

Aluminiozko zoru meheen fresaketa: erronkak, teknikak eta gidalerroak

(*Aluminium thin-floor milling: challenges, techniques and guidelines*)

Mikel Casuso^{1,*}, Antonio Rubio-Mateos¹, Fernando Veiga², Aitzol Lamikiz³

¹ TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Donostia.

² Nafarroako Unibertsitate Publikoa (UPNA/NUP), Iruña.

³ Bilboko Ingeniaritza Eskola (UPV/EHU), Bilbo.

LABURPENA: Aluminiozko zoru meheak aplikazio industrial ugari dituzte, tartean hegazkinen fuselajea. Haien fabrikazioan hainbat operazio daude, baina azkenekoa da kritikoena. Azken operazio hau fresaketa mekanikoa izaten da, eta erronka garrantzitsuak ditu oraindik ere, batez ere hondar-tentsioek sortzen duten deformazioa murriztea eta ebaketa-endarrek eragiten dituzten bibrazioak —*chatter*ra, batez ere— saihestea, zeinak oso kaltegarriak baitira bai fresagailuarentzat, bai zoru mehearen gainazal-akaberarentzat. Hainbat teknika daude erronka hauei aurre egiteko, batik bat ebaketa-baldintza aproposen aukeraketa, egonkortasun-lobuluaren kalkularen bidez; eta tresneria eta lokailuen erabilera, zoru meheak zurruntzeko. Dena den, posible da teknika hauek ezin izatea guztiz ekidin bibrazioak, zoruen zurruntasun izugarriki txikia eta aldakorragatik fresaketan zehar. Honengatik, prozedura bat mahaigaineratzen da zoru meheen geometria anitzetara moldatzen den tresneriaren erabilera bultzatzeko. Ondorioz, baldintza egokiak fresatzeko zoruaren bibrazioak eta akatsak gabeko eremuak zedarritu ahal dira.

HITZ GAKOAK: fresaketa-eragiketa, mekanizazioa, aluminioa, pieza meheak

ABSTRACT: *Aluminium thin floors have many industrial uses, especially as aircraft fuselage. Their manufacturing involves many operations, and the last one is the most critical one. This operation is mechanical milling, and it entails important challenges, as reducing distortion as consequence of residual stresses and preventing vibrations as consequence of cutting forces (mainly chatter). They are highly damaging for the milling centre and the surface quality of the thin floor. There are many techniques for facing these challenges, as the selection of proper cutting conditions, by means of the calculation of stability lobes; and the use of fixturing and holding systems that stiffen the thin floors. In any case, these techniques are not always able to completely prevent vibrations, due to the very low and variable stiffness of thin floors during milling. Because of this, a procedure is posed that aims to boost the use of flexible fixturing systems. As consequence, areas without vibrations and defects may be mapped in the thin floors if they are milled under proper cutting conditions.*

KEYWORDS: milling, machining, aluminium, thin parts

1

***Harremanetan jartzeko/ Corresponding author:** Mikel Casuso Lomas, , Basque Research and Technology Alliance (BRTA), Gipuzkoako Parke Zientifiko eta Teknologikoa, 20009 Donostia. – mikel.casuso@tecnalia.com – 
<https://orcid.org/0000-0003-3923-3971>.

Nola aipatu / How to cite: Casuso, M; Rubio-Mateos, A; Veiga, F; Lamikiz, A (2025). << Aluminiozko zoru meheen fresaketa: erronkak, teknikak eta gidalerroak >>, Ekaia, 48, xx-xx. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.27216>)

Jasoa: urtarrilak 15, 2025; Onartua: maiatzak 23, 2025

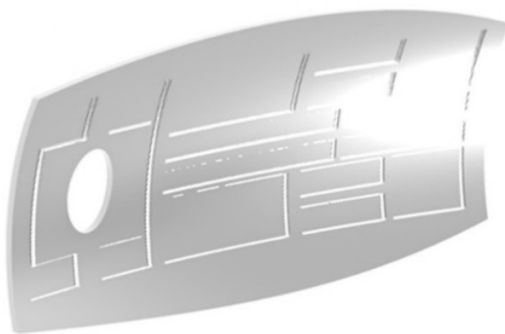
ISSN 0214-9001-eISSN 2444-3225 / © 2025 UPV/EHU



Obra Creative Commons Atribución 4.0 Internacional-en lizentzian dago

1. SARRERA

Aluminiozko zoru meheak (ingelesez, *thin floor*) deritzoten pieza mehe eta zabalak hainbat sektore industrialetan oso sarriak dira, aeronautikoan batik bat. Hegazkinen hegaletan (*rib* deituriko piezak, esaterako) eta fuselajearen (1. irudia) aurki daitezke eta, zoru meheen lodiera zabalera baino askoz txikiagoa denez, 5 milimetrokoa asko jota, haien fabrikazioa punta-puntako erronka teknologiko eta industrial da.



1. irudia. Fuselaje pieza. Moldatua [1].

Gaur egungo teknologia nagusia zoru hauek fabrikatzeko fresaketa mekanikoa da. Fresaketa mekanikoan piezari materiala txirbil-harroketa bidez kentzen zaio eta honela piezari desiratutako forma eta neurriak eman. Adibidez, fuselajearen piezak altzairuzko xafletatik abiatuta fabrikatzen dira, zeini fresaketa bidez lodiera txikitu eta desiratutako forma ematen baitzaie.

Beste teknika tradizionalak ere badaude zoru hauek ekoizteko, errematxaketa eta fresaketa kimikoa, batik bat. Errematxaketan zoru mehe handiak lortzen dira txikiagoak errematxe bidez elkartuz. Fresaketa kimikoan konposatu bat erabiltzen da aluminioa disolbatzeko eta piezaren lodiera murrizteko. Dena den, teknika hauek gero eta gutxiago erabiltzen dira, aurrenak zoru irregularrak eta pisu gehiegizkoak produzitzen dituelako, eta bigarrena kutsakorra eta arriskutsua delako; eta hauen ordez fresaketa mekanikoa ari da gailentzen, aluminiozko zoru mehe arinak eta homogeenak lortzen baititu, erresistentzia eta pisuaren arteko erlazio onarekin [2].

2. ERRONKAK

Fuselajea bezalako aluminiozko zoru meheen fresaketa mekanikoa ez dago zailtasunetatik eta erronka teknologikoetatik salbu. Hasteko, zenbat eta trinkoagoa eta pisu gutxiagokoa zorua, orduan eta pisu gutxiagokoa izango da ere hegazkina eta, ondorioz, baxuagoa bere kontsumo energetikoa eta bere karbono-aztarna. Aluminiozko zoru meheen fresaketa, beraz, ez da fabrikazio-faseari mugatzen, eta hegazkinaren bizi-ziklo osoari eragiten dio. Gainera, aerodinamika eta segurtasun zioengatik ere, zoru hauei fabrikazio-perdoi zorrotzak ezartzen zaizkie (± 0.1 mm lodieran eta < 1.6 μm gainazal-akaberaren batez besteko zimurtasun aritmetikoan) [1][3].

Baina —eta hemen agertzen da haien fresaketaren erronkarik gordinena— haien lodiera hain txikia izanik, haien zurruntasuna halakoa da ere. Eta honek zoruaren deformazioa eta bibrazioa erraztu dezake fresaketa-indarren eraginpean, oso kaltegarriak direnak zehaztasuna eta akaberarako. Gainera, zoruak txirbil-harroketak bidez galtzen duen bolumena eta masa handiak dira, erlatiboki behintzat, eta honek zoruaren bibrazioaren etengabeko aldaketa dakar fresaketak aurrera egin ahala [4]. Bibrazio nagusia *chatter* deiturikoa da, auto-kitzikapenez sortutakoa [5], hau da, ebaketa-prozesuak berak sortua. Aurreko iraganaldian zoruaren gainazala uhindua geratzean eta hau berriz fresatzean txirbil lodiera aldakorra sortzen denez agertzen da *chatter* bibrazioa. Honek prozesu ezegonkor bat sortzen du. Fresaketa arruntetan *chatter*ak fresagailuari eragiten dio, baina pieza meheen kasuan piezari, bere zurruntasun txikiagoagatik. *Chatter*ak akats larriak eragin ditzake. Fresagailuaren elementuak hondatu ditzake, eta zoruetan gainazal-akabera okerra utzi, ezarritako fabrikazio-perdoietatik at. Hau bereziki kaltegarria da fuselajeetan.

Zoru meheetan agertzen den beste gertakaria hondar-tentsioak dira. Izan ere, zoruak hainbat fabrikazio-prozesu jasaten ditu, eta fresaketa azkenekoa izan ohi da. Aurretiko prozesu hauek tentsio batzuk sortu dituzte piezan. Tentsioak orekan daude, baina fresaketak oreka apurtzen du, tentsioak oreka egoera berri batera berrantolatzen dira, eta ondorioz zorua deformatzen dute [6]. Bi motatako hondar-tentsioak daude: alde batetik, fresaketa aurretik piezan daudenak, aurreko operazioetan sortuak eta gehienetan nagusiak direnak; eta beste aldetik, fresaketan bertan sortutako tentsioak. Gehienetan azken hauek ez dira nabarmenak,

baina aluminiozko zoru meheen ezaugarria da hain zuzen ere haietan fresaketan sortutako tentsioek ere eragin nabarmena dutela ondorengo deformazioan [7].

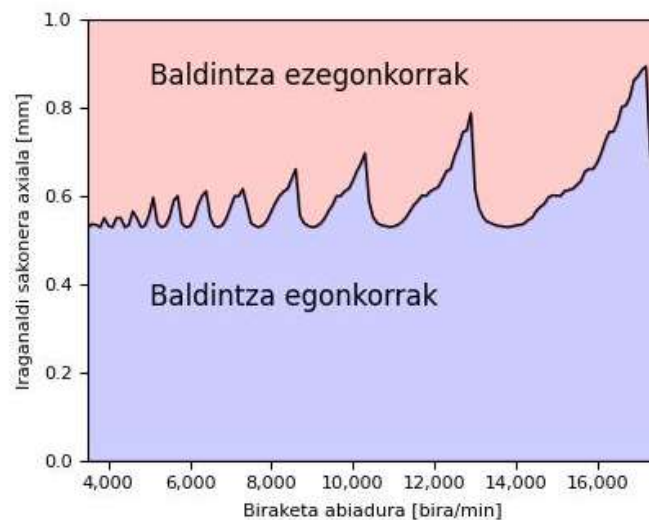
Bai bibrazioek, bai deformazioek zoruan akatsak eragin ditzakete, edota hau fabrikazio-perdoietatik kanpo geratzea, pieza bazterteraino. Zorua baztertu beharra bereziki garesti suerta daiteke. Gehienetan fresaketa azken fabrikazio operazioa da pieza hauetan, denbora eta energia altuak inbertitu ostean aurreko operazioetan —ijezketa edota fabrikazio-gehigarria [8] [9]. Beraz, akatsik gabeko zoru mehe zehatzak lortzea helburu eta erronka nagusia da, bai ikuspuntu ekonomikotik, bai materia eta energia aurrezteak jomuga duen ikuspuntu ekologikotik.

3. TEKNIKAK

Hainbat teknika plazaratu dira erronka hauei heltzeko. Fresaketan zorua tresneria egokiarekin eustea gakoa da, zorua zurruntasuna handitu dezakeelako, eta hortaz bibrazioak murriztu eta deformazioak kontrolatu. Bestalde, fresaketa prozesuaren azterketa matematikoa ebaketa-baldintza aproposak kalkulatzeko eta erabiltzeko ere garrantzitsua da.

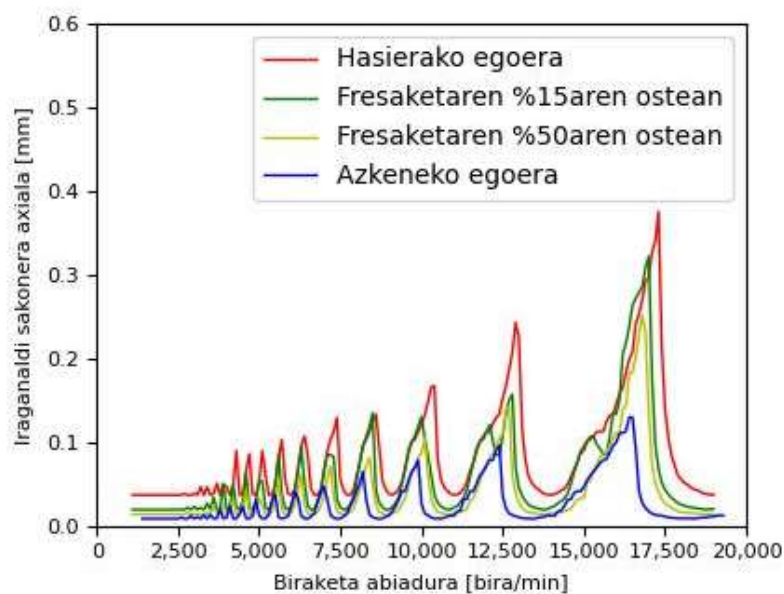
a) Ebaketa-baldintza aproposen kalkulua eta aukeraketa:

Fresaketa prozesuaren azterketa matematikoan aurrerapen handiak egin dira [10]. Funtsean, azterketa honek egonkortasun-lobuluak kalkulatzeko du helburu. Hauek biraketa abiadura bakoitzak zein duen iraganaldi sakonera axialik egonkorrena ezartzen dute, hots, *chatter* bibrazioa saihesten duena. 2. irudian egonkortasun-lobuluaren adibide bat agertzen da. Lobulu izena baldintza egonkorak eta ezegonkorak banatzen dituen marraren formatik dator. Orokorrean, iraganaldi sakonera axial handiek bibrazioak eta ezegonkortasuna sorrarazten dute fresaketan. *Chatterra* saihesteko, beraz, iraganaldi baxuak erabili behar dira, baina honek efizientzia baxuagoa eragiten duenez, lobuluek ahalbidetzen dute iraganaldirik produktiboena —hots, sakonena— kalkulatzeko. 2. irudiaren adibidean, 0,8 milimetroko iraganaldia izango litzateke bibrazioarik sortzen ez duen sakonerarik handiena, betiere 16.500 bira/min-tara fresatuz gero. Hitz gutxitan, azterketa matematikoari esker egonkortasun-lobuluak kalkulatu dira, eta hauek nola egonkorren fresatu aditzera ematen dute.



2. irudia. Egonkortasun-lobuluaren adibidea (puntuak erabili da hamartar bereizle bezala).

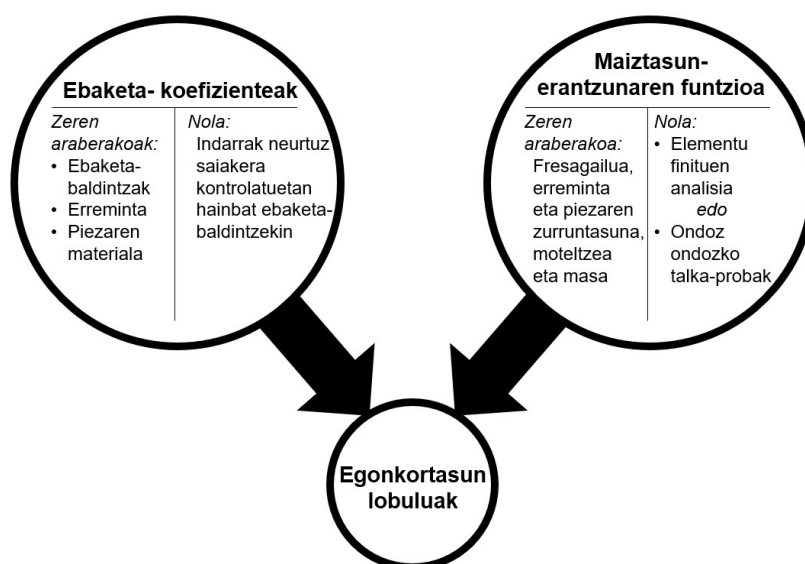
Zoru meheetan erronka handiagoa da, ondoz ondoko egonkortasun-lobuluak kalkulatu behar baitira. Izan ere, esan bezala, haietan masa eta bolumen galerak handiak dira fresaketan zehar, zorua nabarmenki aldatuz doa eta ondorioz ebaketa-baldintza egonkorrenak ere aldatzen dira [11]. Hau aintzat hartzeko, egonkortasun-lobuluak fresaketaren hainbat etapetan kalkulatu behar dira, 3. irudian erakusten den bezala [4].



3. irudia. Egonkortasun lobuluaren aldaketa fresaketan zehar (puntuak erabili da hamartar bereizle bezala). Moldatua [12].

Lobuluak kalkulatzeko beharrezkoak dira ebaketa-koefizienteak eta maiztasun-erantzunaren funtzioak. Ebaketa koefizienteak ebaketa indarrak aurreikustea ahalbidetzen dute ebaketa-baldintzen, fresatutako material motaren eta erabilitako ebaketa-erremintaren arabera. Aldez aurretik eskuratu behar dira, baldintza ezberdinekin fresaketa probak eginez eta eragindako indarrak neurtuz [13]. Bestalde, maiztasun-erantzunaren funtzioak fresagailuak eta piezak kanpo kitzikapen baten aurrean duten erantzuna kuantifikatzen du. Konputazionalki lortu daitezke, elementu finituen simulazio bidez; baina zehatzagoa da esperimentera eskuratzeko, talka-probak burutuz. Berez, ondoz ondoko hainbat talka-proba burutu beharko dira fresaketan zehar, zoruaren materia eta bolumen galeraren eragina kontuan izatearren. Talka-probak burutzeko mailu dinamometrikoa eta azelerometroa behar dira. Lehenak talkan aplikatutako indarra neurtzen du, eta bigarrenak indar horrek fresagailuan eta zoruan sortzen duen bibrazioa [14].

Funtsean, ebaketa-koefizienteek fresaketa-baldintzen arabera indarrak kalkulatzeko ahalbidetzen dute, eta maiztasun-erantzunaren funtzioek indarren arabera bibrazioa. Hauek kontrolatuki lortu behar dira, zoru mehea fabrikatzen hasi aurretik. Honekin guztiarekin, egonkortasun-lobuluak kalkulatzeko eta irudikatzea posible da, zeintzuekin fresaketa-baldintza proposenak aukeratuko diren. Kalkulu honen eskema 4. irudian erakusten da.

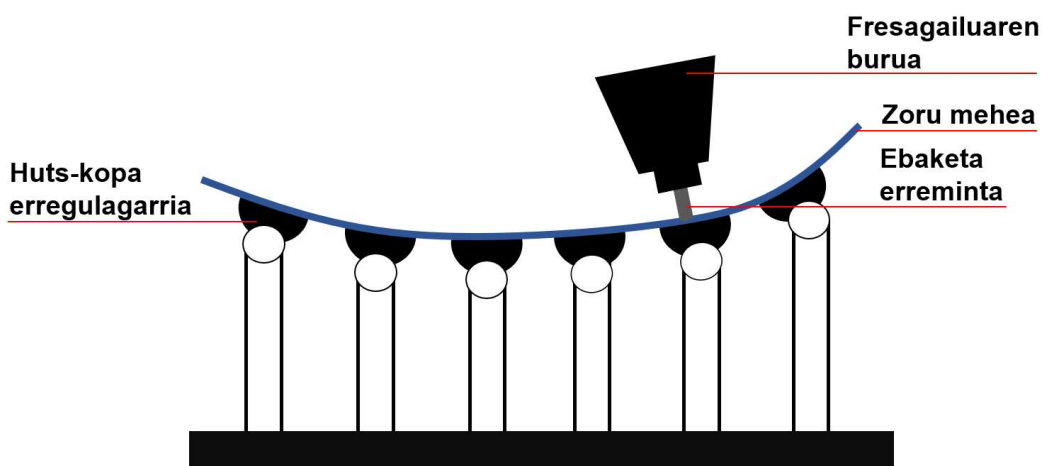


4. irudia. Egonkortasun-lobuluak kalkulatzeko urratsak.

b) Tresneriaren erabilera:

Tresneriaren erabilera piezak eutsi eta kokatzeko ohikoa da edozein fresaketa prozesuan, baina zoru meheen kasuan tresneriak beste eginkizun bat ere dauka: zoruaren zurruntasuna handitu eta bibrazioak moteldu. Honetarako, industrian gehienbat huts bidezko lokailuak darabiltzate. Zorua haiei atxikitzen zaie fresaketan. Bi motatakoak dira: *ad hoc* deiturikoak, pieza-geometria jakin baterako espresuki sortuak (monomorfoak ere deitzen zaie [15]); eta moldakorrak (edo ortomorfoak), hainbat pieza-geometria ezberdinetara moldagarriak (5. irudia) [16].

Ad hoc lokailuen abantaila argia da: zoruari hobeto atxikitzen zaizkio, hobeto sostengatzen dute eta haren zurruntasuna hobekien handitzen. Desabantaila ere bistako da: zoru mota bakar batentzat balio dute. Sektore aeronautikorako garestiegiak eta erabilgaitzak, hortaz, honek piezak sorta txikitan ekoitzi ohi baititu. Bere aldetik, tresneria moldakorraren kasua aurkako da: geometria ezberdinetara moldakortasun ageriki handia, baina zurruntasun agian ez-nahikoa eta, beraz, bibrazioak guztiz ekiditeko ezintasuna. Tresneria hauek, orokorrean, huts-kopa erregulagarritz osaturiko mahai zabalak dira. Hau dela eta, zorua lokalki eusten dute, baina zoruaren azaleraren zati handiak euskarririk gabe geratzen dira —huts-kopen artean daudenak, alegia—, zurruntasun txikiegiarekin zehaztasunezko fresaketa zorrotzak burutzeko, sektore aeronautikoan eskatzen den modura.



5. irudia. Zoru meheak eusteko tresneria moldakorren diagrama.

4. GIDALERROAK

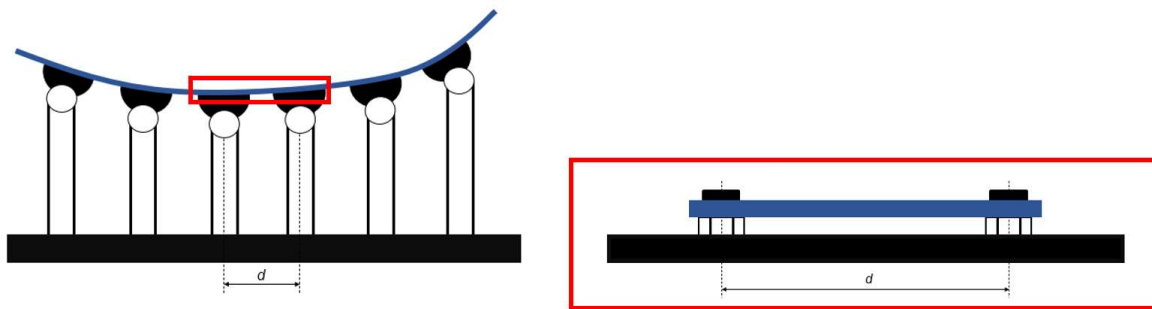
Aluminiozko zoru meheak fresatzeko, bereziki hegazkinen fuselajearen parte izango direnak, zenbait gidalerro eta prozedura proposatu daitezke, aurreko teknikak erabiliz.

Tresneria moldakorraren ahalmen osoa garatzeko hauek egonkortasun-lobuluaren kalkularekin konbina daitezke, hau da, alde batetik tresneriaren pieza-geometria ezberdinetara moldatzeko gaitasunaz baliatu, eta beste aldetik ebatzi zeintzuk diren halako egoeran ebaketa-baldintza egonkorrenak.

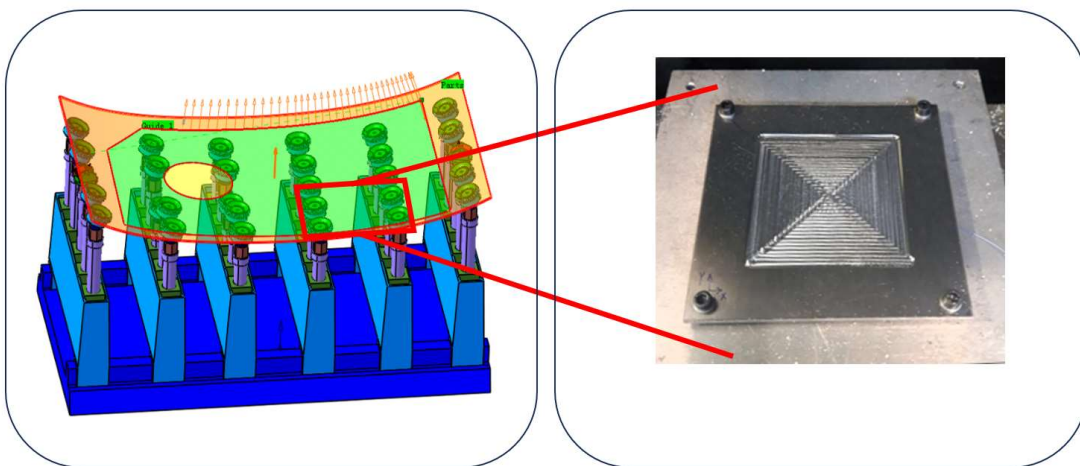
Berriki, indar eredu bat garatu da esperimentalki, kontuan hartzen dituen fresaketa indarrak kalkulatzeko ez soilik ebaketa-baldintzak; baita zoruaren eta tresneriaren geometriak, ebaketa-erremintaren posizioa eta zoruaren bolumen aldaketa fresaketan zehar ere. Eredu hau aproposa izan daiteke fabrikazio prozesuan zehar hain aldakorrak diren zoru meheak bezalako piezetan aplikatzeko [17]. Bestetik, frogatu da *chatter* bibrazioa berez ez dela edonon eta uneoro agertzen, baizik eta soilik zoruaren eremu jakin batzuetan, zurruntasun txikienean. Beraz, tresneria moldakorrean ahalko lirateke fresaketa eremu egonkorak zedarritu [12]. Dena den, garrantzitsuena da frogatu dela metodologia aproposa jarraituz gero posible dela bibrazioak, hein handi batean bederen, murriztea. Honetarako, zoru meheak fresatu aurretik probak egin daitezke eremu egonkor hauek aurkitu eta mugatzeko. Entsegu-mahai batean, zoru mehea fabrikatu aurretik, ahal dira tresneria moldakorraren baldintzak erreplikatu, eremu egonkorak zedarritu eta fresaketa-baldintza egonkorrenak zehaztu. Honek tresneria moldakorraren erabilera bultzatzen du.

Prozedura laborategian entsegu kontrolatuak burutzean datza. Fuselaje osoa fresatu ordez, plaka meheak fresatu daitezke, torlojuak erabiliz huts-kopen ordez, betiere bihurtura eta atxikipen-indarren balioa mantenduz, baita huts-kopen arteko distantzia ere. Huts-kopen arteko eremu hau da, hain zuzen ere, zurruntasun txikienekoa, eta beraz, bibrazioak jasateko eremurik probableena. Egonkortasun-lobuluak kalkulatu daitezke plaka hauetan, baldintza egonkorrenak aukeratu eta ondoren, eurak erabiliz, plakaren eremu egonkorak eta ezegonkorak mapatu. Fresaketa-baldintza hauek eta huts-kopen arteko eremu egonkor hauek izango dira gero

tresneria moldakorrean fuselajearen fresaketa egonkorrena ahalbidetuko dutenak. 6. irudian erreplikazio ekintza honen eskema azaltzen da, eta 7. irudian kasu erreal bat.



6. irudia. Tresneria moldakorraren diagrama (ezk.) eta hartatik abiatutako erreplika (esk.).



7. irudia. Kasu erreala, plaka mehe bat fresatu dena tresneria moldakorraren erreplika gisa. Moldatua [18].

5. ONDORIOAK

Akatsik gabeko aluminiozko zoru mehe zehatzak lortzea operazio kritikoa da gaur egungo fuselajeen fabrikazioan, eta helburu ekonomiko eta ekologiko nabarmena. Zoritarrez, zoru hauek deformazioak eta bibrazioak jasaten dituzte hondar-tentsioen eta ebaketa-indarren eraginpean. Zoruen zurruntasun txikia eta aldakorak arazo hauek gaizkiagotzen ditu, eta erabiltzen den tresneriak ezin ditu beti arazo hauek ekidin.

Honengatik, indar-eredu berriak garatu dira, hobeto azaltzen dutenak zoru meheen fresaketa, eta prozedura bat mahaigaineratu da zoru mehe hauen fresaketa gidatzeko, ahalbidetzen duena baldintza egokiekin fresatuz gero zoruan bibraziorik eta akatsik gabeko eremuak zedarritu.

ESKER ONAK

Eskerrak Eusko Jaurlaritzari, EKOHEGAZ2 (KK-2023/00051) proiektuaren bidez emandako finantzaketagatik.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] DEL SOL, I., RIVERO, A., LÓPEZ DE LACALLE, L. N., GAMEZ, A. J. 2019. «Thin-wall machining of light alloys: a review of models and industrial approaches». *Materials*, **12**, 2012.

[2] HERRANZ, S., CAMPA, F. J., DE LACALLE, L. N. L., RIVERO, A., LAMIKIZ, A., UKAR, E., SÁNCHEZ, J. A., BRAVO, U. 2005. «The milling of airframe components with low rigidity: A general approach to avoid static and dynamic problems». *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, **219**, 789–801.

[3] SLAMANI, M., CHATELAIN, J. F., IL, A., BALAZINSKI, M. 2021. «Statistical analysis and modeling of temperature distribution during various milling operations of thin walled aircraft parts». *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **570**, 125842.

[4] CAMPA, F. J., LOPEZ DE LACALLE, L. N., CELAYA, A. 2011. «Chatter avoidance in the milling of thin floors with bull-nose end mills: Model and stability diagrams». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **51**, 43–53.

[5] ARRIZUBIETA, J. I., CELAYA, A., UKAR, E., LAMIKIZ, A. 2019. «Makina-erreminten errendimendua eta zehaztasuna». *EKAIA Euskal Herriko Unibertsitateko Zientzia eta Teknologia Aldizkaria*, ale berezia, 9–30.

[6] WANG, J., ZHANG, D., WU, B., LUO, M. 2018. «Prediction of distortion induced by machining residual stresses in thin-walled components». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **95**, 4153–4162.

- [7] LI, J., WANG, S. 2017. «Distortion caused by residual stresses in machining aeronautical aluminum alloy parts: recent advances». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **89**, 997–1012.
- [8] ALDALUR, E., PANFILO, A., SÚAREZ, A., M. UGARTEMENDIA, J. 2021. «Hari metalikoetan eta arku elektrikoan oinarritutako fabrikazio-gehigarriko WAAM teknologiaren oinarriak eta aplikazioak». *EKAIA Euskal Herriko Unibertsitateko Zientzia eta Teknologia Aldizkaria*, **40**, 345–360.
- [9] GROSSI, N., SCIPPA, A., VENTURINI, G., CAMPATELLI, G. 2020. «Process parameters optimization of thin-wall machining for wire arc additive manufactured parts». *Applied Sciences*, **10**, 7575.
- [10] ALTINTAS, Y., ERHAN BUDAK. 1995. «Analytical Prediction of Stability Lobes in Milling». *CIRP Annals*, **44**, 357–362.
- [11] YUE, C., GAO, H., LIU, X., LIANG, S. Y., WANG, L. 2019. «A review of chatter vibration research in milling». *Chinese Journal of Aeronautics*, **32**, 215–242.
- [12] CASUSO, M., RUBIO-MATEOS, A., VEIGA, F., LAMIKIZ, A. 2022. «Influence of Axial Depth of Cut and Tool Position in Locally Supported Thin Floor Milling». *Materials*, **15**, 731.
- [13] GRADIŠEK, J., KALVERAM, M., WEINERT, K. 2004. «Mechanistic identification of specific force coefficients for a general end mill». *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, **44**, 401–414.
- [14] QU, S., ZHAO, J., WANG, T. 2016. «Three-dimensional stability prediction and chatter analysis in milling of thin-walled plate». *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **86**, 2291–2300.
- [15] RUBIO-MATEOS, A., RIVERO, A., DEL SOL, I., UKAR, E., LAMIKIZ, A. 2018. «Capacitation of flexibles fixtures for its use in high quality machining processes: an application case of the industry 4.0 paradigm». *DYNA*, **93**, 608–612.
- [16] BAO, Y., WANG, B., HE, Z., KANG, R., GUO, J. 2022. «Recent progress in flexible supporting technology for aerospace thin-walled parts: A review». *Chinese Journal of Aeronautics*, **35**, 10–26.

- [17] CASUSO, M., RUBIO-MATEOS, A., VEIGA, F., LAMIKIZ, A. 2022. «Modeling of cutting force and final thickness for low stiffness 2024-T3 aluminum alloy part milling considering its geometry and fixtures». *Journal of Materials Research and Technology*, **21**, 2416–2427.
- [18] HU, F., LI, D. 2011. «Process planning and simulation strategies for perimeter milling of thin-walled flexible parts held by reconfigurable fixturing system». *Proceedings - 3rd International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, ICMTMA*, **2**, 922–926.