

Fabrikazio gehigarritz egindako material anitzeko egituren portaera termikoaren modelizazioa

(Modelling the thermal behavior of multi-material structures with additive manufacturing)

June Legorburu¹, Xabier Agirre¹, Jon Iñaki Arrizubieta^{1*}, Amaia Iturrioz²,
David Aguilar², Ruben Escribano², Aitzol Lamikiz¹

¹ Mekanika Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola, Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU)

² Fabrikazio Gehigarri Teknologiak. Lortek-BRTA

LABURPENA: Fabrikazio gehigarria forma konplexuko piezak fabrikatzeko eta balio erantsi handiko piezen konponketarako prozesu egokia bilakatu da azken urteotan, industriarako. Alabaina, prozesu horrek eskaintzen dituen aukerak haratago doaz eta berriki material desberdinen konbinaketarako erabiltzen hasi da. Fabrikazio gehigarriak materiala modu lokalizatuan gehitzea ahalbidetzen du; hortaz, posible da material jakin bateko oinarrian propietate bereziak eskaintzen dizkion geruza edo zirkuituak atxikitzea. Arlo horretan beste aurrerapauso bat emateko helburuarekin, ikerlan honetan Invar 36ko oinarrian kobrezko ekarpen lokalizatuak eragin dezakeen eremu termikoaren gaineko kontrol-gaitasuna aztertuko da. Horretarako, Invar 36 hutseko probeta bat fabrikatu da fabrikazio gehigarri bidez, eta harekin elementu finituetako eredua balioztatu da. Bigarren pausu batean, eredu hori baliatuz forma desberdineko kobrezko pisten hozketa-gaitasuna ebaluatu da, eta zirkuitu bikoitzen bidez, hots, hozte- eta berotze-zirkuituak erabiliz, piezaren gainazalean eremu termikoa kontrolatzeko gaitasuna bermatu da. Horrela, fabrikazio gehigarriak material anitzeko egiturak fabrikatzeko eskaintzen duen gaitasunari esker, propietate eta portaera termiko jakineko piezen fabrikazioa posible dela baieztatu da.

HITZ GAKOAK: Fabrikazio gehigarria, digitalizazioa, portaera termikoa, material anitzeko egiturak, kobrea, Invar 36.

ABSTRACT: Additive Manufacturing has become an appropriate process for manufacturing complex parts and repairing high-value-added components in recent years. However, the possibilities offered by this process go further and lately it has begun to be used for the combination of different materials. Additional manufacturing allows the material to be added in a localized manner, and it is therefore possible to deposit at the base of a particular material layers or circuits of a second material that offer special properties. In order to take a further step in this area, this study examines the capacity to control the resulting thermal field by localized deposition of copper on a Invar 36 substrate. To this end, an Invar 36 test part has been manufactured by additive manufacturing, and the model of finite elements has been validated with it. In a second step, using the same model, the cooling capacity of copper tracks in different forms has been assessed and the ability to control the thermal field on the surface of the piece has been guaranteed through double circuits, i.e. cooling and heating circuits. Thus, the capacity of additive manufacturing to produce multi-material structures has confirmed that the manufacture of parts with specific thermal properties and behavior is possible.

KEYWORDS: Additive manufacturing, digitization, thermal behavior, multimaterial structures, copper, Invar 36.

* **Harremanetan jartzeko/Corresponding author:** Jon Iñaki Arrizubieta Arrate, Bilboko Ingeniaritza Eskola – Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU), Plaza Torres Quevedo 1, 48013, Bilbo.  <https://orcid.org/0000-0002-6030-4941>, joninaki.arrizubieta@ehu.es

Nola aipatu/How to cite: Legorburu, June; Agirre, Xabier; Arrizubieta, JonIñaki; Iturrioz, Amaia; Aguilar, David; Escribano, Ruben; Lamikiz, Aitzol (2025). «Fabrikazio gehigarritz egindako material anitzeko egituren portaera termikoaren modelizazioa», *Ekaia*, 47, 2025, 357-372. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.26798>).

Jasoa: uztailak 17, 2024; Onartua: otsailak 17, 2025

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

1.1. Testuingurua

Fabrikazio gehigarria (ingelesez, *Additive manufacturing*) piezak materiala gehituz eta geruzaz geruza fabrikatzean datza. Termino horrek prozesu eta teknika desberdinak erabiliz materiala gehitzea ahalbidetzen duten teknologiak biltzen ditu bere baitan [1]. Teknologiaren garapen bizkorri esker, azken urteotan aurrerapen handia izaten ari den sektorea da, bai makinariaren aldetik, bai eta eskuragarri dauden materialen (plastikoak, metalak, konpositeak...) ikuspuntutik ere. Gaur egun, fabrikazio gehigarria aukera erakargarri eta iraultzaile gisa ikusten da industriako sektore askotan, eta bereziki, egituren pisuaren eta propietate mekanikoen arteko erlazioak garrantzia handia duten sektoreetan eta pieza bakar edo pertsonalizatuak behar direnetan, hala nola aeronautika, biomedikuntza eta automozioa.

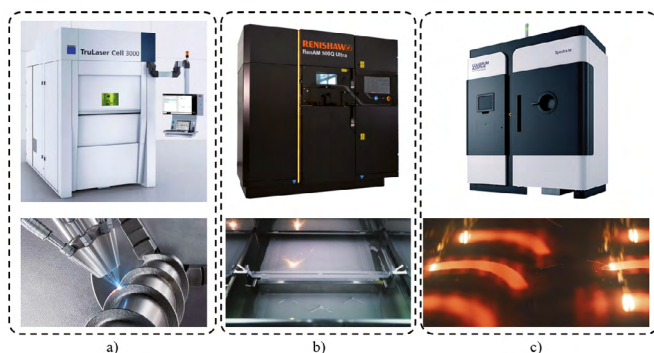
Materialaren gehitze-prozesurako CAD bidez diseinatu eta aplikazio espezifikoak erabiliz geruzetan zatikatu diren geometria digitalizatuak baliatzen dira. Prozedura horri esker, geometrien diseinuan askatasun handia lortzen da, eta kasu askotan inolako murrizketarik gabeko diseinuak ahalbidetzen ditu. Era berean, materiala urtu eta azken piezara iristeko energia altuko iturriak erabiltzen dira, eta horien ezaugarriak erabilitako material eta prozesuen menpekoak izaten dira. Asko dira teknologia mota honek eskaintzen dituen aukerak eta abantailak [2]:

- Azkartasuna CAD diseinutik fabrikaziorako prozesuan. Ez dira beharrezkoak beste fabrikazio-prozesu batzuetan ezinbestekoak diren tresneriak (moldeak, erremintak...), eta horrek fabrikazio-denborak izugarri murriztu ditzake ideiatik lehenengo prototiporako bidean.
- Errentagarritasun ekonomiko altua serie motzen eta pieza bakarren fabrikazioan.
- Produktuaren pertsonalizazio-aukera, beste fabrikazio prozesu batzuekin alderatuz: piezak neurrira egin daitezke horrek gainkosturik eragin gabe.
- Balio altuko piezen konponketa ahalbidetzen du, beharrezko lekuetan materiala gehituz eta pieza guztia berriz fabrikatzea ekidinez.

Teknologia mota horrek abantaila garbiak eskaintzen dituen arren, hasierako ikerketan eta materialetan inbertsioak oso altuak izan ohi dira (bereziki, fabrikazio gehigarri metalikoan), lor daitezkeen perdoiak mugatuak dira (0,1 mm-tik gora), eta lehengaien kostu altuak eta aukera murriztuak zailtzen jarri ohi dute prozesuaren benetako errentagarritasuna [3]. Hala ere, gaur egun, garapen teknologiko handia jasotzen ari den sektorea denez, aplikazioak geroz eta askotarikoagoak dira aipaturiko sektore konkretuetan [4].

Gaur egun, metalen fabrikazio gehigarriko gehien erabiltzen diren teknologien artean honako hiru hauek nabarmendu daitezke [5]:

- *Directed Energy Deposition (DED)*: potentzia altuko arku elektrikoa edo laserra erabiliz oinarri-materiala urtu eta material metalikoa hauts edo hari gisa gehitzean datza. Bero-iturri gisa laserra erabiltzen denean, askotan prozesu honi *Laser Metal Deposition* edo *Laser Cladding* gisa ere deitzen zaio. Aportaturiko materialak bero-iturriak sorturiko galda-bainua ukitzen duenean, oinarriarekin bateratu eta geruza solido bat sortzen da, geruzaz geruza beharrezko 3D geometria eratu arte (ikus 1. irudian a). Ohikoa izaten da aporte-materialarekin batera babes-gasa (normalean, argoia) erabiltzea, metalen fusioan gertatzen den oxidazioa ekiditeko eta fabrikaturiko piezaren kalitate metalurgikoa bermatzeko.
- *Selective Laser Melting (SLM)*: prozesu honen ezaugarri nagusia ganbera itxi batean gertatzen dela da (ikus 1. irudian b). Han, hautsa altuera txikiko geruza finetan kokatzen da, hauts-ohe izenez ezagutzen den egitura osatuz. Ostean, bigarren pauso batean, laser bat edo gehiago erabiliz ohean kokaturiko hautsa selektiboki urtzen da, beharrezko lekuetan material solidoa fusionatuz. Solidifikazio-ziklo azkar baten ostean, ohea jaitsi eta hauts-geruza berri bat jartzen da aurrekoaren gainean, eta prozesua errepikatu. Aurreko pausuan urtu gabe gelditu diren hauts-partikulek egituraren euskarri gisa funtzionatzen dute, geometria bereziki konplexuak sortzea ahalbidetuz. *DED* prozesua ez bezala, *SLM* teknologia pieza osoak fabrikatzeko erabiltzen da gehien bat.
- *Electron Beam Melting (EBM)*: aurreko prozesuaren antzera egiten da piezaren inprimaketa, baina kasu honetan, aldiz, materialaren fusiorako energia altuko elektroizpi bat erabiliz (ikus 1. irudian c). Horregatik, prozesu guztia huts-ganbera baten barruan burutzen da material urtuaren oxidazioa ekiditeko eta elektroizpien bideratzea ahalbidetzeko. Fabrikaturiko osagaiek *SLM*-ko piezek baino gainazal akabera eskasagoa duten arren, integritate metalurgiko oso altukoak dira.



1. irudia. Fabrikazio gehigarriko teknologien adibideak. A) Trumpf enpresaren TruLaser Cell 3000 DED makina [6], b) Resnishaw-ren RenAM 500Q Ultra SLM makina [7], c) Collibrium-en Spectra-M EBM makina [8].

1.2. Material eta egitura anitzeko piezen garrantzia

Fabrikazio gehigarriko prozesuetan oso interesgarria izan daitekeen aplikazioa pieza bakar batean material eta egitura mota anitzen uztartzea da. Kasu horietan, DED teknologiaren bidez material bat baino gehiagoz osaturiko piezak fabrikatu daitezke, hots, osagai *multimaterialak*. Aldiz, SLM-ren eta EBM-ren kasuan, egitura mota bat baino gehiagoz osatzen diren geometriak fabrikatu daitezke, hau da, egitura anitzeko piezak edo *multiegiturak*. Horrela, erabiltzailearentzako interesekoak diren konbinaketak erabiliz, aplikazio zehatz bakoitzerako propietate fisiko eta mekaniko optimoak lor daitezke: pisua, erresistentzia eta eroankortasun termiko eta elektrikoa, esaterako.

Era berean, konplexutasun handia duten materialak direnez eta haien portaera aurreikustea zailagoa denez, oso ohikoa da lan horretarako elementu finitu (EF) bidezko ereduak erabiltzea. Eredu horiek entsegu esperimentalek baino malgutasun handiagoa eta kostu baxuagoa eskaintzen dute, eta trukean, kalkuluetan eredutze-errore bat sartzen da.

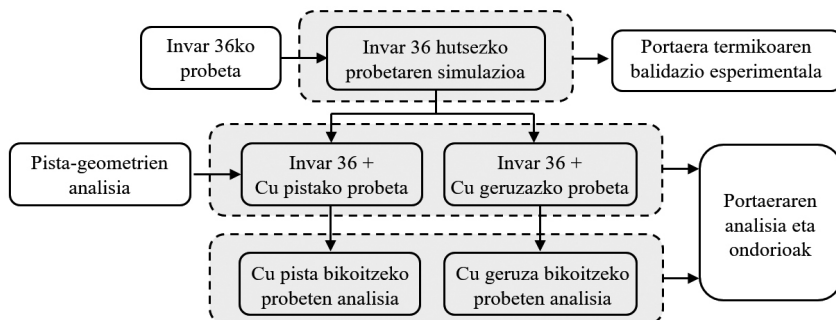
Gaur egungo bibliografian material mota berezi hauen inguruko informazio gutxi dago eskuragarri. Abiapuntu horretatik hasita, eta lehen hurbilpen gisa, ikerlan honetan, Invar 36 eta kobrez osaturiko pieza *multimaterial* baten analisi termikoa egin da, EF bidezko eredu termiko baliokidea garatu eta balioztatzeko. Ondoren, eredu termiko hau erabili da kobrezko pisten sekzio eta geometria desberdinak konparatzeko, eta azken helburu gisa piezaren portaeran gradiente termiko asimetrikoak lortzeko.

2. METODOLOGIA

Atal honetan material anitzeko osagaien fabrikaziorako eta EF-tako ereduaren balioztapenerako erabilitako metodologia deskribatzen da (ikus 2. irudia). Material anitzeko egituren analisisa elementu finituen simulazioan oinarritzen den arren, lehenik eta behin Invar 36ko probeta bat fabrikatu da fabrikazio gehigarri bidez, eta haren portaera esperimentalki analizatu da. Horrela, EF-tako ereduak doitu ahal izan da, eta hurrengo pausuetako emaitzak balioetsi dira.

Baliozkoturiko ereduaren bidez material anitzeko piezen portaera aztertuta, eta horrela probeta horiek esperimentalki fabrikatzearen eta probatzearen gaitasuna aurreztu. Lehenik eta behin, kobrezko pista soil bat gehitzen den kasua eta gero probetaren gainazal guztia kobrezko geruza batez estaltzen denekoa. Bi kasu horietan lortzen diren piezaren portaerak Invar 36 hutseko piezaren jokoarekin alderatu dira. Gainera, kobrezko pistaren geometriak beroaren transmisioan izan dezakeen eragina ikertzeko helburuarekin aurretiaz pista-geometrien analisisa egin da, eta horrela, pis-

taren geometria egokiena aukeratu ahal izan da. Azkenik, kobrezko bi pista edo bi geruza erabiltzean lor daitekeen eremu termikoaren gaineko kontrola aztertu da, eta ikerlanaren ondorio orokorrak atera dira.



2. irudia. Ikerkuntzan zehar jarraitutako metodologiaren laburpena.

3. MATERIALAK ETA EKIPAMENDUA

3.1. Invar36 eta Kobrearen propietateak

Lan honetan erabili diren materialak Invar 36 eta kobre purua dira. Invar 36a %36 Nikelez osaturiko burdinazko aleazio bat da. Material hori egonkortasun termiko handia eskatzen duten aplikaziotan erabiltzen da, beroarekiko duen dilatazio-koefiziente baxuagatik. Karbono-aleazioen dilatazio-koefizientearekin alderatuz gero, Invar 36-arena hamar aldiz baxuagoa da.

1. taula. Ivar36 eta kobrezko hariaren konposizio kimikoa, %pisuan.

Materiala	Si	Mn	P	Cr	Ni	Mo	Cu	Ti	V	Co	Nb	C	Fe
<i>Invar 36 haria</i>	0.044	0.45	<0.01	<0.1	36.2	<0.09	<0.08	0.53	<0.05	<0.1	1.39	—	Oreka
	S	Mn	P	Ag	Ni	O	Cu	Al	Pb	Hg	Sb	C	Fe
<i>Kobrezko haria</i>	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	Oreka	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01

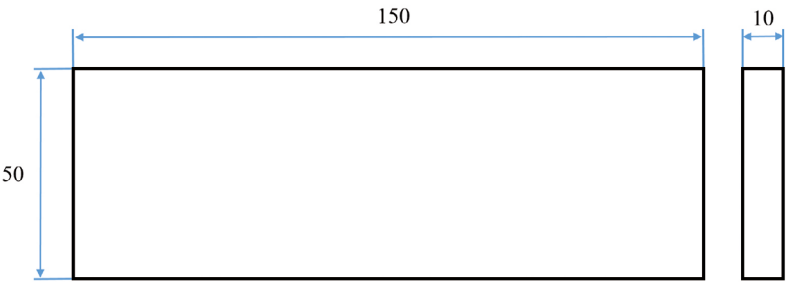
Bestalde, material anitzeko elementuak fabrikatzeko eta Invar 36-ko oi-narrian diseinaturiko pistak osatzeko kobre purua erabili da. Kobrea industrian eroankortasun termiko handia eskatzen duten aplikazioetan zein beroa azkar transmititzea komeni den aplikazioetan erabiltzen da, bai eta korrosioarekiko erresistentzia altua bilatzen denean ere. Bi material horien propietateak 2. taulan jaso dira [9]. Ikus daitekeen bezala, Invar 36ak kobreak baino askoz eroankortasun termiko baxuagoa dauka.

2. taula. Invar 36 eta kobrearen propietateak: dentsitatea (ρ), eroankortasun termikoa (κ) eta bero espezifikoa (c_p).

Materiala	ρ (kg/m ³)	κ (W/m·K)	c_p (J/kg·K)
Invar 36	8.110	11,9	515
Cu	8.960	398,0	385

3.2. Ikerketarako fabrikaturiko probetak

Invar 36aren portaera zein propietateak esperimentalki analizatzeko erabili den probeta (ikus 3. irudia) arku bidezko DED (*Directed Energy Deposition*) teknologia erabiliz fabrikatutako Invar 36ko plaka da. Probetaren tamaina finkatzerakoan DED fabrikazioan zehar bero-metaketak saihesteko nahikoa handia izan behar da, baina, aldi berean, haren EF bidezko simulaziorako ordenagailu-kostu handiegia ez izateko mugatu beharra dago. Horregatik, 150×50×10 mm³-ko tamainako probeta aukeratu da.

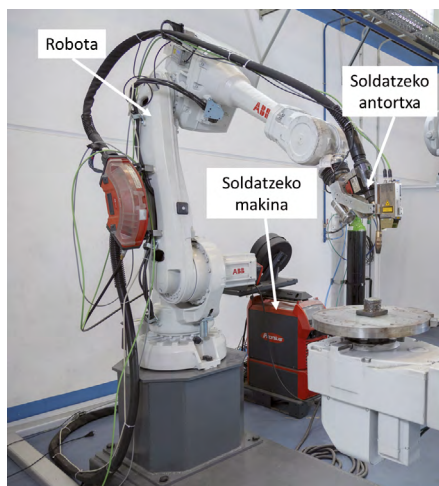


3. irudia. Entsegu esperimentalean erabilitako probeta.

Invar hutsezko saiakuntzetarako probeta hau bere horretan erabili da. Aldiz, kobrea gehitu eta probeta bimaterialak eratzeko, lehenik eta behin fresaketa bitartez kobrea gehituko den guneeetan Invarra harrotu beharko litzateke, eta gero bigarren pauso batean kobre-materiala gehitu.

3.3. Probetaren fabrikaziorako erabilitako makina

Invar 36 aleazioko probetak Fronius etxeko TPS 400i CMT potentzia-iturriarekin eta Robacta drive CMT WF60i antortxarekin fabrikatu dira. Antortxa 6 ardatzeko ABB IRB 4600-45/2.05 robotaren besoan atxikia dago, 2 ardatzeko mahai biratzaile batekin batera. Ar (%98) eta CO₂ (%2) nahasketa bat erabili da babes-gas gisa. Gas-fluxua 17 l/min-koa izan da. Muntaia eta ekipamendua 4. irudian ikus daitezke. Soldadura-parametroak, aldiz, 3. taulan daude.

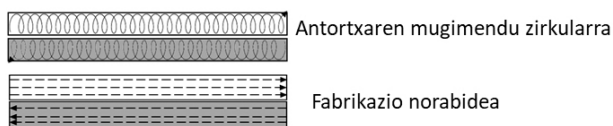


4. irudia. Probeten fabrikaziorako muntaia esperimental.

3. taula. Invar36-ko probetak fabrikatzeko parametroak.

<i>Korrontea (A)</i>	Hariaren abiadura (m/min)	Tentsioa (V)	Aitzinamendu- abiadura (cm/ min)	Arku luzera (mm)	Geruza arteko denbora (s)
157	5.8	13	48	10	90

Kasu honetan, hiru kordoi gainjarriren fabrikazio-estrategia erabili da, antortxaren mugimendu zirkularrarekin batera (ikus 5. irudia). Kasu hone-tan, lehenengo erdiko soldadura-kordioa egiten da, eta ondoren kanpoal-deko biak, antortxaren 20°-ko inklinazioarekin eta erdiko kordioarekin %50eko gainjartzearekin. Mugimendu zirkularrari dagokionez, 2 mm-ko anplitudea eta 2 Hz-tako frekuentzia erabili dira.



5. irudia. Invar36-ko probetak fabrikatzeko erabilitako estrategia.

Parametro hauek aldez aurretik optimizatu ziren saiakuntza eksperimen-talen bidez, kontuan hartuta hormaren hazkundearen egonkortasuna, gaina-zalaren akabera, egonkortasun dimentsionala eta jalkitze-tasa altuak.

4. SAIKUNTZA MONOMATERIALAK

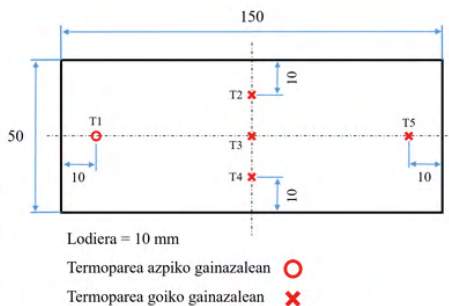
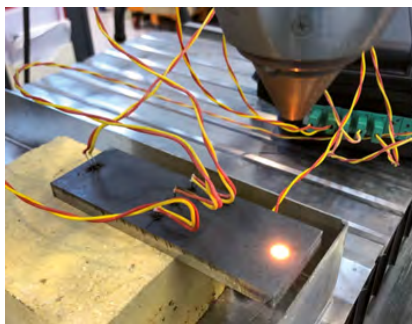
4.1. Invar 36 materialaren portaera termikoaren karakterizazio esperimentalak

Atal honetan EF-tako ereduak balioztatzeko egindako saiakuntzak deskribatzen dira. Hasteko, Invar 36 hutsez egindako plakak laser bidezko irradiazioaren eraginpean duen portaera aztertu da. Pausu hori ezinbestekoa da saiakuntza bimaterialetan erabiliko diren eredu termikoetako ingurune-baldintzak definitu eta balioztatzeko. Plaka laser bidez erradiatu da, 300 W-ko potentziarekin eta Ø6 mm-ko foku-puntu batean. Invarrezko plaka adreilu erregogor baten gainean finkatu da 90 mm-ko luzeran (isolatzaile perfektua), eta gainerako 60 mm-ak airean gelditu dira (ikus 6. irudia).

Hasierako giro-tenperatura 20°C izanik, honako beroketa-hozketa ziklo termiko hau aplikatu zaio plakari. 6. irudian azaltzen diren K motako 5 termopareen bitartez (T1-T5), tenperaturaren aldakortasuna neurtu da saiakuntza guztian zehar:

- 30 segundo hutsean, laserra itzalita.
- 2.400 segundo laserra piztuta, pieza berotzeko.
- 10.000 segundoko hozte motela.

Beroketa- eta hozketa-prozesuetako iraupenak T2, T3 eta T4 termopareen neurketa egonkortzeko gutxieneko denboratzat finkatu ziren.



6. irudia. Invar 36 puruzko plakaren portaera termikoaren entsegu esperimentalak.

4.2. EF bidezko ereduaren balioztatzea

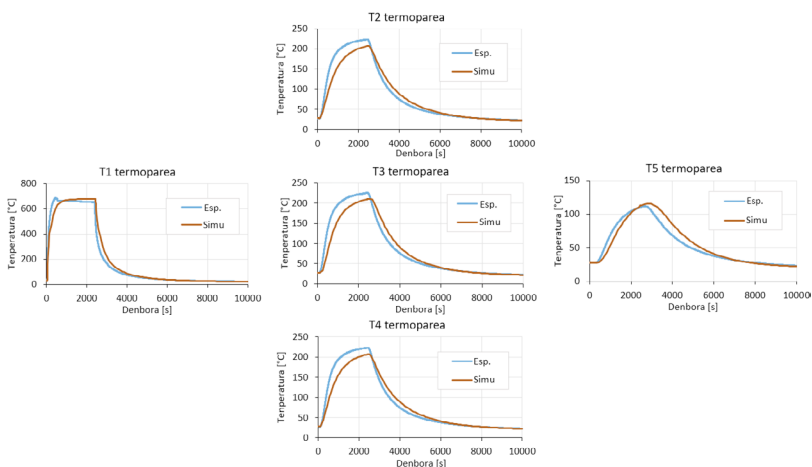
Aipaturiko 5 termopareek jasotako tenperaturak 7. irudian erakusten dira. Eredu eta portaera esperimentalaren arteko doikuntzarako laserraren xurgapen- eta konbekzio-koefizienteak egokitu behar izan dira, hasiera batean datu horiek ezezagunak baitziren.

Ereduko laserraren xurgapen- eta igorpen-balioak definitzeko, bere portaera entsegu esperimentalen berotze-fasearen berdina izatea bilatu da, eta era berean, konbekzio bidezko bero-galerak hozte-kurbak erabiliz kalkulatu dira, nahiz eta jakina den propietate horiek (xurgapen-, igorpen- eta konbekzio-koefizienteek) ziklo termikoaren 3 faseetan eragiten dutela. Haien balioak iteratiboki zenbatetsi dira, eta honako balio optimoak lortu dira:

- Xurgapen-koefizientea: 60%
- Konbekzio-koefizientea: 6-17 W/m²
- Igorpen-koefizientea: 0,6-1

Behin hiru propietate horiek definituta, Invar 36zko plakaren EF bidezko azterketa burutu da, eta, 7. irudian ikus daitekeen bezala, entsegu esperimentaletara hurbilpen handia lortu da, ziklo termikoaren 3 faseetan eta neurketarako erabilitako 5 termopareetan

7. irudian erakusten diren saiakuntza esperimentalen eta simulazioko emaitzen artean desberdintasun gutxi batzuk aurkitu dira, bereziki beroketa-fasean. Horien jatorria bikoitza da. Alde batetik, materialen propietateak temperaturarekiko independenteak direla jo da. Beste alde batetik, simulazio termikoetan ez da kontuan hartu materialaren fusioa. Erabilitako 5 termopareen neurketa-guneetan ez da gaingitu urtze-tenperatura, baina laserrak irradiatzen duen gunean bai gaingitu da, eta horrek materialaren beroketa esperimentala bizkortu dezake. Efektu hori kontuan hartzeko, beste egile batzuek materialaren propietate termikoak haztatu izan dituzte, baina horrek dakarren ziurgabetasuna kontuan izanda, eta kasu honetan zenbakizko errorea nahiko txikia dela ikusita, emaitzak ontzat hartu dira.



7. irudia. Saiakuntza esperimentaletako emaitzak (Esp.) eta EF bidezko azterketaren (Simu) arteko alderaketa aztertutako 5 puntuetan.

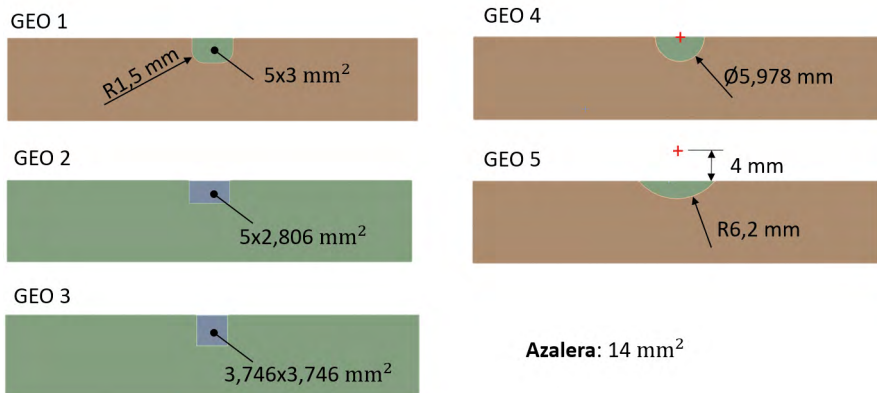
5. ENTSEGU BIMATERIALAK ELEMENTU FINITU BIDEZ

5.1. Pista-sekzioen konparaketa-entseguak

Kobreko pisten diseinu on bat bermatzeko helburuarekin, lehenik eta behin pista-sekzioen formaren eragina aztertu da EF bidezko analisi bidez. Proposatutako geometria guztietan sekzioaren azalera konstante mantendu da (14 mm^2 , hori baita ikerlan honetan erabilitako DED makinak gehitu dezakeen kobreko pistaren batez besteko sekzioaren azalera), eta honako aldaera hauek hartu dira kontuan:

- GEO1: erpinak biribilduta dituen sekzio laukizuzena.
- GEO2: erpin bizidun sekzio laukizuzena.
- GEO3: erpin bizidun sekzio karratua.
- GEO4: zirkulu erdi formako sekzioa.
- GEO5: sekzio zirkularreko sekzioa.

Kasu guztietan kobreko pistak Invar 36-ko luzetarako norabidean diseinatu dira, hau da, 150 mm -ko luzera dute, eta sekzio desberdinen forma azpiko 8. irudian ikus daiteke:

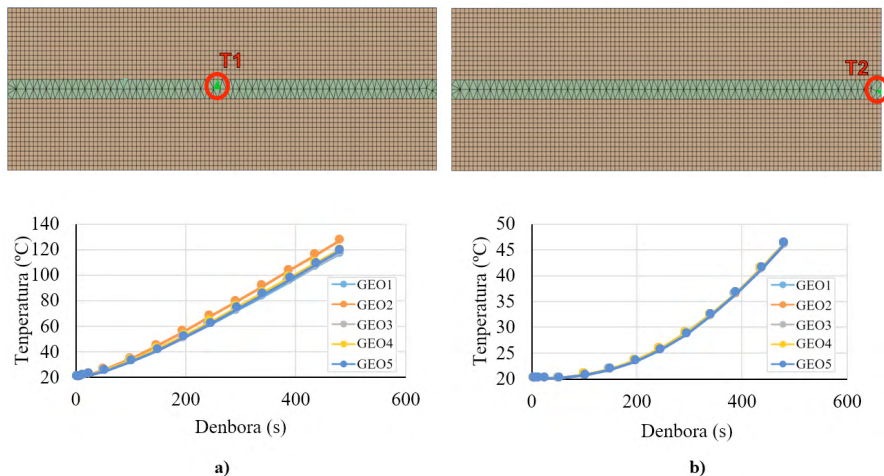


8. irudia. Kobreko pisten sekzio ezberdinak.

Simulazio termikoan kobreko pistaren ezkerreko aurpegian 90 W -ko bero-iturria aplikatu da, piezaren oinarria perfektuki isolatuta dagoela onartzen da, eta gainerako aurpegiek $10 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$ -ko konbektzio-koefizientea dute ingurunera. Azkenik, aipatu beharra dago hasierako eta inguruneko temperaturak biak berdinak direla $20 \text{ }^\circ\text{C}$ -koak.

9. irudian erakutsitako emaitzetan argi ikus daitekeenez, kobreko pisten geometria desberdinek aurkeztzen duten portaera termikoan ia ez dago

desberdintasunik. Beraz, GEO1 geometria aukeratu da haren fabrikatzeko erraztasunagatik: izan ere, 5 mm-ko erradiodun fresa toroidal batekin mekaniza daiteke.



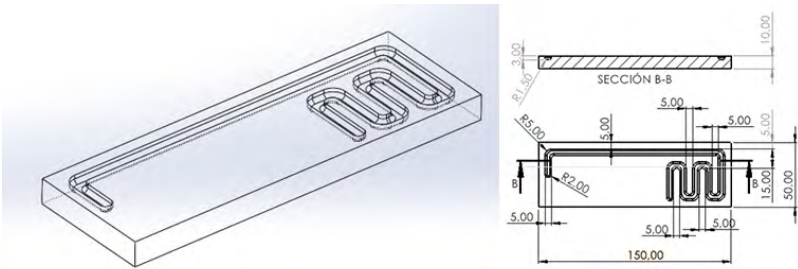
9. irudia. Kobrezko pisten analisiko emaitzak a) T1 eta b) T2 puntuetan.

5.2. Pista bakarreko entseguak

Materialak eta ekipamenduko ataleko 2. taulan erakutsi den bezala, Invar 36 aleazio metalikoa izan arren, ez da bero-eroale ona. Hortaz, beroa laserraren erradiazio-fokua dagoen ingurunean metatzen da batik bat. Piezaren gradiente termikoa kontrolatu eta beroa erradiazio-fokutik aldentu eta ingurune hotzerantz bideratzeko, plakan material eroale bat (kasurako, kobrea) txerta daiteke. Gehituriko materialaren geometriaren eragina aztertzeke, bi kasu desberdin planteatu dira, eta biak Invar 36 hutsezko kasuarekin alderatu dira.

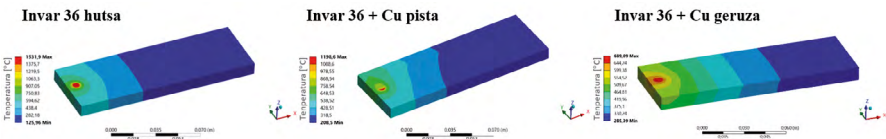
Lehen kasuan, aurreko atalean ondorioztaturiko pisten geometria erabiliz (GEO1) Invar 36zko blokeari pisten artekak mekanizatu zaizkio, eta, azkenik, fabrikazio gehigarri bidez kobrez bete dira. Azpian ikusten den diseinua baliatu da (10. irudia) beroa foku berotik hotzera bideratzeko. Bigarrenetan, teknologia bera erabiliz Invar 36zko plaka osorik estali da kobrezko 1 mm-ko geruza batekin.

Esan bezala, aurkezturiko bi kasuen simulazioak Invar 36 puruzko kasuekin alderatuz atera daitezkeen ondorioak garbiak dira. Batetik, kobrez estalitako gainazaldun piezan tenperatura-banaketa homogeenagoa lortzen da, kobreakin eroankortasun termiko ona dela eta. Hortaz, tenperatura maximoak laserraren irradiazio-gune inguruan baxuagoak dira.

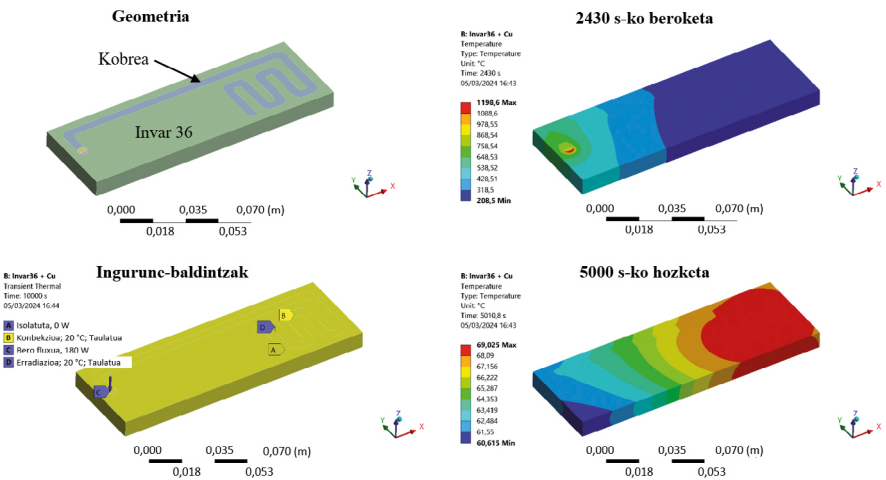


10. irudia. Material anitzeko entseguetan erabili den probeta.

Bestalde, 11. irudian ikus daitekeen bezala, kobrezko pistadun piezaren kasuan gradiente termikoan asimetria txiki bat lortzen dela ikus daiteke. T2 eta T4 termopareen artean 50 gradu arteko diferentzia lortzen da. Hala ere, ez da T5-eko tenperatura T3-a baino altuagoa izaterik lortu (entseguaren hasierako helburua hori izanik).

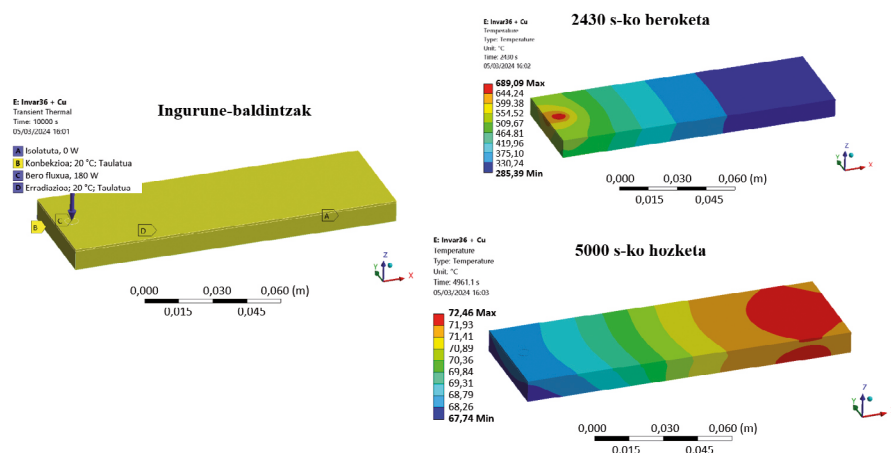


11. irudia. Aztertutako hiru kasuen alderaketa.



12. irudia. Invar 36zko plaka eta kobrezko serpentindun probetaren simulazioa.

Hozketa-faseari dagokionez, kobrezko serpentina dagoen gunean tenperatura-jaitsiera mantsoagoa dela ikus daiteke (ikus 12. irudia). Hala ere, Invarrezko plaka adreilu erregogor baten gainean kokatuta egoteak efektu bera sor dezakeenez, gainerako ingurune-baldintzak mantenduz, gainazal osoa kobrez estalia duen piezaren simulazioa erabili da horrek sorturiko ziurgabetasuna baztertzeko. Bigarren simulazioko hozketa-fasean efektu bera gertatzen denez (ikus 13. irudia), foku hotzaren tenperatura-jaitsiera mantsoagoak piezaren kobrezko serpentina izatearekin zerikusirik ez duela ondoriozta daiteke.

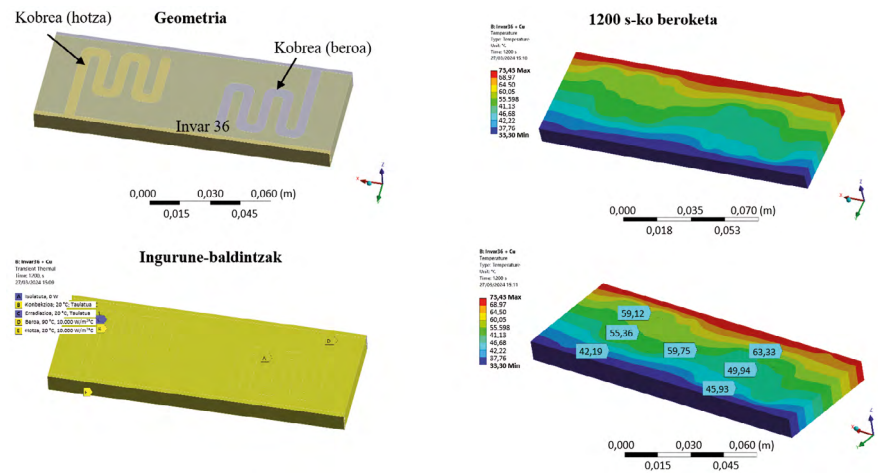


13. irudia. Invar 36zko plaka kobrezko 1 mm-ko kobrezko gainazal batekin estalitako probetaren simulazioa.

5.3. Pista bikoitzeko entseguak

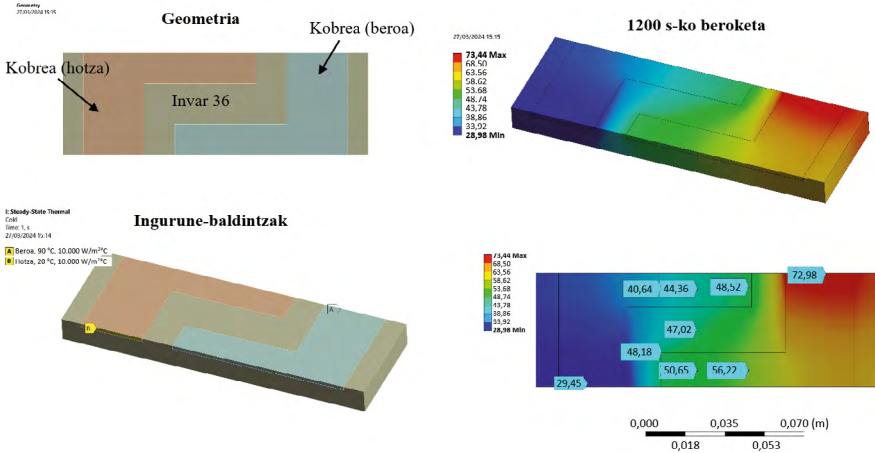
Piezaren foku hotzaren eta beroaren arteko gradiente asimetrikoa handitzeko helburuarekin, pista bikoitzeko geruzen diseinuak proposatu dira. Kobrezko pista bakarra erabili beharrean, 14. irudian erakusten den bezala, piezaren alde banatan bi pista jarri dira, bat beroa sartzeko eta bestea beroa ateratzeko (hozketa-puntu bezala). Bi kasuetan foku beroko serpentina-gainazala 90°C-ra dagoen likido batekin kontaktuan modelizatu da, eta hotzaren kasuan, 20°C-ra. Bi kasuetan 1000 W/m²K-eko konbektzio-koefizientea ezarri da gainazal horietan.

Aurreko zatiko analisi bera burutu da, eta, ondorengo irudietan ikusi daitekeenez, emaitzetan ageri den gradiente termikoa aurreko kasuan baino asimetrikoagoa da, hau da, denboran iraunkorrak diren gune hotz bat eta gune bero bat lortu dira. Hala ere, asimetria lortzearen arrazoi nagusia ez da pistek eroaten duten beroa, baizik plakaren puntu bakoitzak foku hotzarrikiko eta beroarekiko duten gertutasuna.



14. irudia. Invar 36zko plaka eta kobrezko serpentin bikoiztun probetaren simulazioa.

Azken diseinuan, ikus 15. irudia, serpentin formako pistak ezabatu eta, horien ordez, «L» formako kobrezko gainazalak sortu dira piezan, 1 mm-ko lodierakoak, bero sarrera/irteera forma horien alde motzenetik egiten delarik. Foku bero eta hotzaren tenperaturak aurreko berdinak direla kontsideratuz, 90°C eta 20°C hurrenez hurren, serpentindun simulazioan baino gradiente termiko asimetriko garbiagoa lortzen da. Gainera, eremu termikoa alderantzikaturata dago, foku berotik gertuago dauden puntu batzuk urrun daudenak baino hotzago daude, eta alderantziz.



15. irudia. Invar 36zko plaka eta kobrezko pista bikoiztun probetaren simulazioa.

6. ONDORIOAK

Artikulu honetan material anitzeko egituren analisirako EF bidezko eredu termiko bat aurkeztu, garatu eta baliozkotu da. Eredu horren bitartez, fabrikazio gehigarritz egindako material anitzeko egituretan eremu termikoa eraldatzea posible dela frogatu da, aplikazioaren beharren arabera, piezan foku hotz eta beroak sortzeko. Laburbilduz, honako hauek dira ondo-ondortatu diren emaitzarik garrantzitsuenak:

- EF bidez fabrikazio gehigarri bidez fabrikaturiko Invar 36ko pieza baten portaera zehaztasunez simulatu da beroketa eta hozketako zikloan piezako puntu desberdinetan.
- Material anitzeko piezetan, propietate termikoak bete beharreko funtzioaren arabera egokitu daitezke. Kobrezko 1 mm-ko geruzaren bitartez piezan zeharreko bero-banaketa homogeneoa lortzen da, eta puntu beroak minimizatzen dira. Zigi-zaga motako pistarekin, aldiz, eremu termikoa alderantzikatzea lortu ez bada ere, eremu termiko asimetrikoak bai eskuratu dira.
- Kobrezko pista bikoitzari eskerrak eremu termikoa alderantzikatzea posible dela baieztatu da. Ezaugarri hau oso garrantzitsua da injekzio-ko moldeetan eta antzeko aplikazioetan, zeren eta moldean injektatzen den plastikoaren tenperatura kontrolatzea oso garrantzitsua baita bukaerako piezaren kalitatea bermatzeko. Hortaz, pista anizkoitzeko osagaiak fabrikazio gehigarri bidez eskuratzeak honelako kasuetan osagaiaren portaera termikoa hobetzea espero da.

7. ESKER ONAK

Egileek eskerrak eman nahi dizkiote Eusko Jaurlaritzari Elkartek KK-2023/00096 (ReIMAGIN) proiektuaren finantzaketagatik.

8. BIBLIOGRAFIA

- [1] ISO/ASTM 52920:2023. «Additive manufacturing —Qualification principles— Requirements for industrial additive manufacturing processes and production sites».
- [2] ATTARAN, M. 2017. «The rise of 3-D printing: The advantages of additive manufacturing over traditional manufacturing». *Business Horizons*. **60** (5), 677-688.
- [3] TOFAIL, S., KOUMOULOS, E., BANDYOPADHYAY, A., BOSE, S., O'DONOGHUE, L. eta CHARITIDIS, C. 2018. «Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities». *Materials today*, **21** (1), 22-37.
- [4] GIBSON, I., ROSEN, D., STUCKER, B. eta KHORASANI, M. 2021. «Additive Manufacturing Technologies». *Springer Cham*, 3. edizioa. ISBN: 978-3-030-56126-0.

- [5] Ji, W., ZHOU, R., VIVEGANANTHAN, P., WU, M.S., GAO, H. eta ZHOU, K. 2023. «Recent progress in gradient-structured metals and alloys». *Progress in Materials Science*, **140**, 101194.
- [6] TRUMPF. «TruLaser Cell 3000». Azken sarbidea: 2025ko otsailaren 14an. https://www.trumpf.com/es_ES/productos/maquinas-y-sistemas/sistema-de-soldadura-laser-y-celda-de-soldadura-por-arco/trulaser-cell-3000/.
- [7] RENISHAW. «Sistemas de fabricación aditiva metálica (impresión 3D) RenAM 500». Azken sarbidea: 2025ko otsailaren 14an. <https://www.renishaw.com/es/sistemas-de-fabricacion-aditiva-metalica-impresion-3d-renam-500--37011>
- [8] Colibrium additive, a ge aerospace company. «Spectra H». Azken sarbidea: 2025ko otsailaren 14an. <https://www.colibriumadditive.com/printers/eb-pbf-printers/spectra-h>
- [9] ERDEN, F., AKGUL, B., DANACI, I. eta ONER, M.R. 2023, «Thermoelectric and thermomechanical properties of invar 36: Comparison with common thermoelectric materials». *Journal of Alloys and Compounds*, **932**, 167690.