Ekaia, 2026, 49, 321-349
https://doi.org/10.1387/ekaia.28195

ekaia
ZIENTZIA eta TEKNOLOGIA ALDIZKARIA

ISSN 0214-9001 – eISSN 2444-3255

Aurrerapenak hari bidezko fabrikazio gehigarriko ereduetan

(Advances in wire based Additive Manufacturing modeling)

Amaia Montilla Allende, Jon Iñaki Arrizubieta Arrate, Aizpea Urresti Ubillos, Eneko Ukar Arrien, Aitzol Lamikiz Mentxaka*

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

LABURPENA: Lan honetan hari bidezko fabrikazio gehigarriko prozesuen (WAAM eta DED-LB) modelaketa aztertzen da multieskalaren ikuspuntutik, prozesuaren ulermen osoa lortzeko mikro, meso eta makroeskalen arteko elkarrekintza kontuan hartuz. Nahiz eta eskala guztiek garrantzi nabarmena izan, lanaren ardatza mesoeskalan jartzen da, kordoien sekzio-geometriak, galda-bainuaren portaerak eta tenperatura-banaketa lokalak erabat baldintzatzen baitituzte prozesuaren emaitzak. Mesoeskalan erabilitako eredu desberdinak aztertzen dira: formulazio analitikoak, oreka termo-kapilarrean eta grabitatorioan oinarritutako ereduak, fisika sakonean oinarritutako ordenagailuzko jariakinen dinamikaren (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, MLn oinarritutako hurbilketek konputazio-efizientzia eta aplikagarritasun handiagoa dute industria-eremuan. Mikroeskalaren ikuspegitik, solidotze-fenomenoen azalpena txertatzen da, eta makroeskalan, 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.

*** *Harremanetan jartzeko/Corresponding author:*** Amaia Montilla Allende. Bilboko Ingeniaritza Eskola, Torres Quevedo ingeniaria plaza, 1 (Bilbo). https://orcid.org/0009-0004-1776-8347, amaia.montilla@ehu.eus

Nola aipatu/How to cite: Montilla Allende, Amaia; Arrizubieta Arrate, Iñaki; Urresti Ubillos, Aizpea; Ukar Arrien, Eneko; Lamikiz Mentxaka, Aitzol (2026). «Aurrerapenak hari bidezko fabrikazio gehigarriko ereduetan», *Ekaia*, 49, 2026, DOI: https://doi.org/10.1387/ekaia.28195

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

ISSN 0214-9001-eISSN 2444-3225 / © UPV/EHU Press

Lan hau *Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-PartekatuBerdin 4.0 Nazioartekoa* lizentzia baten mende dago

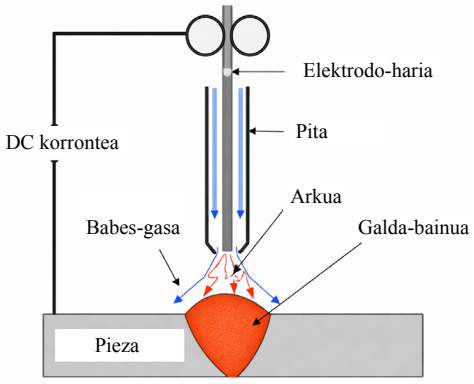
1. **SARRERA**

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*) teknika eraginkor gisa finkatu dira geruzaz geruza urtutako materiala gehituz tamaina handiko pieza metalikoak fabrikatzeko. Hari eta laser bidezko DEDean, 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 askotariko abantailak 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 kalte egiten diote [1, 2].

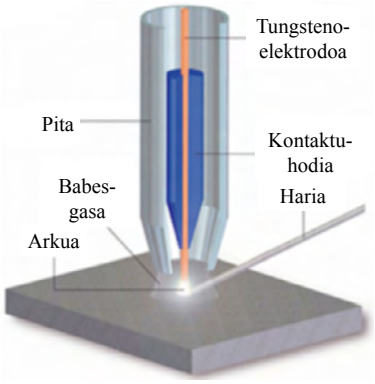
Prozesu horiek dakartzaten onuren artean, ondorengoak dira adierazgarriak:

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

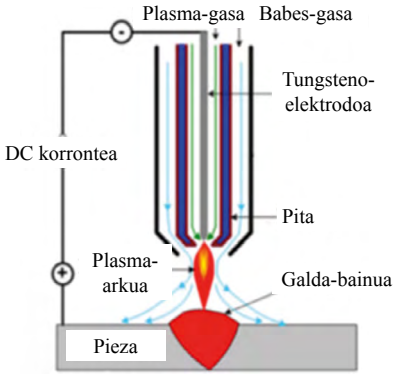
WAAM mota nagusiak erabilitako soldadura-prozesuaren arabera sailkatzen dira: GMAW, *Gas Metal Arc Welding* (MIG/MAG, *Metal Inert Gas/Metal Active Gas*); GTAW, *Gas Tungsten Arc Welding* (TIG, *Tungsten Inert Gas*) eta PAW, *Plasma Arc Welding*. Bero-iturriaren, arkuaren kontrolaren eta lortutako akaberaren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



(a)



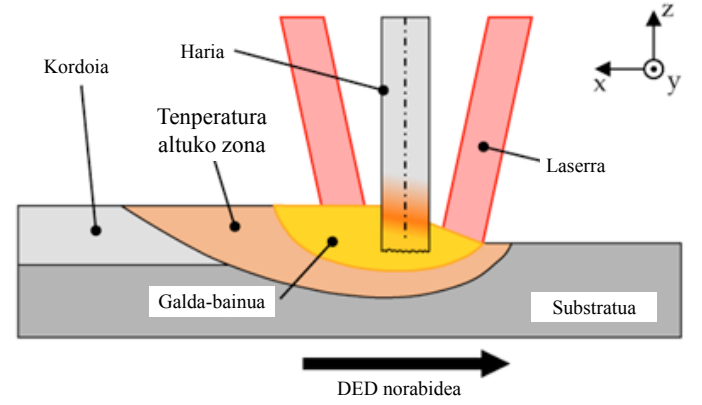
(b)



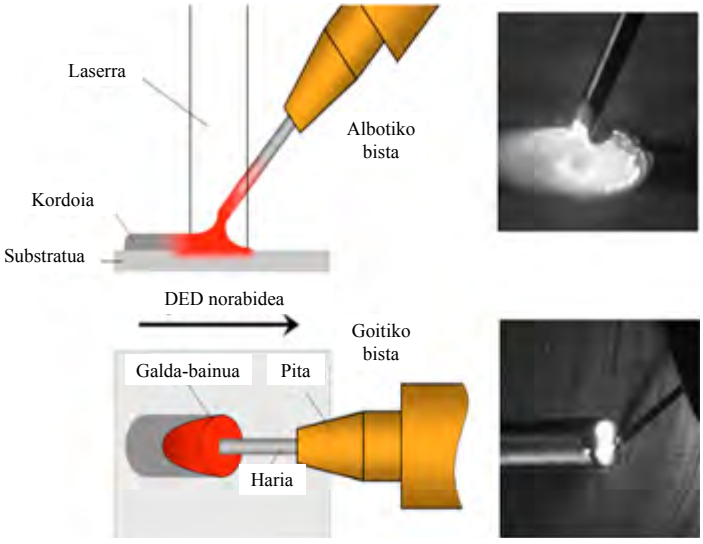
(c)

1. irudia. WAAM prozesu moten 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] (ikus 2. irudia).



(a)



(b)

2. irudia. Laser eta hari bidezko DED: (a) konfigurazio koaxiala, [4] erreferentziatik egokitua, eta (b) alboko konfigurazioa, [5] erreferentziatik egokitua.

WAAM eta DED-LB prozesuek multieskalak eta denbora laburra barne hartzen dituzte, eta beharrezkoa da emaitzak aurreikusteko hainbat

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

WAAM eta DED-LB prozesuek duten konplexutasuna dela eta, simulazio aurreratua prozesu horiek optimizatzeko eta materialaren portaera iragartzeko erreminta erabilgarria da, soilik saiakuntza enpirikoen mende egon gabe, kostuak eta denbora murriztuz. Gainera, multieskala 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 horien konplexutasunak aipatzen dira, konplexutasun bakoitza aurreikusteko eta aztertzeko zein eskalatako analisiak duen garrantzia azpimarratuz.

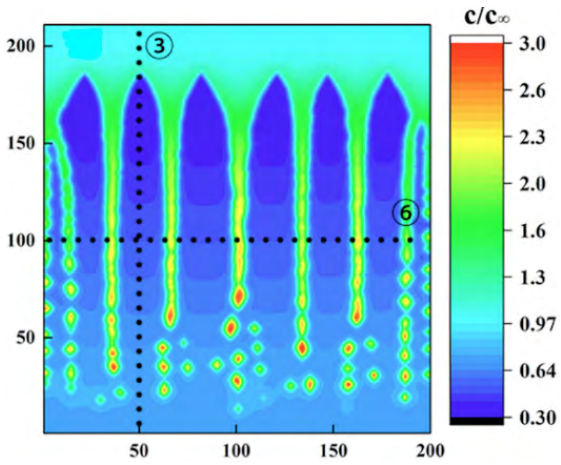
1. taula. WAAM eta DED-LB prozesuen onurak eta konplexutasunak, eskala bakoitzaren jakingarriak azpimarratuz.

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 eragin zuzena dauka bukaerako piezaren mikroegituran eta, beraz, haren propietateetan.
Mesoeskala	*Urtutako materialaren jariakortasuna:* prozesuaren egonkortasunean eta emaitzetan eragin zuzena du. Materialaren portaera aurreikustea oso konplexua da, eta horretarako beharrezkoa da abiadura handiko kamerak erabiltzea. 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, mesoeskalako 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 (ikus 3. irudia) [7]. Gainera, solidotze-prozesuaren azterketa sakona funtsezkoa da propietate mekanikak zehazte aldera, adibidez egitura monokristalez osatutako piezetan [8].



3. irudia. Mikroeskalako modelo baten bidez lortutako mikroegitura [7].

Mikroeskalako modeloetan jarraitzen den ohiko prozedura honako hau da: lehenik gehitutako materialaren historial termikoa lortzen da, datu esperimentaletatik abiatuta edota aurreko makroeskalako modelo bat erabiliz. Behin bukaerako piezaren historial termikoa ezagututa, mikroeskalako modeloa 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 dutenak.

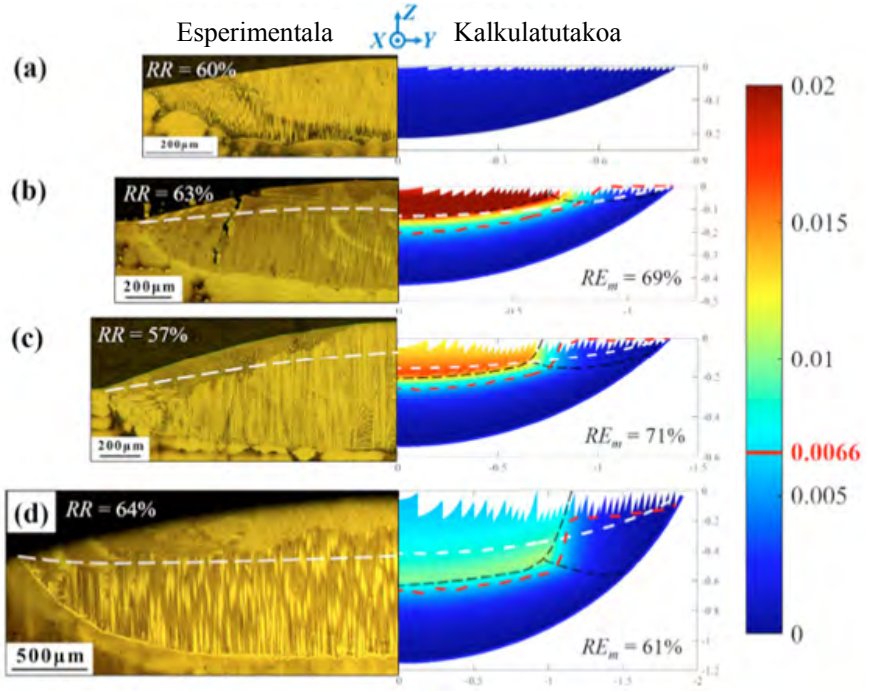
Ezaugarri horri esker, errendimendu bikaina lortzen da materialaren propietate mekanikoei dagokienez, bereziki nekearen aurkako erresistentzian; eta oso garrantzitsuak dira aplikazio zorrotzetan; hala nola turbina aeronautikoetan [8].

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 horiek modu eraginkorrean lortzeko [8].

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

Jacob D. Miller-en lanak [10] hari eta arku bidezko fabrikazio gehigarriko prozesuaren (WAAM) bidez kristal bakarreko osagaiak fabrikatzeko aukera ikertzen du, fabrikazio-prozesu tradizionaletan gertatzen den solidotzearen ordezko aukera gisa. Lanak simulazio termikoak eta esperimentu praktikoak konbinatzen ditu, kristal bakarreko substratuen gainean nikela jalkiz. Emaitzek erakusten dutenez, kontrol termikoko eta gradiente egokiko 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 bakarreko egiturak fabrikatzea aldez 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.*k [11] hauts-elikaduraren efektuei aurre egiteko eta prozesamendu-mikroegituraren mapak kalkulatzeko erabiltzen den zenbakizko eredu konbinatua zabaltzeko estrategia erraza eta bideragarria aurkezten dute. Monokristalen hazkundearen erlazio bereizgarri bat definitzen dute, amaierako solidotze-mikroegitura kuantitatiboki alderatzeko. Prozesamendu-mikroegituraren mapek prozesamendu-aldagai gehienen eragina kalkula dezakete, bereziki hauts-elikaduraren abiadura eta zutabetik ardatzerako trantsizioaren posizioa. Prozesamendu-mikroegitura mapa horien arabera hautatutako prozesamendu-parametroak erabiliz, arrakastaz fabrikatu dute LAM (*Laser Additive Manufacturing*) bidez dendrita finak dituzten kristal bakarreko 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.



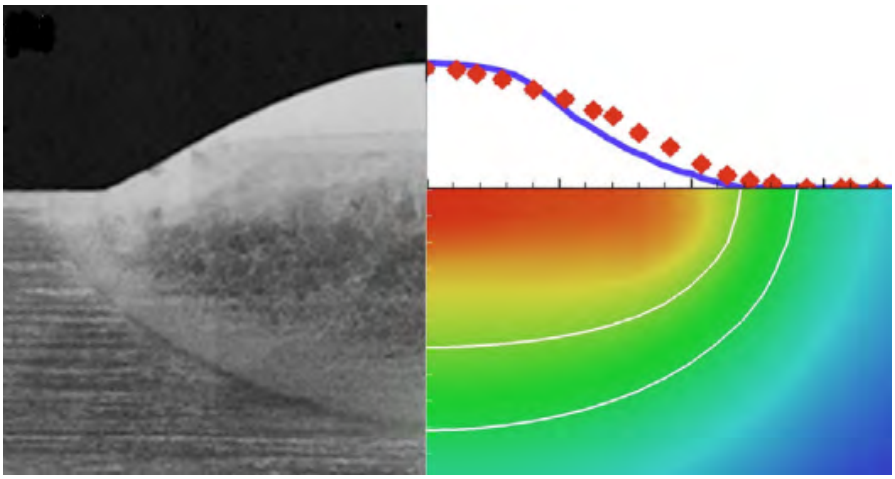
4. irudia. Liang *et al.*k [11] simulazio bidez kalkulatutako lau banaketa tipikoren eta esperimentalki behatutako mikroegituren arteko konparazioak. Lerro eten gorriak CETa lehen aldiz gerta daitekeen posizioak dira.

Liu *et al.*k [12] hauts-elikaduraren prozesua kontuan hartzen duen eredu multifisiko bat garatu zuten, substratuaren orientazio desberdinetan mikroegituretan dauden desberdintasunak aztertzeko. Simulazioaren emaitzek erakutsi zuten hauts-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, laserraren

edo arkuaren potentzia, besteak beste). 5. irudian mesoeskala modelo batek aurreikusitako kordoiaren sekzioa ikus daiteke, kordoi errealaren sekzioarekin alderatuta, [13] erreferentziatik hartuta.



5. irudia. Mesoeskalako modeloa kordoiaren bukaerako sekzioa iragartzeko.

Azken urte hauetan ikerketa ugari bideratu dira mesoeskalako kordoiaren geometria iragartzera eta simulatzera, ikuspegi desberdinak erabiliz. Artikulu honetan, ikuspegi horiek bost kategoria nagusitan sailkatu dira:

- Erregresio estatistikoan oinarritutako modelo analitikoak, datu esperimentaletan oinarrituta kordoiaren dimentsioak iragartzen dituzten metodo enpirikoak.
- Indarren orekan oinarritutako modelo analitikoak, grabitatea eta gainazaleko tentsioa bezalako indarrak orekatuz kordoiaren forma kalkulatzen dutenak.
- Eredu fisiko-numerikoak (CFD, *Computational Fluid Dynamics*), fluidoen 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 kordoiaren geometriarekin lotzen dituzten formula enpirikoak doitzeko. Diseinu esperimentalak (DOE, *Design Of Experiments*) egin ohi dira parametroen laginketarako; adibidez, korrontea, tentsioa, jalkitze-abiadura, haria elikatzeko abiadura; emaitzetatik abiatuta geometria neurtzeko (kordoi-azalera, altuera, zabalera, etab.) eta, ondoren, eredu matematiko bat doitzeko (adibidez, erregresio lineala edo polinomikoa). Eredu horien helburua ekuazio sinpleak lortzea da, simulazio konplexurik egin gabe kordoiaren altuera eta zabalera aurreikusteko, aztertutako parametro-tartearen barruan. Soldaduran eta WAAM 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 horretako modeloetan, alde batetik, soilik kordoi bakarraren sekzioa aurreikusten dutenak daude. 6. irudian, kordoi bakarraren sekzioa hurbiltzen saiatzeko, eta ondoren aurreikusteko erabiltzen diren funtzio matematikoen adibideak ageri dira:

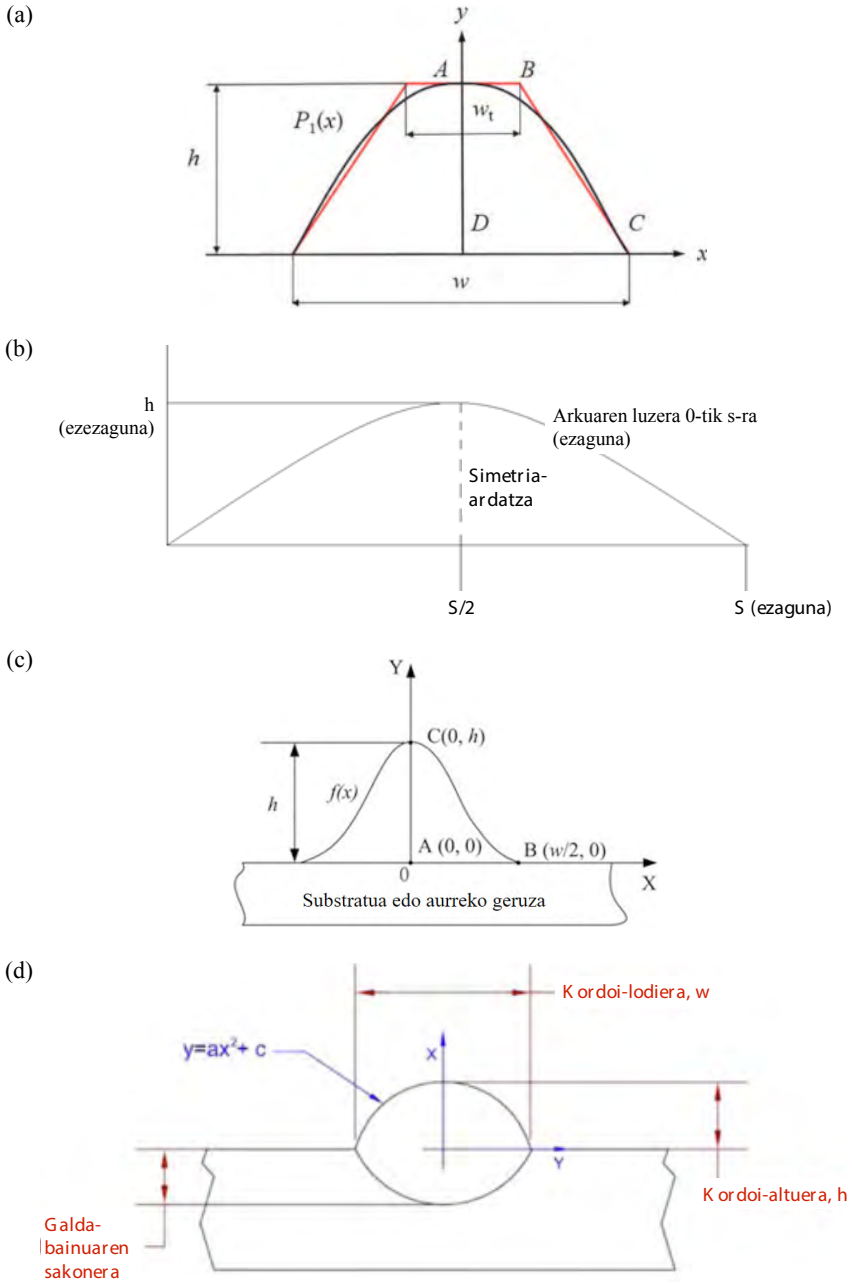
Beste alde batetik, bata bestearen alboan dauden kordoien sekzioa kontutan hartzen dutenak ere badaude (ikus 7. irudia):

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

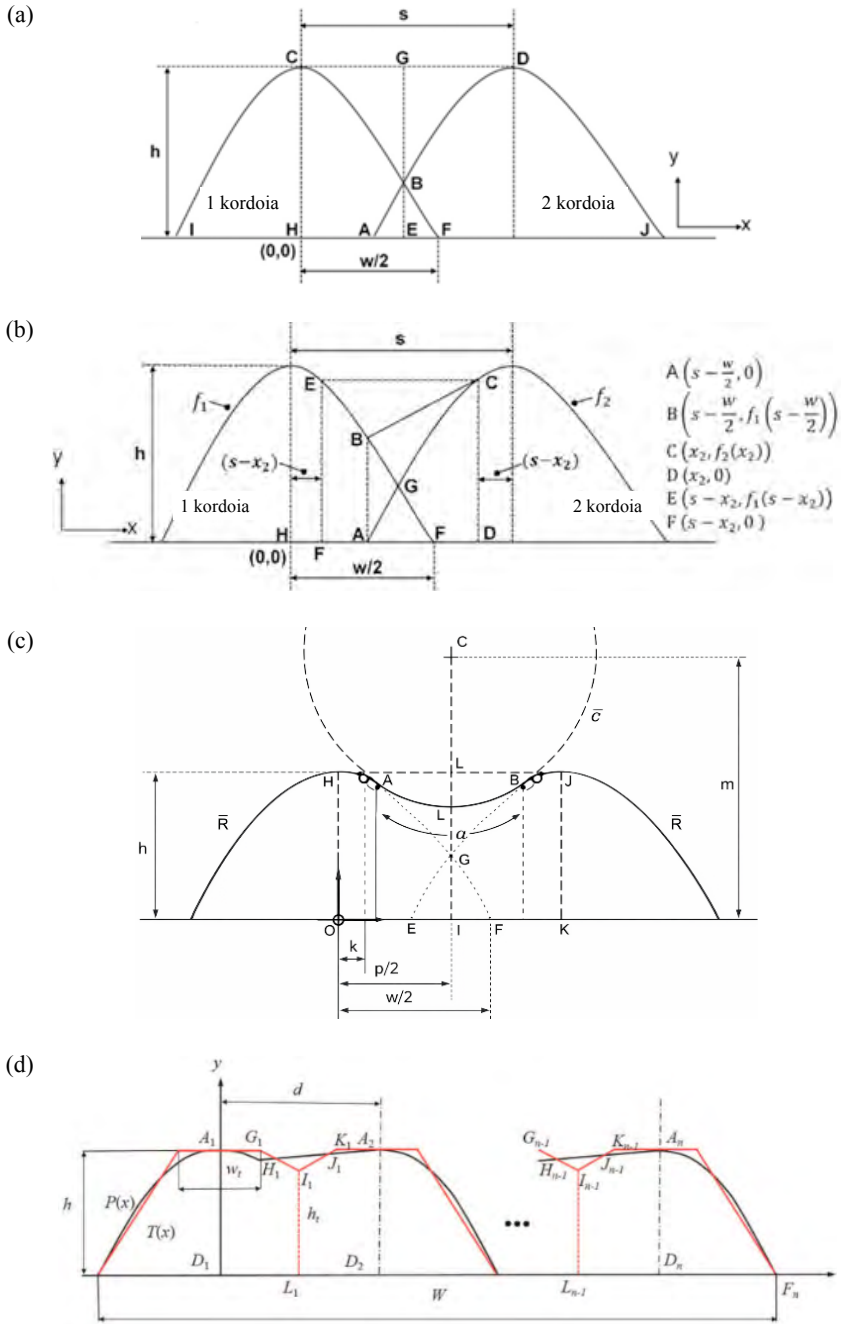
Modelo horiek erabiltzeko errazak eta azkarrak dira, eta kordoiaren geometria berehala kalkulatzea ahalbidetzen dute, sarrerako parametroetatik abiatuta eta zenbakizko simulazio garestirik gabe. Intuizio fisikoa ematen dute aldagai bakoitzak nola eragiten duen erakusteko. Gainera, datu gutxi behar dira *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 gal daiteke. Ez dute fenomeno ez-lineal konplexurik kontuan hartzen, ezta doikuntzan sartzen ez den interakzio fisikorik ere. Huts egin dezakete datuetan adierazita ez dauden modu-aldaketak gertatzen badira. Laburbilduz, kutxa beltzeko ereduak dira, datu espezifikoetara egokituak, fisikaren ezagutza espliziturik gabe, eta, beraz, estrapolatzeko gaitasun urria dute. Doitasuna lortzeko, erabilitako datuen menpekotasuna dela eta, material edo prozesu bakoitzerako birkalibrazioa behar izaten da.

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



6. 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].



7. irudia. Kordoi anitzen zeharkako sekzioa aurreikusteko erregresio estatikoan oinarritutako modelo analitiko mota ohikoak. (a) Goialde lauko gainjarpeneko mo-

deloa *(Flat-Top Overlapping Model*, FOM) [17], (b) gainjarpen tangentzialeko modeloa (*Tangent Overlapping Model*, TOM) [17], (c) kordoi anitzeko zirkunferentzia bidezko gainjarpeneko modeloa *(Multi-bead circunference-based overlapping model)* [16], (d) kordoi anitzeko trapezio isoszele bidezko gainjarpeneko modeloa (*Multi-bead isosceles trapezoid-based overlapping model)* [14].

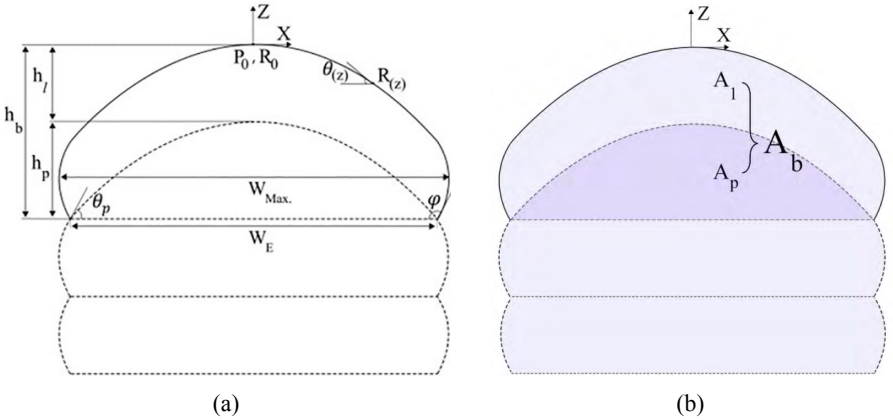
Ikuspegi zabalduena da, oso erabilia soldaduran, eta WAAM/DED-LB sistemara aplikatuta duela gutxi egindako ikerketetan baliagarria izan da prozesua azkar parametrizatzeko [14-17]. Hala ere, metodo sofistikatuagoen gorakada dela eta, eredu enpiriko hauek gaur egun fideltasun txikikotzat jotzen dira: hasierako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

3.2. **Modelo analitikoak fenomeno fisikoak kontuan hartuta: modelo termo-kapilar-grabitatorioak**

Eredu hauek kordoiaren oinarrizko fisikan oinarritzen dira, galda-bainuaren isatsean urtutako metala egoera kuasiestatikoan dagoela joz; kordoiaren forma analitikoki kalkulatzen dute (ikus 8. irudia) indarren oreka estatikotik abiatuta, indar garrantzitsuenak grabitatea (kordoia lautzeko joera duena) eta metal urtuaren gainazaleko tentsioa (kordoia goian mantentzeko joera duena) izanik. Beraz, ekuazio sinplifikatuak (adibidez, Young-Laplaceren ekuazioa gainazal librearen formarako) bolumen- eta energia-balantzeekin batera ebazten dituzte, kordoiaren altuera eta zabalera iragartzeko prozesuaren parametroen arabera, kontuan izanik, besteak beste, 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 kordoiaren amaieran, eta abar), baina fluxuaren dinamika konplexua denbora errealean simulatzera iritsi gabe.

Modelo mota hauek hainbat abantaila dituzte; hasteko, fisikan oinarritutako hurbilketa eskaintzen dute, zeina konputazionalki eraginkorra den. 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 atzeman dezakete, eta, kontrara, gainazal-tentsio altuak izaten dituztenek kordoi altuagoak ere bai. Irizpide analitikoetan oinarrituta (adibidez, Bond zenbakiaren balio kritiko kalkulatuz), 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.



(a) (b)

8. irudia. Modelo termo-kapilar-grabitatorioen bidez ebatzitako geruza anitzeko eta DED bidez fabrikatutako kordoiaren sekzioa [19]: (a) aldagai geometrikoak eta (b) azalerak: A_l jalkitako azalera, A_p urtutako metala aurreko geruzan sartutako azalera eta A_b kordoi osoaren azalera.

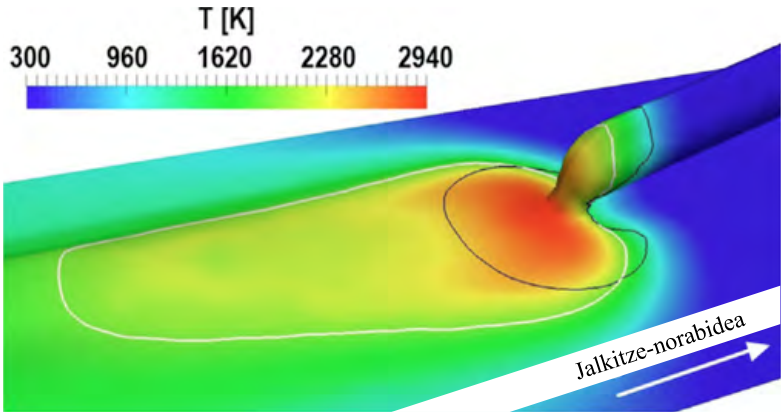
Alabaina, metodo hauen desabantaila aipagarria da sinpletasun hori lortzeko suposizio indartsuak egiten dituztela: ez dituzte kontuan hartzen, besteak beste, 2D geometria simetrikoa, gainazal-tentsio konstante eta uniformea, eta barneko fluxu konbektiboak. Ez dute bero-transferentzia xehetasunez simulatzen,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

Normalean, ereduen 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 aurresateko. Kalkuluak konputazio-kostu txikikoak dira, eta ereduak analitikoki ebazteko moduan planteatzen dira. Beraz, ez da beharrezkoa simulazio konputazional sendoagoetara jotzea [18-20].

Ikuspegi nahiko berria da WAAM/DED-LB testuinguruan eta oraindik ikerketa-fasean dago; talde gutxik aplikatu dute, eta haien gaitasunak zabaltzen ari dira. Etorkizun handiko metodoa izatea aurreikusten da, fisika ezagunean oinarritua, iragarpen-adibide arrakastatsuekin, baina oraindik garatzen ari da 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 kordoiaren 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 (laserraren 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 ere kontuan hartu ohi dira. Azken geometria (kordoiaren altuera/zabalera, sarpena) ez ezik, tenperaturen banaketa, abiadurak, historial termikoa eta gerta litezkeen akatsak ere (poroak, adibidez) fideltasun handiz iragartzea dute helburu; adibidez, 9. irudian CFD modelo bidez lortutako tenperaturen banaketa ikus daiteke.

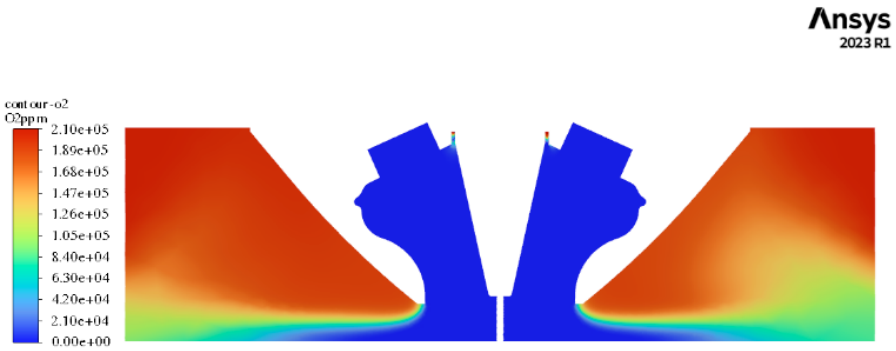


9. irudia. Galda-bainuaren eta urtutako hariaren tenperaturaren kalkulua CFD modelo bidez [13].

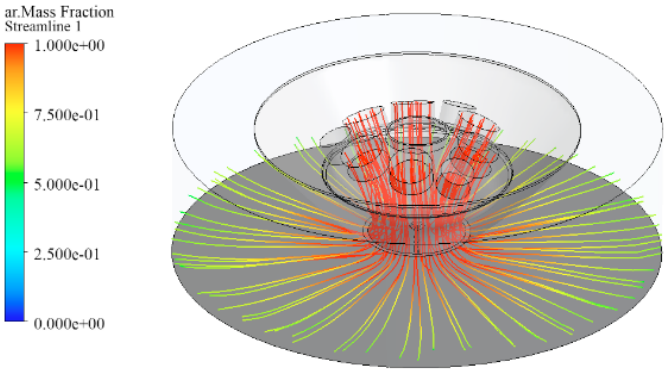
Errealitatetik gertuen dauden modeloak dira orokorrean, esplizituki kontuan hartzen baitituzte prozesuko ia fenomeno garrantzitsu guztiak, eta azken geometria ez ezik, dinamika iragankorra ere xehetasunez aurreikustea ahalbidetzen dute [21]. Adibidez, zipriztinak egongo diren, tenperatura eta abiadura nola aldatzen diren galda-bainuaren barruan, termikoki kaltetutako eremuaren tamaina zein den, etab. [22]. Gainera, ikuspuntu fisiko sakona eskaintzen dute; zenbait baldintzatan kordoi akastunak zergatik sortzen diren azaltzen laguntzen dute; adibidez, hari-gehikuntzaren abiadura oso altuek galda-bainuaren ezegonkortasuna eragin dezaketela [22]. Gainera, oso orokorrak dira; izan ere, kalkulu-potentzia nahikoarekin, hainbat material, prozesu (TIG, MIG, laserra) eta parametrotan aplika daitezke, egoera bakoitzera doituz, lege fisiko unibertsalak ezartzen baitituzte. Halako kasuen 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 esanguratsuena 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 izaten dira, prozesu errealeko segundo gutxiren truke. Horrek erabilgarritasun gutxikoak bihurtzen ditu zuzeneko optimizaziorako edo lineako kontrolerako. Gainera, parametro eta azpieredu 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 azpimodelo horien kalibrazioaren araberakoa da, eta askotan parametroak doitzen dira simulazioa neurri esperimentalekin bat etor dadin [24, 25]. Gainera, sinplifikazioak ere egin behar izaten dira kostu konputazionala murrizte aldera; edo fenomeno fisikoak banaka aztertu; adibidez, 10. irudian Bilboko Ingeniaritza Eskolan garatutako modeloa agertzen da, non DED prozesurako Meltio enpresako buruak eskaintzen duen babes-gasaren portaera eta eraginkortasuna aztertzen den.

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 arkuaren edo laserraren bero-iturrirako, tanta-jalkipenerako (askotan *Volume Of Fluid* [VOF] zein *Level Set* [LS] metodoak erabiliz gainazal librea kontuan hartzeko), eta solidotzeko [22].



(a)



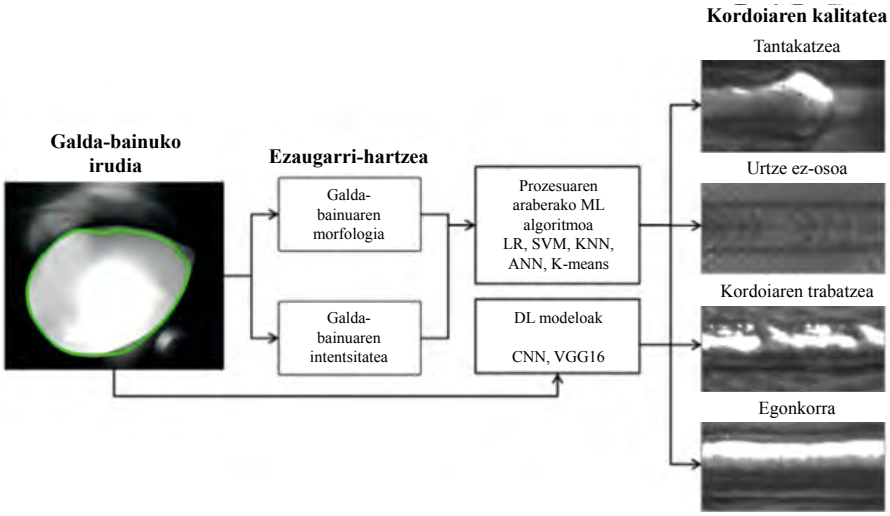
(b)

10. irudia. Meltio enpresako DED-LB buruak eskaintzen duen babesa aztertzen duen modeloa. (a) Erdiko planoko oxigeno kontzentrazioa, (b) gasaren banaketa.

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 handiak direla 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 AAk (Adimen Artifizialak) ustiatzen dituen datu-baseak sortzeko. Laburbilduz, erreferentzia zehatzak dira, eta epe luzera, gaitasun handiagoarekin eta sinplifikazio adimendunekin, gaitasun batzuk ingeniaritzako tresna irisgarrietara eramatea espero da [7].

3.4. ***Machine Learning*ean oinarritutako modeloak**

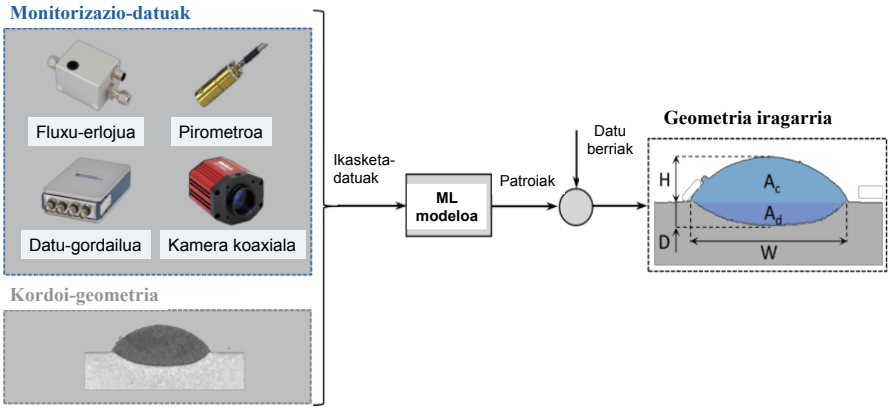
Kasu honetan, datuen bidezko (*data-driven*) ikasketa automatikoko ereduak entrenatzen dira, prozesu-parametroak sortutako kordoiaren geometriara doitzeko, esplizituki ekuazio fisikorik ebatzi gabe. Erregresio ez-linealeko algoritmoak (erabaki-zuhaitzak, *Random Forest*, sare neuronal artifizialak, etab.) 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-datuen multzoetatik abiatuta «ikas» ditzan. Prozesuaren datu nahiko emanda (adibidez, kordoien geometriaren neurketak baldintza desberdinetan edo sentsoreen lineako datuak), makinak patroi ezkutuak identifika ditzake. Patroi horietatik abiatuta, kordoiaren ezaugarriak aurreikus ditzake, hala nola altuera, zabalera, kalitate-desbideratzeak edo akatsen presentzia baldintza berrietarako. Eredu enpiriko sinpleetan ez bezala, hemen algoritmo modernoak aprobetxatzen dira. 11. irudian ML modelo baten adibidea ageri da [26, 27].



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

Machine Learning (ML) modeloek erlazio konplexuak eta ez-linealak atzeman ditzakete, esplizituki modelatu beharrik gabe. Datu gehiagorekin autohobetzeko gaitasuna dute; hau da, zenbat eta esperientzia (datu) gehiago eman, orduan eta zehatzagoak eta sendoagoak bihur daitezke; hala ere, algoritmo horien errendimendua datuen kalitate eta adierazgarritasunaren, zarata-mailaren, ereduaren gaitasunaren eta abarren menpe dago. Al-

goritmo batzuek (adibidez, *Random Forest*) ondo maneiatzen dituzte datu zaratatsuak, eta aldagaiei garrantzi erlatiboa ematen diete, geometrian eragin handiena duten parametroak identifikatzen lagunduz. Elikatutako datuen artean (irudiak, korronte-uhinen formak, etab.) interpretatzeko aukera ere eskaintzen dute, geometria edo kalitatea iragartzeko informazio-iturri ugari integratuz. Gainera, behin entrenatu ondoren, modelo hauek azkar exekutatzen 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 kordoiaren geometriaren kalkuluan zehaztasuna erakutsi dute, eredu analitiko tradizionalek lortutakoen parekoa edo handiagoa [28].



12. irudia. Bilboko Ingeniaritza Eskolan DED prozesurako garatutako ML modeloaren eskema.

Hala ere, badituzte beren trabak ere; esaterako, kalitatezko datu asko behar dira entrenatzeko, alegia, WAAM/DED-LB prozesuen lagin asko exekutatu behar dira, edo sentsore aurreratuen beharra dago. Entrenamendu-multzoak parametro-erregimen jakin bat betetzen ez badu, ML ereduak huts egin dezake datuak estrapolatzean (ez baitu azpiko fisika ulertzen, ikasitako patroiak baizik); izan ere, kutxa beltzak dira, iragarpena ematen dute, baina ez azalpen zuzenak, interpretagarritasuna zailduz. Gainera, datu bidez entrenatzen direla kontuan hartuta, aipagarria da orokortzea galdu egiten dela modelo hauetan. Horretaz gain, eredu hauek garatzeak esperientzia eskatzen du datu-zientzian [29].

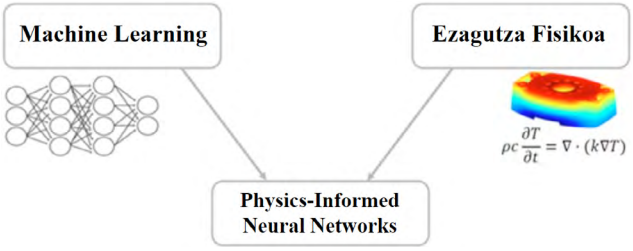
Modelo hauen garapenerako, Python eta antzeko lengoaiak erabiltzen dira; MATLAB, R eta halako inguruneak ere erabiltzen ikerketetan. Esperimentu askok sentsoreak akoplatzen dituzte (kamerak, laser-eskanerrak, korronte-neurgailuak), eta horien datuek modeloa elikatzen dute; beraz, sei-

naleak eta irudiak prozesatzeko tresnak ere erabiltzen dira (OpenCV, adibidez). WAAM eta DED prozesuetan, modelo hauek automatizazio-software bidezko kontrol-sistemetan integra daitezke, sare neuronal bat inplementatuz PLC edo ordenagailu industrial batean, parametroak zuzenean doitzeko [30].

Machine Learning modeloak nahiko berriak dira prozesu hauen testuinguruan, baina, azken urteetan, testuinguru isolatuetan ML algoritmoak probatzetik WAAM eta DED-LB prozesuetan integratuta ikustera igaro da. Hala ere, heldutasun mugatua du; prototipoak eta kontzeptu-probak daude, eta emaitza onak dituzte, baina oztopo nagusia datu nahikoak eta esanguratsuak lortzea izan da; lantegi guztiek ez dituzte ehunka lagin karakterizatzeko denborarik, ez ahalmenik sare bat entrenatzeko. Hala ere, digitalizaziorako joerarekin eta sentsore eskuragarriagoekin, espero izatekoa da ML gero eta gehiago aplikatzea kordoi-geometriaren eta -kalitatearen kontrolean [30].

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, kordoiaren bukaerako geometriaren iragarpenean horiek kontuan hartzera behartuz (ikus 13. irudia). Beste hurbilketa hibrido batzuk multifideltasun-ereduak 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].



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

Modelo hibridoek oreka optimoa lortzen dute zehaztasunaren eta eraginkortasunaren artean. Lege fisikoak errespetatzen dituztenez, hobeto estrapolatzeko joera dute: adibidez, PINN batek ez du fisikoki ezinezkoa den kordoi-altuera bat 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 datu erreal gutxirekin batera entrenatzeko, hutsuneak betez. ML ereduen azkartasunari eusten diote; behin entrenatu ondoren, PINN edo sare hibrido batek milisegundotan aurresaten du kordoiaren 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].

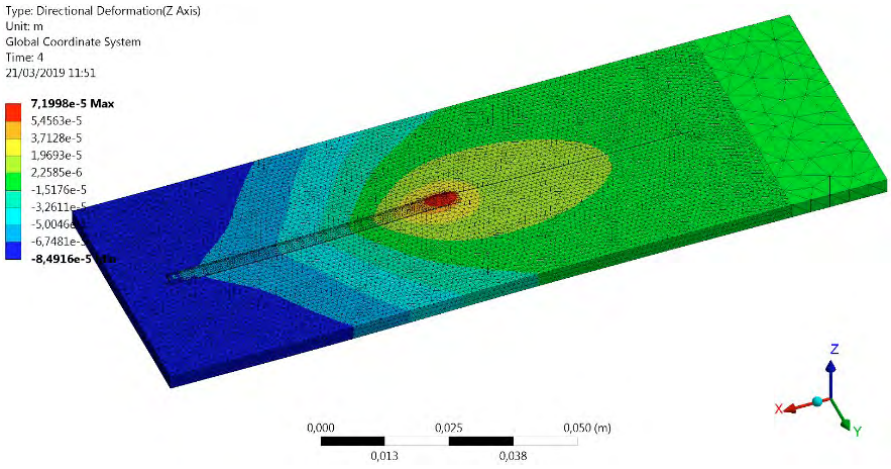
Mugarik aipagarriena modelo hauen eraikuntza konplexua da; PINN bat garatzean, adibidez, behar bezala formulatu behar dira ekuazioak eta ingurune-baldintzak. Entrenatzeko ere kalkuluak egiteko gaitasun handiagoa behar izaten dute, sare neuronala entrenatzen den bitartean ekuazio diferentzialak ebaztea garestia baita. Gainera, modelo hibridoaren kalitatea txertatutako fisika egokia eta kalibratua izatearen araberakoa da; ekuazioak gehiegi sinplifikatuta badaude edo fideltasun baxuko datuak erabiltzen badira, eraginkortasuna gal daiteke [34]. Horretaz gain, PINNetarako edo beste eredu hibrido batzuetarako tresnak eta liburutegiak oraindik garatzen ari dira, eta horien inguruko jakintza murritza 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, *framework* akademikoak bezalako liburutegi espezializatuak sortzen ari dira, helburu orokorreko lengoaiez gain (Python). Eredu hibridoek, oro har, simulazio-softwareak (adibidez, MATLABen fideltasun baxuko eredu bat edo CFD kode sinplifikatu bat exekutatzea) 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-ezarpenik, baina ibilbidea argia da: esperientzia PINNekin eta modelo hibridoekin eskuratzen diren heinean, epe ertaineko aplikazio praktikoak ikus litezke (adibidez, kordoia kontrolatzeko sistema integratuak). Laburbilduz, etorkizunerako perspektiba handia da, baina gaur egun erabilera akademiara 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. Makroeskalan, 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].

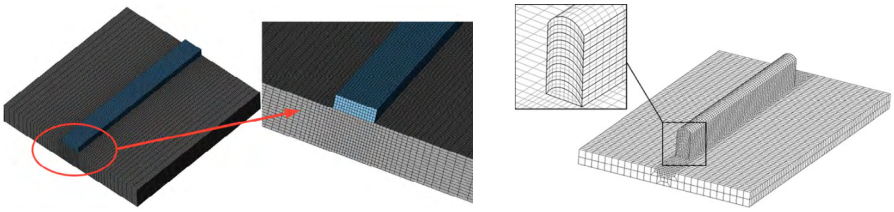


14. irudia. Bilboko Ingeniaritza Eskolan garatutako makroeskalako DED-LB modeloa.

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

Orokorrean, makroeskalako modeloetan geruza bakoitzaren geometria sinplifikatu egiten da. Aukera posibleen artean, erabilienak kordoi lauki-

zuzenen bidez edo sekzioa lehendik ezaguna den funtzio matematiko baten bidez modelatzea (adibidez, zirkunferentzia-erdia) (ikus 15. irudia). Gainera, simulazio askotan bukaerako piezaren geometria perfektua simulatzen da zuzenean sinplifikazio gisa [38].



(a) (b)

15. irudia. Makroeskalako modeloetan egiten diren geometria-sinplifikazioak: (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 aurresateko. Eskala bakoitzak alderdi jakin bat azaltzen du, eta hiru eskalen sintesiak bakarrik ematen du ikuspegi osoa. Horregatik, multieskalako markoa izan da lan honen ardatza.

Mikroeskalan, aleen hazkuntza, solidotze-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 galdabainuaren geometria eta tenperatura ondo ezagutzea.

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

Ereduak alderatuta, ikusten da fisika kontuan hartzen dutenek fidagarritasun handiagoa dutela kordoien forma aurresateko. Hala ere, kal-

kulu-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.

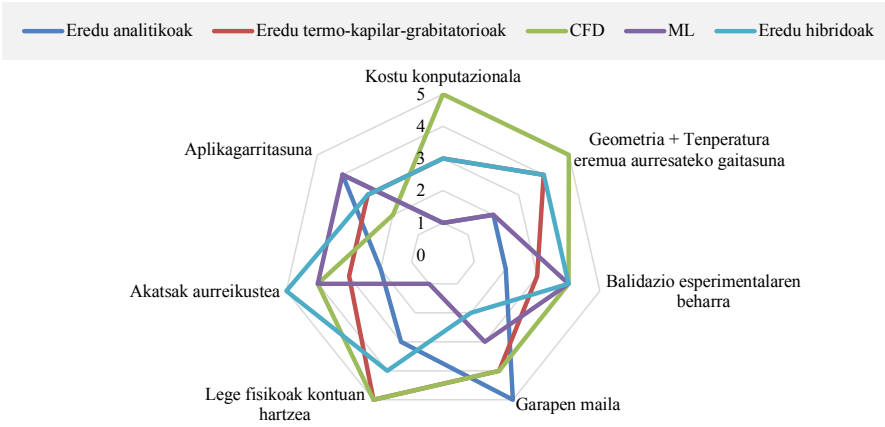
Mesoeskalako ereduek makroeskalako simulazioekin bateragarritasun handia dute. Kordoien geometria zehaztasunez aurreikustea beharrezkoa da bero-iturria eta material-gehikuntza definitzeko. Makroeskalan beroaren hedapena eta portaera termo-mekanikoa aztertzen dira. Mesoeskalatik datozen parametroek (kordoiaren altuera, zabalera edo transferitutako bolumena) baldintzatzen dute tenperatura-gailurren banaketa; horrek eragina du, adibidez, distortsioen sorreran.

Ondorioz, ereduen 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 ereduek ez dute fisika guztiz erreproduzitzen; baina oso erabilgarriak dira kontrol- eta optimizazio-tresnetan.

Lan honek hiru ondorio nagusi atzematen ditu:

1. Mesoeskalako modelaketa da prozesuaren erdigunea. Bertatik elikatzen dira bai mikro mailako ulermen metalurgikoa, bai makro mailako portaera termo-mekanikoa.
2. Ereduen 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, 16. irudian mesoeskalako ereduen konparazio-diagrama bat aurkezten da. Diagrama horrek hainbat irizpide hartzen ditu kontuan: kalkulu-kostua, kordoien geometria eta tenperatura aurresateko gaitasuna, balidazio esperimentalarekiko menpekotasuna, literaturan duten garapen-maila, lege fisikoen presentzia, akatsen aurreikuspena eta aplikagarritasuna ikerketa- edo industria-testuinguruan.



16. irudia. Mesoeskalako ereduen arteko konparazio-diagrama. Eremu bakoitzari 1 eta 5 arteko balioa eman zaio, 1 baxua izanik eta 5 altua.

ESKER ONAK

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

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 Manufacturin*g, **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. 2020. *Single Crystal Deposition via Wire Arc Additive Manufacturing,* M.S. thesis, Dept. Mech. Eng., University of Idaho, Moscow, ID, USA.

[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] HAGHIGHI, 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] HAGHIGHI, 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., KÜHL, 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