak gidatzeko baliagarriak dira (adibidez, eredu txikiak balioztatzea edo bideratzea). Gaur egun, partzialki biki digitalak (*Digital Twins*) integratzen dira, edo *off-line* erabiltzen dira gero IAk (Inteligentzia Artifiziala) ustiatzen dituen datu-baseak sortzeko. Laburbilduz, erreferentzia zehatzak dira eta epe luzera, gaitasun handiagoarekin eta sinplifikazio adimendunekin, gaitasun batzuk ingeniartzako tresna irisgarrietara eraman ahal izatea espero da [7].

3.4. Machine Learning-ean oinarritutako modeloak

Kasu honetan, datuen bidezko (*data-driven*) ikasketa automatikoko ereduak entrenatzen dira, prozesu-parametroak sortutako kordioaren geometriara doitzeko, esplizituki ekuazio fisikorik ebatzi gabe. Erregresio ez-linealeko algoritmoak (erabaki-zuhaitzak, *Random Forest*, sare neuronal artifizialak, etab.) edo ordenagailu bidezko ikusmen-teknikak (*Convolutional Neural Networks* edo CNN motako sare neuronal sakonak galda-bainuaren irudien bidez ikasteko) erabil daitezke ereduak prozesuaren erlazio konplexuak entrenamendu-datu multzoetatik abiatuta "ikas" ditzan. Prozesuaren datu nahiko emanda (adibidez, kordioaren geometriaren neurketak baldintza desberdinetan edo sentsoreen lineako datuak), makinak patroi ezkutuak identifika ditzake. Patroi horietatik abiatuta, kordioaren ezaugarri desberdinak aurreikus ditzake, hala nola altuera, zabalera, kalitate-desbideratzeak edo akatsen presentzia baldintza berrietarako. Eredu enpiriko sinpleetan ez bezala, hemen algoritmo modernoak aprobetxatzen dira. 10. irudian ML modelo baten adibidea ageri da [26], [27].

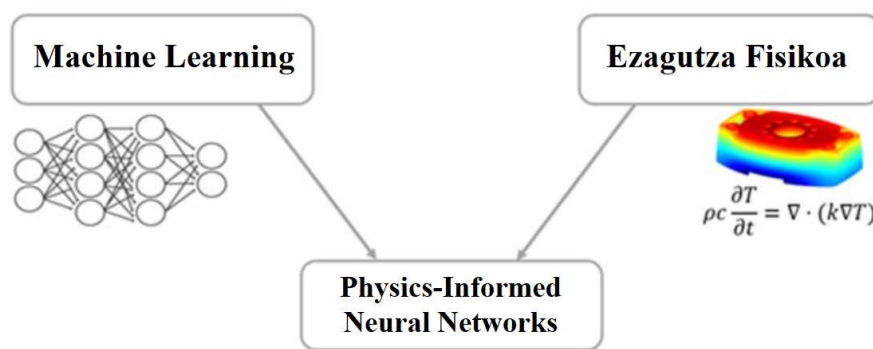


10. irudia. ML modelo baten adibidea: hari eta laser bidezko DED prozesuan, galda bainuaren *in situ* irudietatik abiatuta kordioaren kalitatea neurtzen duen modelo, [28] erreferentziatik egokitua.

Machine Learning (ML) modeloek erlazio konplexuak eta ez-linealak atzeman ditzakete, esplizituki modelatu beharrik gabe. Datu gehiagorekin auto-hobetzeko gaitasuna dute; hau da, zenbat eta esperientzia (datu) gehiago eman, orduan eta zehatzagoak eta sendoagoak bihur daitezke; hala ere, algoritmo hauen errendimendua datuen kalitate, adierazgarritasun, zarata maila, ereduaren gaitasuna eta abarren menpe dago. Algoritmo batzuek (adibidez, *Random Forest*) ondo manciatzen dituzte datu zaratsutsuak eta aldagaiei garrantzi erlatiboa ematen diete, geometriari eragin handiena duten parametroak identifikatzen lagunduz. Elikatutako datuen artean (irudiak, korrante-uhinen formak, etab.) interpretatzeko aukera ere eskaintzen dute, geometria edo kalitatea iragartzeko informazio-iturri ugari integratuz. Gainera, behin entrenatu ondoren, modelo hauek azkar exekutatu dira, eta horrek lineako kontrol-aplikazioak edo parametroen doikuntza automatikoa denbora errealean egiteko aukera ematen du. Laburbilduz, malgutasuna eta abiadura ematen dute, eta ikerkuntza askotan kordioaren geometriaren kalkuluan zehaztasuna erakutsi dute, eredu analitiko tradizionalak lortutakoekin alderatu daitezkeenak edo handiagoak [28].

3.5. *Machine Learning* + fisika modelo hibridoak

Ikuspegi honek aurretik aipatutako bi aukera integratzen ditu: *Machine Learning* (ML) modeloen iragarpen-gaitasuna aprobetxatzen du eta, ezagutza fisikoa edo simulazio-datuak txertatzen ditu eredua gidatzeko edo mugatzeko. Helburua zehaztasuna eta sendotasuna hobetzea da, eskatutako datu esperimental puruen kopurua murriztuz eta iragarpenek ezagutzen diren lege fisikoak betetzen dituztela ziurtatuz. Zenbait estrategia hibrido daude; horietako bat fisikaz informatutako sare neuronalak dira (PINN, *Physics-Informed Neural Networks*), non gobernu-ekuazioak (adibidez, energia-ekuazioak) ML modeloan integratzen diren, kordioaren bukaerako geometriaren predizkioan hauek kontutan hartzera behartuz (ikusi 12. irudia). Beste hurbilketa hibrido batzuk multifideltasun eredua dira, iturri desberdinetako datuak konbinatzen dituztenak: adibidez, fideltasun handiko datu esperimentalen multzo mugatu bat erabiltzea simulazio sinpleagoek (fideltasun baxua) sortutako datu sintetikoekin batera, ML eredu global bat prestatzeko. Kasu guztietan, modeloak joera fisikoak errespetatzen dituen esparru baten barruan "ikastea" bilatzen da, iragarpen fidagarriak lortuz, nahiz eta datu gutxi izan edo esperimentuetan ikusi gabeko baldintzak izan [31].



12. irudia. *Physics-Informed Neural Networks* (PINN) baten funtzionamenduaren eskema, [32] egokitua.

Modelo hibridoek oreka optimoa lortzen dute zehaztasunaren eta eraginkortasunaren artean. Lege fisikoak errespetatzean, hobeto estrapolatzeko joera dute: adibidez, PINN batek ez du fisikoki ezinezkoa den kordoi-altuera aurreikusiko, bere entrenamenduko ekuazioek zigortu egiten dutelako. Horrek konfiantza handiagoa ematen du datu-tartetik kanpo. Gainera, *big data* esperimentalaren beharra murrizten dute; simulazioetatik lortutako datuak (lortzeko merkeagoak) aprobetxa ditzakete erreal gutxirekin batera entrenatzeko, hutsuneak betez. ML ereduaren azkartasuna mantentzen dute; behin entrenatu ondoren, PINN edo sare hibrido batek milisekundotan aurreratu du kordioaren geometria, eta

lineako kontrol edo optimizaziorako balio du. Funtsean, bi munduetako onena eskaintzen dute: fisikaren sendotasuna eta ikasketa automatikoaren malgutasuna. Horrek garrantzi berezia hartzen du AM metalikoan, non datuak garestiak diren eta baldintza operatiboak aldakorrak diren; eredu hibrido bat egokitu daiteke oinarri fisikoa galdu gabe [33].

Mugarik aipagarriena modelo hauen eraikuntza konplexua da; PINN bat garatzean, adibidez, behar bezala formulatu behar dira ekuazioak eta ingurune-baldintzak. Entrenatzeko ere kalkuluak egiteko gaitasun handiagoa behar izaten dute, sare neuronala entrenatzen den bitartean ekuazio diferentzialak ebaztea garestia baita. Gainera, modelo hibridoaren kalitatea txertatutako fisika egokia eta kalibratua izatearen araberakoa da; ekuazioak gehiegi sinplifikatuta badaude edo fideltasun baxuko datuak erabiltzen badira, eraginkortasun galera suposa dezakete [34]. Horretaz gain, PINN-erako edo beste eredu hibrido batzuetarako tresnak eta liburutegiak oraindik garatzen ari dira eta hauen inguruko jakintza murriztua da oraindik. Azkenik, datu esperimentalen beharra murrizten duten arren, ez dute ezabatzen; hau da, datu errealekin balioztatze- eta doikuntza-mailaren bat behar da. Laburbilduz, etorkizun handikoak dira, baina hasierako inplementazio-oztopoak eta diziplina anitzeko esperientzia behar dituzte [35].

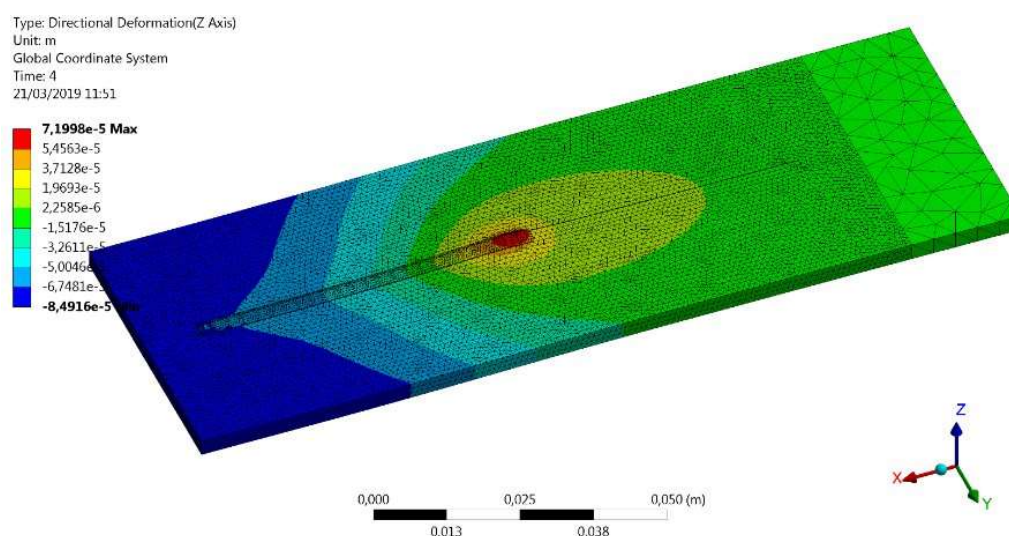
Modelo hauen garapenerako tresnen artean, *frameworks* akademikoak bezalako liburutegi espezializatuak, helburu orokorreko lengoaietz gain (Python) sortzen ari dira. Eredu hibridoek, oro har, simulazio-softwareak (adibidez, MATLABen fideltasun baxuko eredu bat edo CFD kode sinplifikatu bat exekutatzeko) zein MLko inguruneak erabiltzea eskatzen dute [31-35].

Heldutasun-mailari dagokionez, modelo mota hauek hasierako fasean daude (heldutasun txikia), baina azkar hazten ari dira, eta hurrengo urteetan adibide eta emaitzetan zehaztasun gehiago ikustea espero da. Oraingoz, maila akademikoan lantzen hasi diren modeloak dira, eta oso emaitza positiboak dituzte; ondorioz, gaur egun ez dago industria-erazpenik, baina ibilbidea argia da: esperientzia PINNekin eta modelo hibridoekin eskuratzen diren heinean, epe ertaineko aplikazio praktikoak ikus litezke (adibidez, kordioa kontrolatzeko sistema integratuak). Laburbilduz, etorkizunerako perspektiba handia da, baina gaur egungo erabilera akademikora mugatzen da.

4. MAKROESKALA

Makroeskalak piezaren portaera globalaren modelaketa hartzen du barnean, fabrikazioan zehar. WAAM eta DED-LB bezalako prozesuetan, geruza metaliko beroak bata bestearen atzetik jalkitzeak eta hozteak, piezan deformazioak eta hondar-tentsioak metatzea dakar. Makroeskanan, simulazioek

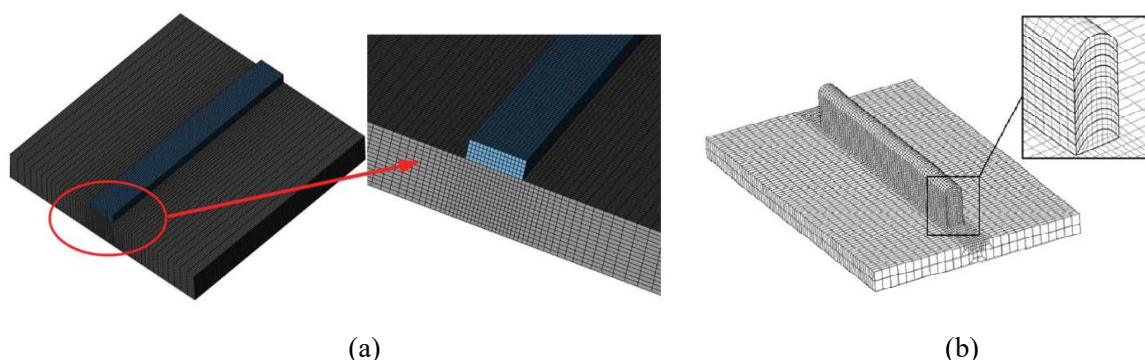
(normalean elementu finituen analisi termomekanikoen bidez) aukera ematen dute pieza osoko tenperaturaren bilakaera iragartzeko, baita geruzaz geruza sortzen diren distortsio geometrikoak eta hondar-tentsioak ikusteko ere. Distortsio horiek handiak izan daitezke tamaina handiko osagaietan, eta aurreikusitako geometriatik aldentzen dira behar bezala kontrolatzen ez badira. Izan ere, WAAM eta DED-LB prozesuetan ohikoak diren tenperatura gradiente handiek ezegonkortasun dimentsionala eta propietate mekanikoen aldaketa lokalak eragin ditzakete [36].



13. irudia. Bilboko Ingeniaritza Eskolan garatutako makroeskalako DED-LB modeloa.

Horregatik, makroeskalen modelatzea funtsezkoa da osotasun dimentsionaleko arazoak aurreikusteko: fabrikazio-estrategiak optimizatzea ahalbidetzen du (jalkitze-ibilbideak, parametro termikoak, material gehikuntza- eta hozte-sekuentziak), deformazioak minimizatzeo eta barne-tentsioak murrizteko. Ondorioz, makro-simulazioari esker, tamaina handiko eta fabrikazio gehigarri bidezko pieza metalikoen perdoi minimoak eta kalitate-baldintzak betetzen dituztela bermatzen da, pieza fabrikatuta egon ondoren [37].

Orokorrean, makroeskala modeloetan geruza bakoitzaren geometria sinplifikatu egiten da, aukera posibleen artean erabilienak kordoi laukizuzenak edo sekzioa lehendik ezaguna den funtzio matematiko baten bidez modelatzea daude (adibidez: zirkunferentzia erdia), ikusi 14. irudia. Gainera, simulazio askotan bukaerako piezaren geometria perfektua simulatzen da zuzenean sinplifikapen bezala [38].



14. irudia. Makroeskala modeloetan egiten diren geometria sinplifikapenak: (a) sekzio laukizuzena [36] eta (b) sekzio zirkunferentzia-erdia [38].

5. EZTABAIDA ETA ONDORIOAK

Lan honetan aurkeztutako ikuspegiak erakusten du hari bidezko fabrikazio gehigarriko modelaketa ezin dela eskala bakar batean ulertu. Mikro, meso eta makroeskalak elkarren artean lotuta daude. Lotura hori funtsezkoa da prozesua behar bezala ulertu eta aurreratzeko. Eskala bakoitzak alderdi jakin bat azaltzen du, hiru eskalen sintesiak bakarrik ematen duelarik ikuspegi osoa. Horregatik, multieskalako markoa izan da lan honen ardatza.

Mikroeskalen, aleen hazkuntza, solidifikazio-abiadura eta tenperatura-gradientearen eragina aztertzen dira. Lan honetan ez da mikroegituraren bilakaera modelizatzeko eredu zehatzik aztertu. Hala ere, argi geratzen da baldintza termikoek zuzenean baldintzatzen dutela azken egitura metalurgikoa. Horrek azaltzen du zergatik den garrantzitsua mesoeskalan galda-bainuaren geometria eta tenperatura ondo ezagutzea.

Mesoeskalan dago lan honen ekarpen nagusia. Eskala honek aukera ematen du kordoiaren sekzio-geometria, material-transferentzia eta tokiko tenperatura-banaketa aurreratzeko. Aztertutako ereduaren artean desberdintasun handiak daude: batzuek formulazio analitikoak erabiltzen dituzte, beste batzuek eredu termo-kapilarrak eta grabitatorioak aplikatzen dituzte, eredu sendagoek fisika sakonki kontuan hartzen dute CFD analisisien bidez, eta azken urteotan *Machine Learning* eta ikuspegi hibridoak ere garatu dira.

Ereduak alderatuta, ikusten da fisika kontuan hartzen dutenek fidagarritasun handiagoa dutela kordoiaren forma aurreratzeko. Hala ere, kalkulu-kostua handiagoa da eta horregatik, lan honetan

proposatutako ikuspegiak oreka bilatzen du. Helburua da fisikoki koherentea den eredua eskaintzea, baina aldi berean, azkar ebazteko modukoa izan behar du, industria-ingurunean aplikatu ahal izateko.

Mesoescalako ereduak makroescalako simulazioekin bateragarritasun handia dute. Kordioen geometria zehaztasunez aurreikustea beharrezkoa da bero-iturria eta material-gehikuntza definitzeko. Makroeskalen beroaren hedapena eta portaera termo-mekanikoa aztertzen dira. Mesoescalatik datozen parametroek (kordoiaren altuera, zabalera edo transferitutako bolumena) baldintzatzen dute tenperatura-gailurren banaketa; horrek eragina du, adibidez, distorsioen sorreran.

Ondorioz, ereduaren arteko osagarritasuna ez da kontzeptu teoriko hutsa: CFD ereduak oso zehatzak izan daitezke; hala ere, ez dira beti egokienak industria-ingurunean. Bestalde, eredu analitiko sinplifikatuek eta ML ereduak ez dute fisika guztiz erreproduzitzen; baina oso erabilgarriak dira kontrol eta optimizazio tresnetan.

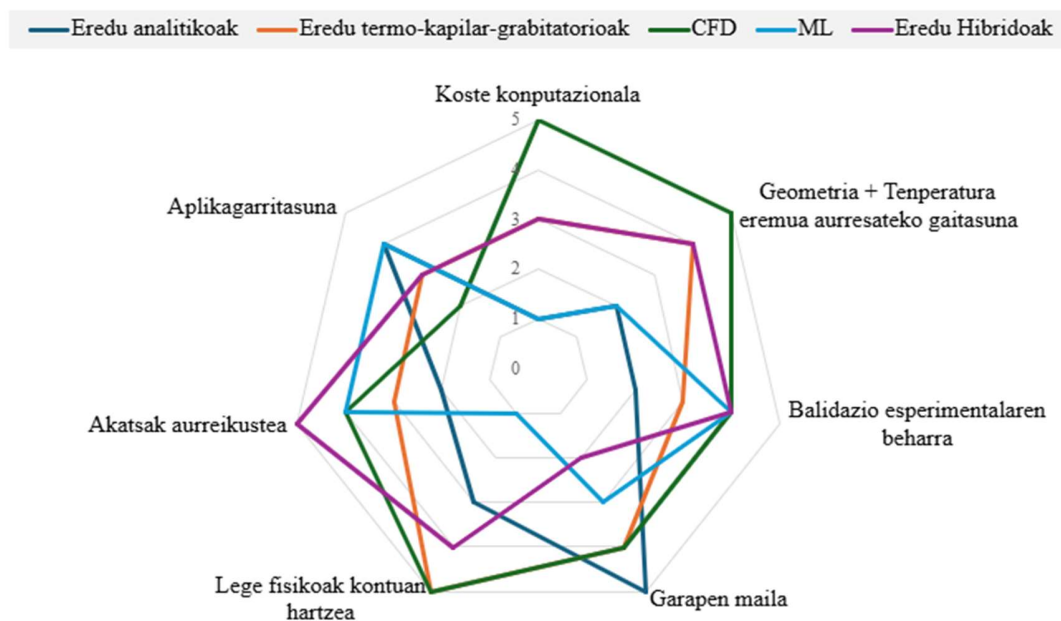
Lan honek hiru ondorio nagusi antzematen ditu:

(1) Mesoescalako modelaketa da prozesuaren erdigunea. Bertatik elikatzen dira bai mikro mailako ulermen metalurgikoa, bai makro mailako portaera termo-mekanikoa.

(2) Eredu desberdinen konbinazioak emaitza fidagarriagoak ematen ditu eskala guztietan.

(3) Ezagutza akademikoa garatzeko, egokiena fisika sakonki kontuan hartzen duten CFD ereduak dira. Aplikazio industrialetarako, berriz, fisikan oinarritutako ML ereduak dira eraginkorrenak, eskaintzen duten azkartasunagatik.

Azkenik, hirugarren ondorio hori argitzeko, 15. Irudian mesoescalako eredu desberdinen konparaketa-diagrama aurkezten da. Diagrama horrek hainbat irizpide hartzen ditu kontuan: kalkulukostua, kordioen geometria eta tenperatura aurrerako gaitasuna, balidazio esperimentalarekiko menpekotasuna, literaturan duten garapen-maila, lege fisikoen presentzia, akatsen aurreikuspena eta aplikagarritasuna ikerketa edo industria-testuinguruan.



15. irudia. Mesoeskala eredu desberdinen arteko konparaketa-diagrama. Eredu bakoitzari 1 eta 5 arteko balioa eman zaio, 1 baxua izanik eta 5 altua.

ESKER ONAK

Eusko Jaurlaritzari IT 1573-22 ikerkuntza taldearen finantzaketagatik eta Espainiako Zientzia, Berrikuntza eta Unibertsitateen Ministeritzari PROMISE proiektuaren finantzaketagatik.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] Abuabiah, M., Mbodj, N. G., Shaqour, B., Herzallah, L., Juaidi, A., Abdallah, R., & Plapper, P. 2023. «Advancements in Laser Wire-Feed Metal Additive Manufacturing: A Brief Review». *Materials*, **16**(5), art. 2030. doi:10.3390/ma16052030.

[2] Özel, T., Shokri, H., & Loizeau, R. 2023. «A Review on Wire-Fed Directed Energy Deposition Based Metal Additive Manufacturing». *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, **7**(1), 45. doi:10.3390/jmmp7010045.

[3] Li, Y., Guo, Y., Feng, J., & Yu, H. 2025. «Review of wire arc additive manufacturing for 3D metal printing». *Journal of Materials Processing Technology*, **354**, 117200. doi:10.1016/j.jmatprotec.2024.117200.

[4] Zapata, A., Bernauer, C., Hell, M., Kriz, H., & Zaeh, M. F. 2022. «Design and Investigation of a Novel Local Shielding Gas Concept for Laser Metal Deposition with Coaxial Wire Feeding». *Journal of Laser Applications*, **34**(4), 042017. doi:10.2351/7.0000789.

[5] Flores, J., Alberdi, D., Cabanes, I., & Gonzalo, O. 2023. «Monitoring and control of robotized laser metal-wire deposition». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **79**, 102432. doi:10.1016/j.rcim.2022.102432.

[6] Bayat, M., Dong, W., Thorborg, J., To, A. C., & Hattel, J. H. 2021. «A review of multi-scale and multi-physics simulations of metal additive manufacturing processes with focus on modeling strategies». *Additive Manufacturing*, **47**, 102278. doi:10.1016/j.addma.2021.102278.

[7] Geng, R., Du, J., Wei, Z., Xu, S., & Ma, N. 2021. «Modelling and experimental observation of the deposition geometry and microstructure evolution of aluminum alloy fabricated by wire-arc additive manufacturing». *Journal of Manufacturing Processes*, **64**, 369–378. doi:10.1016/j.jmapro.2021.01.037.

[8] Li, Y., Liang, X., Yu, Y., Wang, D., & Lin, F. 2022. «Review on Additive Manufacturing of Single-Crystal Nickel-based Superalloys». *Chinese Journal of Mechanical Engineering: Additive Manufacturing Frontiers*, **1**(1), art. 100019. doi:10.1016/j.cjmeam.2022.100019.

[9] Acharya, R., Bansal, R., Gambone, J. J., et al. 2014. «A coupled thermal, fluid flow, and solidification model for the processing of single-crystal alloy CMSX-4 through scanning laser epitaxy for turbine engine hot-section component repair (Part I)». *Metallurgical and Materials Transactions B*, **45**(6), 2247–2261. doi:10.1007/s11663-014-0117-9.

[10] J. D. Miller, “*Single Crystal Deposition via Wire Arc Additive Manufacturing*,” M.S. thesis, Dept. Mech. Eng., University of Idaho, Moscow, ID, USA, 2020.

[11] Liang, Y. J., Cheng, X., Li, J., et al. 2017. «Microstructural control during laser additive manufacturing of single-crystal nickel-base superalloys: New processing–microstructure maps involving powder feeding». *Materials & Design*, **130**, 197–207. doi:10.1016/j.matdes.2017.05.046.

[12] Liu, Z., & Qi, H. 2015. «Effects of processing parameters on crystal growth and microstructure formation in laser powder deposition of single-crystal superalloy». *Journal of Materials Processing Technology*, **216**, 19–27. doi:10.1016/j.jmatprotec.2014.09.025.

[13] Abadi, S. M. A. N. R., Mi, Y., Kisielewicz, A., Sikström, F., & Choquet, I. 2023. «Influence of laser-wire interaction on heat and metal transfer in directed energy deposition». *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **205**, art. 123894. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2023.123894.

[14] Zhou, X., Qin, J., Fu, Z., Wang, M., Yuan, Y., Fu, J., Zhang, H., & Hosseini, S. R. E. 2024. «An Innovative Finite Element Geometric Modeling of Single-Layer Multi-Bead WAAMed Part». *Computational Modeling in Engineering & Sciences*, **138**(3), 2383–2401. doi:10.32604/cmes.2023.029249.

[15] Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D., & Li, H. 2015. «A multi-bead overlapping model for robotic wire and arc additive manufacturing (WAAM)». *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **31**, 101–110. doi:10.1016/j.rcim.2014.08.008.

[16] Suryakumar, S., Karunakaran, K. P., Bernard, A., et al. 2011. «Weld bead modeling and process optimization in Hybrid Layered Manufacturing». *Computer-Aided Design*, **43**(4), 331–344. doi:10.1016/j.cad.2011.01.006.

[17] Thomas, J. P., Mungole, M., Paul, S., Grangier, P., & Jack, A. G. 2022. «Towards hybrid laser-arc based directed energy deposition: Understanding bead formation through mathematical modeling for additive manufacturing». *Journal of Manufacturing Processes*, **76**, 457–474. doi:10.1016/j.jmapro.2022.02.027.

[18] Haghghi, A. M., Ding, J., Sun, Y., Suder, W., Wang, C., Poulain, P., Chen, X., & Williams, S. 2025. «Analytical modelling for prediction and prevention of overflow occurrence in wire-based additive manufacturing». *Virtual and Physical Prototyping*, **20**(1), 1–17. doi:10.1080/17452759.2025.2547983.

[19] Haghghi, A. M., Ding, J., Sun, Y., & Wang, C., et al. 2023. «Thermo-capillary-gravity bidirectional modelling for evaluation and design of wire-based directed energy deposition additive manufacturing». *Journal of Manufacturing Processes*, **107**, 320–332. doi:10.1016/j.jmapro.2023.09.069.

[20] Mohebbi, M. S., Kühn, M., & Ploshikhin, V. 2020. «A thermo-capillary-gravity model for geometrical analysis of single-bead wire and arc additive manufacturing (WAAM)». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **107**(3-4), 877–891. doi:10.1007/s00170-020-05647-6.

[21] Cadiou, S., Courtois, M., Carin, M., Berckmans, W., & Le Masson, P. 2020. «Heat transfer, fluid flow and electromagnetic model of droplets generation and melt pool behaviour for wire arc additive manufacturing». *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **148**, art. 119102. doi:10.1016/j.ijheatmasstransfer.2019.119102.

[22] Shi, L., Lyu, X., Chen, J., Wu, C., Kumar, A., Zhai, M., & Ren, W. 2025. «Multi-scale simulation of thermal processes and microstructure evolution in wire arc additive manufacturing of 921A steel». *Materials Solidification*, **1**(1), art. 9580003. doi:10.26599/MAS.2025.9580003.

[23] Hu, R., Luo, M., Liu, T., Liang, L., Huang, A., Trushnikov, D., & Karunakaran, K. P. 2019. «Thermal fluid dynamics of liquid bridge transfer in laser wire deposition 3D printing». *Science and Technology of Welding and Joining*, **24**(5), 401–411. doi:10.1080/13621718.2019.1591039.

[24] Ai, Y., Yan, Y., Yuan, P., & Wang, Y. 2024. «The numerical investigation of cladding layer forming process in laser additive manufacturing with wire feeding». *International Journal of Thermal Sciences*, **196**, art. 108669. doi:10.1016/j.ijthermalsci.2023.108669.

[25] Lawson, S. B., Yan, D., Tabei, A., Paul, B. K., & Pasebani, S. 2025. «Numerical modeling of coaxial wire-powder laser directed energy deposition process in dissimilar metal additive manufacturing». *Results in Materials*, **26**, art. 100701. doi:10.1016/j.rinma.2025.100701.

[26] Kumar, S., Gopi, T., Harikeerthana, N., Gupta, M. K., Gaur, V., Krolczyk, G. M., & Wu, C. S. 2023. «Machine learning techniques in additive manufacturing: a state of the art review on design, processes and production control». *Journal of Intelligent Manufacturing*, **34**, 21–55. doi:10.1007/s10845-022-02029-5.

[27] Özel, T., et al. 2025. «Deep learning-based applications in metal additive manufacturing processes: Challenges and opportunities—A review». *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*, **8**(4), 453–468. doi:10.1016/j.ijlmm.2025.04.001.

[28] Assad, A., Bevans, B. D., Potter, W., Rao, P., Cormier, D., Deschamps, F., Hamilton, J. D., & Rivero, I. V. 2024. «Process mapping and anomaly detection in laser wire directed energy deposition additive manufacturing using in-situ imaging and process-aware machine learning». *Materials & Design*, **245**, art. 113281. doi:10.1016/j.matdes.2024.113281.

[29] Pazireh, S., Mirazimzadeh, S. E., & Urbanic, J. 2025. «A Review of Machine Learning Applications on Direct Energy Deposition Additive Manufacturing—A Trend Study». *Metals*, **15**(9), 966. doi:10.3390/met15090966.

[30] Zarin, I., Farahani, M. A., Wuest, T., & Liu, Z. 2023. «Machine Learning in Directed Energy Deposition (DED) Additive Manufacturing: A State-of-the-art Review». *Manufacturing Letters*, **35**, 689–700. doi:10.1016/j.mfglet.2023.07.012.

[31] Rashid, A., Vatandoust, F., Kota, A., & Melkote, S. N. 2025. «Bead geometry prediction in wire arc directed energy deposition using physics-informed machine learning and low-fidelity data». *Additive Manufacturing*, **76**, art. 104881. doi:10.1016/j.addma.2025.104881.

[32] MathWorks. 2026. Physics-Informed Neural Networks. Eskuragarri: <https://es.mathworks.com/discovery/physics-informed-neural-networks.html> (ikusita: 13 urtarril 2026)

[33] Farias, F., Filho, J. D. C. P., & Oliveira, V. H. P. M. E. 2025. «Prediction of the interpass temperature of a wire arc additive manufactured wall: FEM simulations and artificial neural network». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **136**, 5025–5041. doi:10.1016/j.addma.2021.102387.

[34] Reimann, J., Hammer, S., Henckell, P., Rohe, M., Ali, Y., Rauch, A., Hildebrand, J., & Bergmann, J. P. 2021. «Directed energy deposition-arc (DED-arc) and numerical welding simulation as a hybrid data source for future machine learning applications». *Applied Sciences*, **11**(15), art. 7075. doi:10.3390/app11157075.

[35] Le, V. T., Bui, M. C., Pham, T. Q. D., Tran, H. S., & Tran, X. V. 2023. «Efficient prediction of thermal history in wire and arc additive manufacturing combining machine learning and numerical simulation». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **126**, 4651–4663. doi:10.1007/s00170-023-11473-3.

[36] Ding, J., et al. 2021. «Efficient thermal simulation of large-scale metal additive manufacturing using hot element addition». *Additive Manufacturing*, **48**, 102378. doi:10.1016/j.addma.2021.102378.

[37] Tsai, Y. Y., & Huang, J. C. 2009. «Three-dimensional finite element analysis of thermal stress in single-pass multi-layer weld-based rapid prototyping». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **41**(11–12), 1084–1094. doi:10.1007/s00170-008-1545-3.

[38] Wang, S., Xue, Y., Tian, Z., Zhang, J., & Shen, J. 2022. «Modelling and experimental observation of the deposition geometry and microstructure evolution of aluminum alloy fabricated by wire-arc additive manufacturing». *Journal of Manufacturing Processes*, **80**, 1145–1156. doi:10.1016/j.jmapro.2022.06.055.