

Laser-testurizazio prozesurako eredu matematikoa

(A mathematical model for the laser texturing process)

Oihane Murua*, Jon Iñaki Arrizubieta, Marta Ostolaza, Aitzol Lamikiz, Eneko Ukar

Mekanika Saila, Bilboko Ingeniaritza Eskola (UPV/EHU)

LABURPENA: Proiektu honetan laser-testurizazio prozesuaren zenbakizko ereduak garatu da. Horretarako, lehendabizi laser-testurizazio prozesuaren informazioa bildu da, ondorengo programazioan errealitatearen hurbilpen egokia simulatu ahal izateko. Aurrez aipatutako fabrikazio-prozesu honen jakintza eskuratu ostean, ekingiza berbera irudikatzen duen eredu matematikoa sortzeko beharrezkoa ikusi da. Horrela, lanaren metodologia hiru pausotan antolatuta da: lehenik, laser-testurizazio prozesu baten eredu hurbildu bat sortu da; ondoren, prozesu errealearen saiakuntza esperimentalak egin dira; eta azkenik, lortutako emaitzen arteko alderaketaren bitartez ereduak balioztatu da. Ereduaren garapena Matlab-eko PDE moduluz baliatuz egin da eta pieza bateko gainazaleko puntu zehatzen lurruntzea simulatzeko gaitasuna dauka. Simulatutako ereduaren sortzen diren kraterrak, nanosegundoko pultsuak igortzen dituen laser baten bitartez erreproduzitzeko saiakuntzak egin dira. Laser-testurizazioa simulatzen duen ereduak egiaztatuta ahal izateko, simulazioetatik lortutako emaitzak saiakuntza esperimentaletan lortutakoekin alderatu dira eta emaitzen artean korrelazio oso ona lortu da: kraterraren diametroan eta sakoneran 5 eta 0,5 mikretako erroreak lortuz, hurrenez hurren. Horrela, garatu den eredu matematikoa eta jarraitutako prozedura balioztatuta gelditu dira.

HITZ GAKOAK: laser-testurizazioa, eredu matematikoa, Matlab, Stellite 6, kraterra.

ABSTRACT: *The aim of this project is the development of a mathematical model, which represents the laser texturing process. To that end, firstly, information on the fundamentals of the laser texturing process is gathered. After the analysis of the state-of-the-art of laser texturing processes, the development of a mathematical model representing the phenomena that takes place in the laser texturing process is carried out. Therefore, the methodology followed for such task consists on 3 steps: creating an approximate model, performing experimental testing of the process, and conducting the validation of the model based on the experimental results obtained. The development of the model is based on the PDE module of Matlab and aims to simulate the vaporization phenomenon in localized areas of the surface. The craters created by the model are later reproduced in experimental tests, by employing a laser, which emits nanosecond pulses. For the purpose of validating the laser texturing model, the results obtained in the simulations and the experimental data are compared and a good correlation is obtained: errors below 5 and 0.5 microns regarding the diameter and the depth of the crater, respectively. Consequently, the mathematical model and the followed procedure are validated.*

KEYWORDS: laser texturing, mathematical model, Matlab, Stellite 6, crater.

* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Oihane Murua. Ingeniaritza Mekanikoko Saila, Plaza Torres Quevedo, 1 (48013 Bilbao, Bizkaia, Euskal Herria). – omurua005@ikasle.ehu.eus – <https://orcid.org/0000-0002-2058-3042>

Nola aipatu / How to cite: Murua, Oihane; Arrizubieta, Jon Iñaki; Ostolaza, Marta; Lamikiz, Aitzol; Ukar, Eneko (2022). «Laser-testurizazio prozesurako eredu matematikoa». *Ekaia*, 42, 2022, 301-316. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.22926>).

Jasotze-data: 2021, ekainak 21; Onartze-data: 2021, urriak 21.

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2022 UPV/EHU



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

1. SARRERA

Laser bidezko testurizazio-prozesua, ingelesetik datorren *Laser Surface Texturing* (LST), patroi zehatz bat sortzeko asmoz gainazaleko materiala egituratzean oinarritzen da. Fabrikazio-prozesu honen eginkizuna aurpegi baten testura edo gainazal-egituraketa zehatza lortzea da, oro har, pultsuakako laser batez baliatuz. *Laser-testurizazio prozesurako eredu matematikoa* Matlab software komertziala erabiliz garatu, eta jarraian, eredu hori esperimentalki balioztatu da.

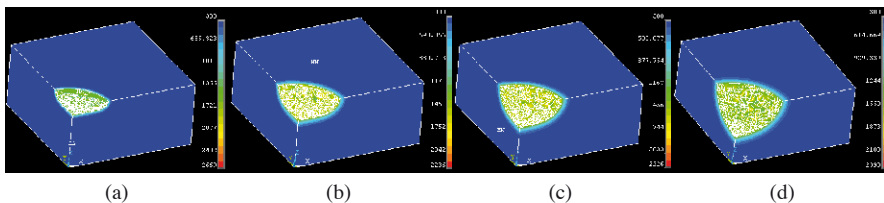
Industria mailan laser-testurizazioaren lehen pausoak 90eko hamarkadaren erditik aurrera agertu ziren. Eta orduz geroztik, Israelgo Technion Institutu Teknologikoaren [1] aitzindaritzapean etengabeko garapenean dagoen fabrikazio-prozesua da. Gaur egun arte egindako ikerketen artean, laser mota desberdinekin egindako testurak aztertzea, testurizazio-prozesu esperimentalaren azterketa, egituratutako gainazalen portaera modelizatzea eta laser-testurizazio prozesua bera modelizatzea aurkitzen dira [2]. Alabaina, laser-testurizazioaren teknologiak oraindik ez du lortu heldutasun nahikoa eta bere erabilera oraindik ez dago oso zabaldua industria mailako zenbait sektoretan dituen kostu altu eta produktibitate baxuarengatik.

Orokorrean, LST prozesuaren ereduaren diseinu optimoa sortzeak ebaluazio-denbora eta konputazio-kostu altua daukate [3]. Bestalde, ereduaren garapenerako kostu altuak inbertsio bat dira, eta edozein proba esperimentalen aurretiko pauso garrantzitsuenetako bat bihurtu dira.

Fabrikazio-prozesuen modelizazioak dakartzan onurei dagokienez, prozesuko parametro egokiak lortzeko historikoki jarraitzen den proba-hutsegite metodoaren iterazio kopurua arintzea nabarmentzen da. Laser-testurizazio prozesuaren modelizazioaren inguruko ikerkuntzen harira, bi ikerlerro nagusi bereiz daitezke: alde batetik, testura jakin baten portaeraren azterketa helburu dutenak; eta bestetik, laser-egituraketa prozesua bera simulatzen dutenak.

Kasu honetan laser-testurizazio prozesua modelizatu denez, jarraian azaldutako ikerketak dira aurrekari garrantzitsuenak. Hasteko, laser-egituraketa prozesuaren lehen simulazio-ikerketa 2008an argitaratu zen *Numerical Simulation of Laser Surface Micro-Texturing* izenpean [4]. Ikerketa horren garapenean, ANSYS softwarea erabili zen eta elementu finituen (FEM) bidez Newton-Rapson metodoa aplikatu zuten testuraren krater eta tenperatura eremuaren analisia egiteko. Urteak aurrera joan ahala, gero eta argiago ikusten da ikerketa horri egin dakizkioken hobekuntzak. Esaterako, laserraren pultsuak gainazalean indar bat izango balira bezala sartzen zituzten, eta hortaz, ezin daiteke aurreikusi laser baten pultsuek gainazalean sartzen duten beroa, eta indarrek gainazalean sortzen duten eragina besterik ezin da aztertu. Gainera, plasmagatikozuzenketa erabiltzen zuten kraterra-

ren sakonera lortzeko, hots, temperatura batetik aurrera laserraren eragina nuluzat hartzen zuten. Beste alde batetik, laserraren intentsitate eta pultsu kopuru desberdinentzat simulazio anitz egin zituzten (1. irudia). Hala ere, lortzen zituzten krater sakonera ez ziren esperimentalki konprobatu, beraz, ez dago jakiterik simulazioetan erabilitako hurbilpenak egokiak ziren.

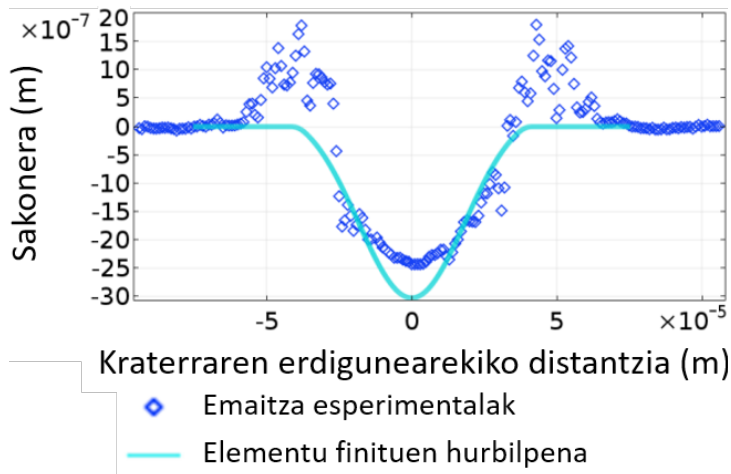


1. irudia. *Numerical Simulation of Laser Surface Micro-Texturing* ikerketako emaitzak, lortutako kratera pultsu kantitate desberdinekin [4, 3]: (a) pultsu bat; (b) 3 pultsu; (c) 5 pultsu; (d) 20 pultsu.

2018an Jieyu Xian ikertzaileak eta bere taldeak laser-testurizazio prozesuan bertan lortzen diren emaitzen hurbilpenak egiteko eredu garatu zuten [5]. Ikerkuntza horretan egituraketa-prozesuan deuseztatuko den materialaren sakonera eta azalera iragartzeko eredu sortu zuten. Orokorrean, lan horren bitartez, geruza anitzeko neurona-sare bat entrenatu eta iragarpen algoritmo bat sortu zuten. Aipagarria da lortutako emaitza simulatuak eta esperimentalak nahiko onak zirela, baina eredu horren izaera guztiz bestelakoa da. Izan ere, azken finean neurona-sarea entrenatzeko prozesua oso luzea izaten da, saiakuntza esperimental askorekin, eta hau eragozpena da azkartasuna bilatzen denean.

Azken urteetan laser-egituraketa prozesuaren zenbait eredu garatu dira, eta horietatik jarraian azalduko diren biak COMSOL Multiphysics software komertzialaz baliatuz egin dira. Ikerketa hauetako lehenengoan [6], testuraren sorrera simulatzen da, baina aurkezturiko lanak hainbat gabezia erakusten ditu. Adibidez, ikerketa horretan eredu balioztatze laserraren parametro jakin batzuk erabiltzen dira bakarrik. Gainera, hasierako gainazalaren ezaugarriak ez zaie garrantzirik ematen, eta horrek zerikusia dauka mikrometro eskalan lan egiten denean. Horrez gain, ondorioetan aipatzen da ablazio-eredua bera bakarrik ez zela gai krateraren itxura hurbildua lortzeko (2. irudia). Hori dela eta, material itsatsiaren portaera egoki hurbiltzeko jaria eredu bat gehitu behar zela ondorioztatu zuten. COMSOL Multiphysics softwarekin garatutako bigarren ikerketan, femtosegundo mailako pulsu bidezko laser-testurizazio eredu garatzen da [7]. Aurreko artikulua software bera erabili arren, kasu horretan pulsu ultramolteko laser baten egituraketa-prozesuko fenomeno fisikoen eredu lortzea zen helburu. Horretarako, bi tenperaturako eredu sortu zuten, hots, femtosegundotako pulsuak modeloa ez desegonkortzeko laserraren beroa bi eta

patan sartzan zuten. Tenperatura bi etapatan banatzea ideia ona izan daitekeen arren, honen egiaztatze esperimentalik ez dagoenez, ezin daiteke esan lortutako simulazioen emaitzak zentzuzkoak direla.



2. irudia. Ablazio-ereduaren eta emaitza esperimentalen konparaketa [6].

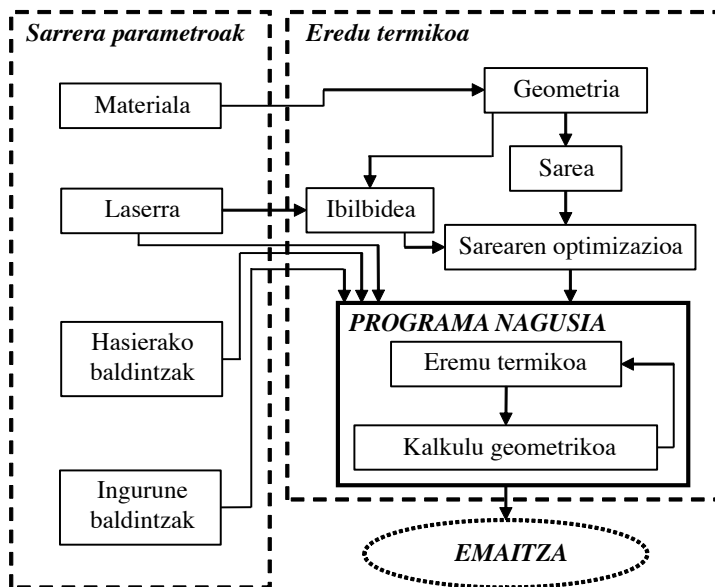
Proiektu honen helburua lengoia matematikoko Matlab softwarearen bitartez laser-testurizazio prozesua simulatzen duen zenbakizko ereduak garatzea da, betiere dagokion egiaztatze esperimentalak duelarik. Ereduan, laserra bero-iturri baten moduan simulatzen da eta plasma zuzenketarik ez da aplikatzen. Gainera, laserrak berak beroa transmititzen duen fenomenoak ahalik eta errealean irudikatze, testurizazioan erabiltzen diren pulsu labur bezala sartzan da bero-iturria egituratu nahi den gainazalean. Horretaz gain, modelizazioan funtsezkoa den balidazio esperimentalak aurrera eraman da.

2. METODOLOGIA

Proiektu honetan jarraitutako metodologiaren harira, modelizazioa eta saiakuntza esperimentalak oinarriko atalak dira. Bi atal hauetatik, lehenengo ereduak garatzen da, eta ondoren, saiakuntzak egiten dira. Horrela, saiakuntzen emaitzez baliatuz zenbakizko ereduak egiaztatzen da.

Laser-testurizazio prozesuaren ereduak jarraitzen duen eskema segidan erakusten den 3. irudian adierazten da. Bertan, argi ikusten da alde batetik sarrerako parametroak zehaztu behar direla, eta hauek abiapuntu izanik eredu termikoa lanean jartzen da. Ereduek termikoa, elementu finituen problema ebazteko sarea zehazten da. Sarearekin eta sarrerako parametroekin

batera programa nagusia exekutatzen da, hots, eremu termiko eta kalkulu geometrikoen ebazpena egin den programaren zatia.



3. irudia. Ereduaren garapeneren eskema.

Ereduarekin hasi aurretik beharrezko parametroak zehaztu behar dira: materialaren datuak eta makinaren parametroak, eta beren balioak saiakuntza esperimentaletan erabili diren berdinak zehazten dira. Proiektu honetan erabili den materiala kobalto (Co) oinarria duen Stellite 6a da, zehazki 1. taulako konposizioa duena. Material ezaguna eta industriako zenbait sektoretan (petrolio eta gasa, automozioa, aeronautika eta biomedikoa) erabilia da dituen higadurarako, tenperatura altuekiko eta korrosioarekiko erresistentzia altuarengatik.

1. taula. Stellite 6aren konposizio kimikoa (%).

Co	Cr	W	Ni	Fe	Mn	C	Mo	Si	P	S
58,00	29,99	3,99	2,47	1,56	1,47	1,07	0,94	0,68	0,006	<0,002

Stellite 6aren egituraketa egiteko TRUMPF fabrikatzaileen TruMark Station 5000 makina erabili da, egoera solidoko zuntz motako laserra duena. Prozesuko parametroen kontrolerako, laserrak TruTops Mark softwarea barneratuta dauka, non sortu nahi den testuraren ibilbidea bertan zehaztu daitekeen.

3. EREDUAREN OINARRIAK

Ereduaren oinarri teorikoa, eremu termikoari dagokion eroapen iragan-korreko bero-transferentziaren problema ebazteko jarraian adierazten den ekuazio diferentzialak ezartzen du.

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial u}{\partial t} - \nabla(k \cdot \nabla u) = f \quad \text{non}$$

u : Tenperatura
 ρ : Dentsitatea
 C_p : Bero espezifikoa
 f : Bero-iturria
 k : Eroankortasun termikoa

2. taula. Stellite baren tenperaturaren menpeko propietateak.

Temperatura (K)	Dentsitatea (kg · m ⁻³)	Bero espezifikoa (J · kg ⁻¹ · K ⁻¹)	Eroankortasun termikoa (W · m ⁻¹ · K ⁻¹)
293	8.400	425	13,00
393	8.360	475	14,50
470	8.330	500	16,00
530	8.300	525	16,64
620	8.275	550	18,00
700	8.240	575	18,48
730	8.228	600	19,50
775	8.210	625	20,01
860	8.180	650	21,10
910	8.152	675	21,77
950	8.130	725	22,50
1.020	8.100	750	22,50
1.100	8.060	1.150	22,50
1.193	8.020	1.400	22,50
1.270	7.980	1.680	22,50
1.293	7.970	1.920	22,52
1.393	7.970	2.150	22,60
1.493	7.970	2.320	22,68
1.593	7.970	2.415	22,75
1.693	7.968	2.450	22,82
1.793	7.967	700	22,88
1.893	7.966	700	22,94
2.000	7.965	700	23,00

Bero-transferentzia problema hau Matlab-eko PDE (Partial Differential Equation) moduluaren bitartez ebatzi da. Beraz, problema termikoa kalku-

latzeko, PDE moduluak beharrezkoak dituen aldagai guztiak definitu behar dira. Hori dela eta, materialaren datuak tenperaturaren menpe taularatu dira 2016an Wei Ya eta bere ikertzaile taldeak argitaratutako artikulutik eskuratutako balioekin (2. taula) [8]. Stellite 6aren ablazioa modelizatzen bere lurruntze-tenperatura (T_v) zehaztea garrantzitsua da, baina balio zehatza ez da aurkitu bibliografian. Hori dela eta, materialaren aleazio nagusien (Co-Cr) lurruntze-tenperaturak alderatuz, ereduan $T_v = 2.671$ °C zehaztu da Stellite 6aren lurruntze-tenperatura gisa. Bestalde, laser prozesuetan materialaren absortibitatearen balioa (α) zehaztu beharreko propietatea da, eta kasu honetan $\alpha = 0,5$ eko balio konstantea finkatu da.

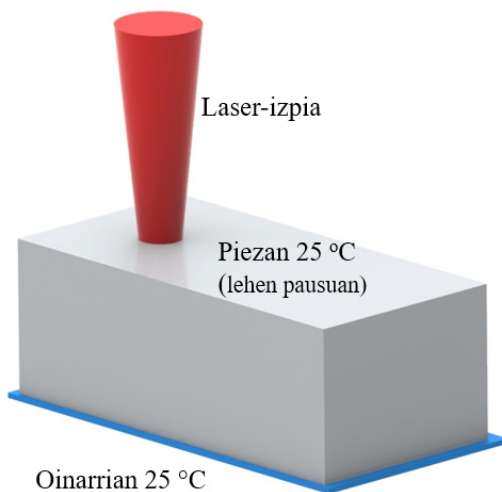
Materialaren datuak zehaztu ostean laserraren espezifikazio guztiak finkatu behar dira. Lehenik eta behin, Trumark Station 5000aren laser-izpiak $45 \mu\text{m}$ -ko erradioa eta 10° -ko dibergentzia angelua ditu. Bestalde, argi izan behar da, laser-testurizazioa ahalik eta garbiena eta azkarrena izan behar dela, urtutako material itsatsia ez delako simulatuko. Horrela, egituraketa azkarra egitearen bitartez urtutako material kantitatea txikiagoa eta egindako hurbilpena hobea izango dira. Horregatik, laserraren potentzia maximoan lan egitea erabaki da, hots, 50 W-ko potentzia nominalarekin. Pultsuko potentziaren balio maximoa lortzeko, laserrari ezarritako maiztasuna $f = 50$ kHz-koa eta pultsuen iraupena $t = 250$ ns-koa dira. Laserrak piezan eragiten duen bero-iturria, piezaren absortibitatearen, laserraren beraren potentziaren eta erasoko dion azaleraren menpekoea da, jarraian erakusten den adierazpenarekin lortzen dena. Erabiliko den adierazpen hau laserraren pultsuen iraupenaren menpe dagoenez, denbora-tartearen arabera balio bat edo beste izango du bero-iturriak.

$f = \alpha \cdot \frac{P}{A} \quad t \in [(n-1) \cdot T, dt + (n-1) \cdot T]$	α : Absortibitatea P : Pultsuko potentzia A : <i>Spot</i> -aren azalera
$f = 0 \quad t \in [dt + (n-1) \cdot T, n \cdot T]$	non n : Pultsu zenbakia dt : Pultsuaren iraupena T : Pultsuen periodoa

Bero-iturria kalkulatu ahal izateko laserraren *spot*ak piezaren gainazalean islatzen duen azalera jakin behar da. Azaleraren kalkuluan ezin da laserraren *spot*aren erradioa erabili zuzenean, izan ere, izpiaren dibergentzia-angelua eta materiala erauztean aldatzen den foku-distantzia kontuan izan behar dira. Horrela, testurizatuko den gainazaleko izpiaren azalera azpiko adierazpenaren bitartez kalkulatzen da.

$A = \pi \cdot (R + Df \cdot \tan(\gamma))^2$	R : <i>Spot</i> -aren erradioa Df : Foku-distantzia γ : Dibergentzia angelua
---	---

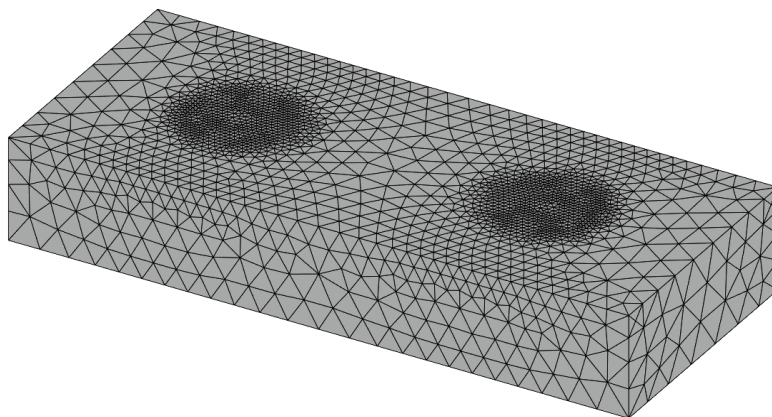
Eremu termikoaren kalkulua egin ahal izateko hasierako baldintzak eta ingurune-baldintzak zehaztu behar dira. Baldintza hauek saiakuntza esperimentalak egitean daudenak dira, horregatik hasierako baldintza moduan pieza osoa 25 °C-tan ezartzen da. Hala ere, pultsu bakoitzaren ostean hasierako baldintza hau eguneratzen da hozketa-prozesuaren ostean lortzen diren tenperaturen interpolazioaren bitartez. Ingurune-baldintzei dagokienez, pieza makinan kokatzen den moduak, hau da, euskarriarekin kontaktuan dagoen azalera, eta laser-izpiak ezartzen dituzte. Horrela, piezaren azpiko aurpegia 25 °C-tan ezartzen da. Laser-izpiaren ingurune-baldintza bero-iturria da, prozesuan zehar dagokion ibilbidean tenperatura igoera bat eragingo du eta. Ingurune-baldintzak laburbiltzen dituen eskema 4. irudian erakusten da. Aipagarria da, alboetako aurpegiei ez zaiela ingurune-baldintzarik ezartzen. Izan ere, laser-testurizazio prozesua hain da bizkorra, non konbekzio- eta erradiazio-galerak mespretxagarriak dira.



4. irudia. Ingurune-baldintzen eskema grafikoa.

Eremu termikoaren ebazpena egin ostean, tenperatura-aldaketak eragiten duten geometria-aldaketa diferentzia finituen bidez kalkulatu da. Horregatik, piezaren sare optimizatuaren (5. irudia), hau da, intereseko guneetan sare finagoa duenaren, gainean eremu termikoak eragindako aldaketak aztertuko dira. Sarea lehen ordenako elementu tetraedrikoz osatzen da, elementu txikienaren tamaina 8 μm izanik, eta 1,2ko hazkuntza faktorea finkatu da.

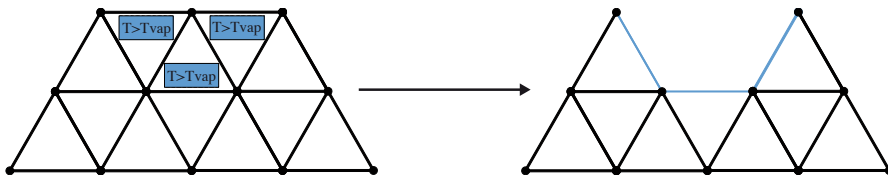
Kraterreko material-erazketa simulatzerako garaian bi estrategia aplikatu dira: alde batetik, elementu osoak kentzea, eta bestetik, lurrundutako nodoak beherantz desplazatzea.



5. irudia. Intereseko guneetan findutako sarea.

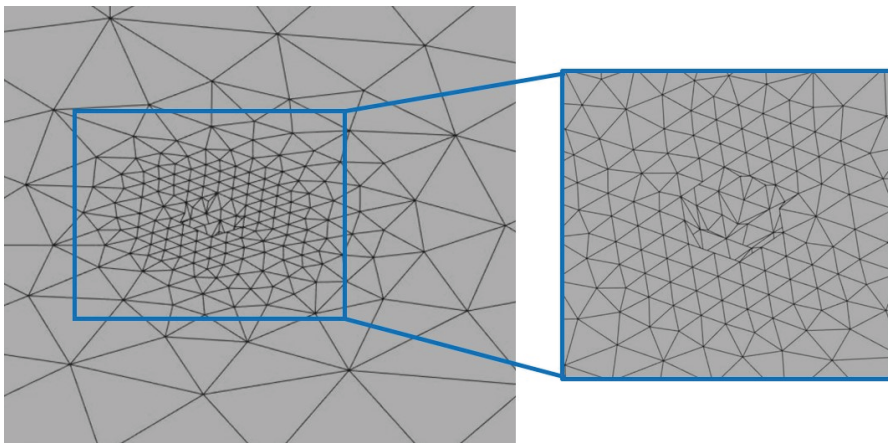
3.1. Lurrundutako elementuak kentzea

Elementuak kentzeko estrategia honetan elementuen nodoetako tenperaturak aztertzen dira. Horrela, elementu bakoitzaren nodoetako batez besteko tenperaturekin elementuaren tenperatura kalkulatu da, eta bere balioak materialaren lurrun-tenperatura gaitzen badu elementu hori ezabatzen da, 6. irudian ikusi daitekeen moduan.



6. irudia. Elementuak lurrun-tenperatura gailentzean esperotako itxura aldaketa.

Matlab-en exekutatzean lurrun-tenperaturatik gorako elementuak ezabatu direla ikusten da (7. irudia) eta programaturiko kodearen funtzio-namendu egokia bermatzen du. Alabaina, saiakuntza esperimentaletako baldintzak erudian aplikatzean material-kentze mekanismo hau ez da akibatzen. Izan ere, elementuak txikiak izan beharko liriteke emaitza logiko bat lortzeko, mikrometroa baino txikiagoak, eta horrek ordenagailuaren kostu konputazional handiegia eskatzen du.



7. irudia. Elementuak kentzean geratzen den geometria.

3.2. Lurrundutako nodoak desplazatzea

Materiala kentzeko bigarren estrategia honetan, nodoen tenperaturak lurruntze-tenperaturarekin alderatu eta lurrundutako nodoak behe-rantz desplazatzen dira. Hau da, laser-izpiak pieza berotzen duen zonako/eremuko nodoen tenperaturen balioak hartzen dira eta laserraren pultsuak dirauen bitartean, lurruntze tenperatura baino beroago badaude nodoak behe-rantz desplazatzen dira «dz» distantziako pausoetan (8. irudia). Nodoak paraleloki distantzia txiki bat (dz) mugituz joaten dira eta beren posizio berri bakoitzeko tenperatura lurruntze-tenperaturarekin alderatzen da. Izan ere, nodoa desplazatzen den bakoitzean, bere tenperatura berria interpolazio bidez kalkulatzen da. Nodoak desplazatzen diren distantzia sareko elementu tamainaren eta laserraren bero transferentziaren eraginez esperotako material lurruntzearen arteko konpromisoaren arabera da, azken finean elementu zorrotzegiek arazoak dakartzate. Ikerkuntza honetan $0,1 \cdot 10^{-3}$ mm-koa izan da «dz» aldagaiaren balioa. Desplazamendu-mekanismo hau amaitzeko helduko da puntu bat, non nodoaren tenperatura lurruntzeko beharrezko tenperaturatik behera egongo den eta hor kokatuko da gainazal berria.

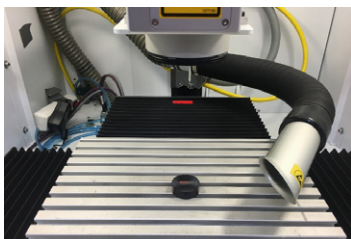


8. irudia. Nodoak lurruntze-tenperatura gailentzean esperotako itxura aldaketa.

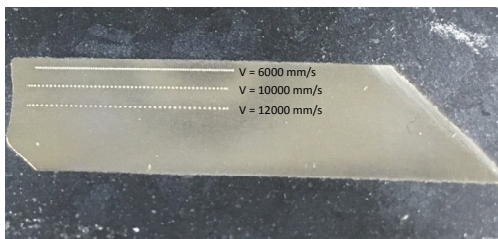
Materiala erauzteko estrategia honen bitartez, elementu osoa kentzean baino geometriaren kontrol zehatzagoa lortzen da.

4. BALIOZTATZE ESPERIMENTALA

Laser-testurizazio prozesuaren saiakuntza esperimentalak TruMark Station 5000 makinan egin aurretik Stellite 6ko lagina prestatu behar da. Horretarako, materialaren jatorrizko xaflaren zati bat moztu eta aztergai den probeta sortzen da, jarraian ispilu-akabera lortu arte leuntzeko. Horrela, lortzen den gainazalean mikrometro mailako kraterrak egitean gainazalaren akaberak ez du eraginik izango. 9. irudian honako hauek erakusten dira: (a) saiakuntza esperimentaletako muntaia, eta (b)n aitzinapen-abiadura desberdinetarako lortutako gainazal-testurak. Abiadura desberdinetan saiakuntzak egitearen arazoa, kraterrak beren arteko distantziaren eragina aztertzea da.



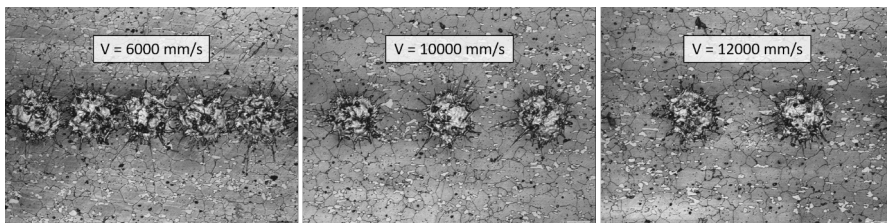
(a)



(b)

9. irudia. Balioztatze esperimentalak: (a) Laserrak egingo duen egituraketaren aurretiko bista; (b) Laser bidez egindako testura.

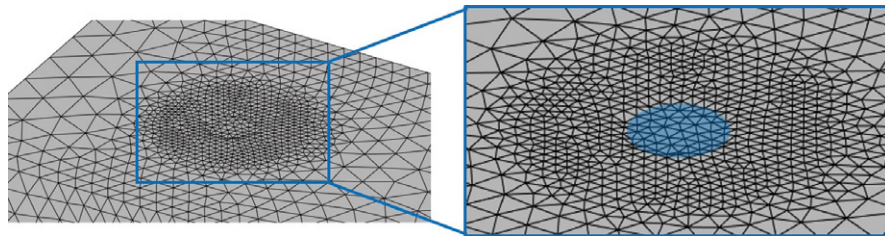
Egindako gainazal-egituraketak hobeto aztertzea aldera, mikroskopia konfokal baten bitartez zenbait argazki eta profil atera dira; horien artean 10. irudian erakusten direnak daude. Gainazala leundu ostean kimikoki eraso da Marble errektiboarekin, bere gainazalak laser izpiaren absortibitate hobe izateko; horregatik hurrengo irudian Stellite 6aren mikroegitura ikusten da kraterren inguruan.



10. irudia. Mikroskopia bidez lortutako kraterren itxura.

5. EMAITZEN EZTABAIDA

Atal honetan Matlab-eko kodean lortutako emaitzen eta saiakuntza esperimentaletan lortutakoen arteko bateragarritasuna aztertu eta emaitzen in-guruko eztabaida zabalduko da. Eredua simulatzean lortutako kraterretako bat 11. irudian erakusten da, berdez dagoen gainazalak beherantz dagoen gunea nabarmentzen duelarik.



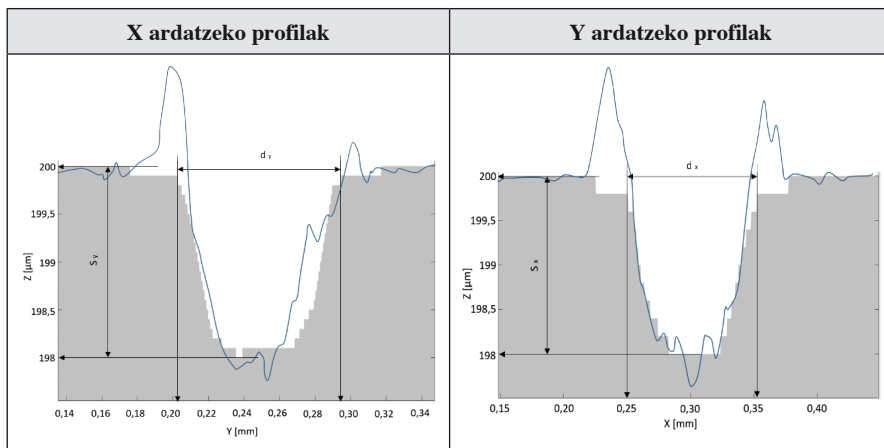
11. irudia. Simulatutako kraterra.

Simulatutako eta saiakuntza esperimental bidez lortutako emaitzak konparatze aldera, hiru puntu aztertu dira. Hasteko, testurizazio-ereduak urtutako materiala kontuan hartzen ez duenez, sinplifikazio honen eragina zenbatetsi behar da. Baita ere, laserraren noranzkoak sortutako kraterren geometriari eragiten duen desbiderapena aztertu da. Eta, azkenik, testurizazio-abiadurak egindako kraterren itxuran eraginik duen ikertu da.

5.1. Urtutako materialaren adhesioa kraterren ertzetan

Kraterren ertzetako urtutako materialaren azterketa krater indibidualen X eta Y ardatzetako profilei erreparatuz egiten da, luzetarako eta zeharkako profilak, hurrenez hurren. Testurizazio bidez sortutako kraterren adibidea 12. irudian ikusi daiteke.

Profilak kontuan izanda, desberdintasun handiena ere duak simulatzen ez duen material itsatsiaren gunean ikusten da. Hala ere, desberdintasun geometrikoak aurkitu arren, ere du gune hori non kokatzen den zehazteko gai da. Gainontzean, ereduaren emaitzak eta esperimentalak oso gertu daude.



12. irudia. Saiakuntza esperimentaletan eskuratutako (lerro urdina) eta simulazioetako profilen alderaketa (grisez adierazita).

5.2. Norabidetasunaren eragina

Laserraren ibilbideak kraterren sorreran izan dezakeen eragina norabidetasunaren bitartez aztertzen da. Horretarako, X eta Y norabideetako profiletan diametroa eta sakonera neurtzen dira. Egindako neurketa hauen batez besteko balioak 3. taulan biltzen dira: alde batetik, ereduaren emaitzak, eta bestetik, saiakuntzetatik lortutakoak.

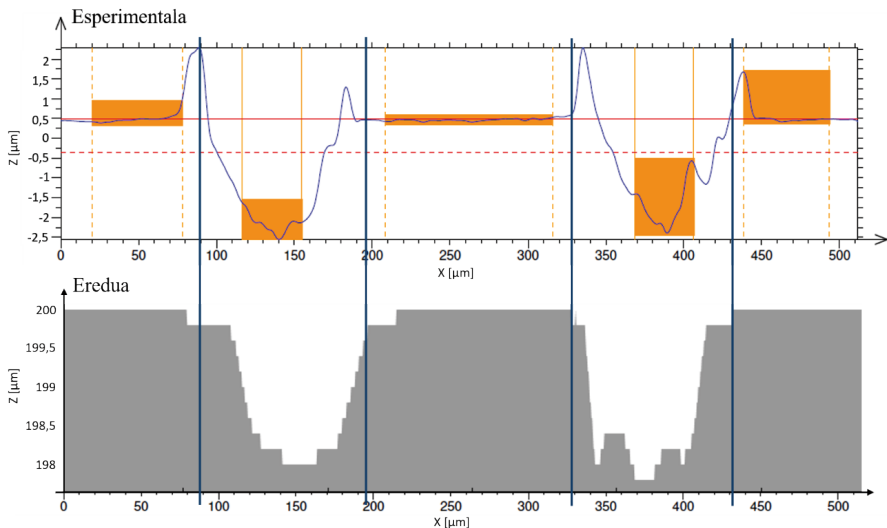
3. taula. Saiakuntza esperimentalen eta ereduko simulazioen neurriak.

	Ereduaren emaitzen batez bestekoa	Emaitza esperimentalen batez bestekoa
Diametroa X (μm)	100,00	96,71
Diametroa Y (μm)	94,00	89,02
X Ebaketako Sakonera (μm)	2,00	2,47
Y Ebaketako Sakonera (μm)	1,80	2,57

Neurketen emaitzen errorea onargarriz hartzen da: kraterren diametroan $5 \mu\text{m}$ -tako eta sakoneran $0,5 \mu\text{m}$ -tako erroreak lortu dira, batez beste. Laserrak saiakuntza esperimentaletan eragiten duen norabidetasun efektua, hau da, X ardatzean mugitzen denez noranzko horretako diametroaren balioa zertxobait handiagoa egitea, ereduaren emaitzetan ere gertatzen da. Hala ere, norabidegarritasun-efektua hau oso txikia da eta aztertutako laserizpiaren aitzinapen-abiadura tarterako ($6.000\text{-}12.000 \text{ mm/s}$) lorturiko kraterak zirkulartzat har daitezke.

5.3. Prozesuko abiaduraren garrantzia

Eredua abiadura desberdinetan simulatu ondoren, 6.000-12.000 mm/s, ikusten da lortzen diren kraterren profilak saiakuntza esperimentaletan lortutako emaitzetatik hurbil daudela. Gainera, 10. irudian erakusten den bezala, egiaztatu da abiadura desberdinak erabiltzearen eragina nulua dela, elkarren jarraiko kraterretan ez delako aldamenekoen ondoriozko desitxuraketarik gertatzen. Horretaz gain, abiadura desberdinetan lortutako simulazioen emaitzak saiakuntza esperimentaletan eskuratutakoekin bat datoze la egiaztatzen da. Horretarako, 13. irudian abiadura azkarrenean lortzen diren emaitzak erakusten dira, bertan begi-bistaz baieztatu baitaiteke beren arteko desberdintasuna arbuigarria dela.



13. irudia. Ereduaren X ardatzeko ebaketa saiakuntza esperimentalen profilarikin batera ($V = 12.000$ mm/s).

Gaineko irudiari begiratu, ikus daiteke ordenatuetako balioak bat ez datozela. Baina, honen arrazoia da, saiakuntza esperimentaletan profilaren neurriak mikroskopio konfokalak eskaneatzen duenaren arabera dela, eta Matlab-en berriz, piezako interes gunearen ebaketa egiten dela. Azken finean, erakutsitako kraterren neurriak balio bera erakusten dutela. Bestalde, saiakuntza esperimentaletako profiletan horiz markatutako guneak mikroskopio konfokalak sakonerak neurtzeko erabiltzen dituen guneak dira. Honelako prozesuetan, sakoneraren balio bakarra lortzea ezinezkoa da, geometriaren gorabeherengatik. Neurketa hauek gune bakoitzeko balioen batezbestekoarekin kalkulatu dituzte.

Laburbilduz, ereduarekin eta saiakuntzekin lortutako emaitzen arteko errorea onargarria kontsideratuz, garatutako eredu balizkotzat jo da eta bere egiaztapena bukatutzat eman da.

6. ONDORIOAK

Proiektu honetan garatutako laser-testurizazio ereduaren bitartez, simulazioak duen garrantzizko eginkizuna gertutik ezagutu da. Prozesu honetan zehar ondorioztatutako zenbait ideiatatik hona hemen garrantzitsuenak:

- Eredua Matlab-en simulatu eta esperimentalki balioztatu ostean lortutako errorea, mikrometro mailakoa, onargarria da.
- Matlab-en PDE moduluaren bitartez eremu termikoaren bero-transferentzia kalkuluak automatikoki egiten direla ikusi da, problema termikoen ebazpenerako erreminta egokia izanez.
- Elementu-tamainaren eta ereduaren erantzute-gaitasunaren arteko konpromiso batera iritsi behar izan da, mikrometro mailako kraterrak testurizatzen direlako. Izan ere, Matlab-eko kodeak behar duen existentzia konputazionala ordenagailu arrunt batek eskaintzen duena baino handiagoa da.
- Laser-testurizazio prozesuaren izaerak eragiten dituen bat-bateko tenperatura-aldaketan ondorioz, ereduaren egonkortasuna bermatzea konplexua da. Izan ere, alde batetik, prozesu azkar batek dakartzan zailtasunak, eta, bestetik, tenperatura-aldaketa handiak batzen dira.

7. ESKER ONAK

Ikerlan hau Eusko Jaurlaritzaren Elkartek 2021 programaren barneko BISUM proiektuaren barnean gauzatu da. Era berean, eskerrak eman nahi zaizkio Espainiako Ekonomia, Industria eta Lehiakortasun Ministerioari, PID2019-109220RB-I00 erreferentzia duen ALASURF proiektuaren finantzaketagatik.

BIBLIOGRAFIA

- [1] FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING. Mechanical Engineering Technion-Israel Institute of Technology. <https://meeng.technion.ac.il/> helbidetik eskuratua, eguneratzen-data 2020.
- [2] ETSION, I. 2010. «3. Laser surface texturing and applications». *G. K. Nikas en, Recent Developments in Wear Prevention, Friction and Lubrication*. 137-157.

- [3] KUMAR, V., VERMA, R., KANGO, S. eta SHARMA, V. 2021. «Recent progresses and applications in laser-based surface texturing systems». *Materials Today Communications*. **26**. 2352-4928.
- [4] LIU, H., CHEN, Y., WANG, X., MENG, X., FU, Y. eta CAI, L. 2008. «Numerical Simulation of Laser Surface Micro-Texturing». *Materials Science Forum*. **575-578**. 678-683.
- [5] XIAN, J., WANG, X., FU, X., ZHANG, Z., LIU, L. eta KANG, M. 2018. «A Simple Model to Predict Machined Depth and Surface Profile for Picosecond Laser Surface Texturing». *MDPI*.
- [6] CHEVALLIER, E., BRUYÈRE, V., SEE, T. eta NAMY, P. 2018. «Laser texturing modelling using COMSOL Multiphysics». *Excerpt from the Proceedings of the 2018 COMSOL Conference in Lausanne*.
- [7] CHEVALLIER, E., BRUYÈRE, V., BERNARD, G. eta NAMY, P. 2020. «Femto-second laser texturing prediction using COMSOL Multiphysics».
- [8] YA, W., PATHIRAJ, B. eta LIU, S. 2016. «2D modelling of clad geometry and resulting thermal cycles during laser cladding». *Journal of Materials Processing Technology*. **230**. 217-232.