Ekaia, 2021, 41, 373-404
https://doi.org/10.1387/ekaia.21904

ekaia
ZIENTZIA eta TEKNOLOGIA ALDIZKARIA

ISSN 0214-9001 – eISSN 2444-3255

Geometria konplexuko pieza baten mekanizazio-estrategiak CAM bidez

(Manufacturing process definition of a complex geometry, analysing CAM machining strategies)

*Aner Jimeno**[1], *Gonzalo Martínez de Pissón*[1], *Octavio Pereira*[3], *Haizea Gonzalez*[1], *Amaia Calleja*[2]

[1] Ingeniaritza Mekanikako Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU, Bilbo
[2] Ingeniaritza Mekanikako Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU, Vitoria/Gasteiz
[3] Centro de Fabricación Avanzada Aeronáutica, UPV/EHU, Zamudio

LABURPENA: Honako lan honetan belaun-protesiko osagarrien fabrikazioa azaltzen da CO_2 hozgarri kriogenikoa erabiliz. Osagarrien konplexutasuna dela eta, beharrezkoa da 5-ardatzen interpolazioa gauzatzea fresaketa-eragiketetan. Gainazalen konplexutasun horrek eta materialaren (titanioaren) mekanizagarritasun baxuak mekanizazio-erronka berriak sortzen dituzte. Kasu honetan, osagarrien fabrikaziorako erabilitako mekanizazio-estrategiak eta mekanizazio-aldagaiak deskribatzen dira. Gainera, mekanizazioan ager daitezkeen talkak saihesteko, egiaztatze birtuala erabili da. Horrez gain, hozketa faktore garrantzitsu bat da osagai medikoen garbitasuneko beharrizanei dagokienez. Ohiko hozte-teknikak CO_2 hozgarri kriogenikoarekin ordeztu dira.

HITZ GAKOAK: belaun-protesia, fresaketa-eragiketa, mekanizazioa, 5-ardatz, hozketa, titanioa.

ABSTRACT: *In this work, knee prosthesis manufacturing process using CO_2 cooling is described. It is necessary to use 5 continuous axis milling in order to manufacture this complex geometry. However, surfaces complexity and material (titanium) low machinability characteristics present a challenge for manufacturers. In this case, process operations and machining parameters for this component manufacturing are specified. Besides, virtual verification of machining process is also performed in order to avoid collisions. Moreover, cooling is a key factor in this case regarding medical components cleaning specifications. Traditional coolants are replaced by CO_2 cooling.*

KEYWORDS: knee prosthesis, milling, machining, 5-axis, cooling, titanium.

**** Harremanetan jartzeko / Corresponding author:*** Aner Jimeno Beitia. Ingeniaritza Mekanikako Saila, Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU, Bilbo. – aner.jimeno@ehu.eus – https://orcid.org/0000-0002-2117-1349

Nola aipatu / How to cite: Jimeno Beitia, Aner; Martínez de Pisson Caruncho, Gonzalo I.; Pereira Neto, Octavio; Gonzalez Barrio, Haizea; Calleja Ochoa, Amaia (2021). «Geometria konplexuko pieza baten mekanizazio-estrategiak CAM bidez». *Ekaia*, 41, 2021, 373-404. (https://doi.org/10.1387/ekaia.21904).

Jasotze-data: 2020, uztailak 13; Onartze-data: 2021, maiatzak 4.

ISSN 0214-9753 - eISSN 2444-3581 / © 2021 UPV/EHU

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

1. **SARRERA**

Azken urteotan areagotzen ari den enpresen arteko lehia horretan, geroz eta garrantzi handiagoa ari da hartzen ingurugiroa. Beharrezkoa da efizientzia teknologikoa bilatzea ingurugiroa zainduz, betiere merkatukuotak emango duen produktibitatea begi-bistatik galdu gabe [1]. Ingurugiroa zaintzeko ardura horretan, zenbait hozketa-metodo sortu dira; horien artean: MQL (Minimun Quantity Lubrication), hozgarri kriogenikoak (CO_2, N_2) eta bien arteko konbinaketa den CryoMQL. Horietako metodo bakoitzak agertzen dituen abantailak eta desabantailak aurreko ikerketa batzuetan aztertu izan dira [2, 3].

Osagai medikoen fabrikazioan jarduten duten enpresek, ordea, badute kezka gehigarri bat, sektore medikoaren baldintza zorrotzak betetzean oinarritzen dena. Sektore horretan, faktore kritikoena eta beharrezkoena garbitasuna da, gizakiaren gorputzean ezin baita sartu kontrolik izan ez duen osagai kimikorik, metalikorik ez bakteriorik. Garbitasun hori produktuaren mekanizazio-prozesuarekin zuzenean lotuta dago, giza gorputzarentzat kaltegarriak izan daitezkeen patogenoak ager baitaitezke mekanizazioan zehar. Hori dela eta, osagai kirurgikoen fabrikatzaile diren enpresek mekanizazio-prozesu garbiago batzuen bilaketan dihardute.

Protesiak egiterako orduan, mekanizazio-prozesu konbentzionalez gain, badira teknika desberdinak; horietako bat da fabrikazio gehigarria. Fabrikazio gehigarriari esker, inplante pertsonalizatuen fabrikazioa erraztu egiten da. Gainera, fabrikazio-prozesu hori ingurune kontrolatu batean egiten da, patogeno desberdinak agertzea ekidin daitekeelarik. Hala ere, horrelako piezek behar duten akabera eta tolerantziak direla eta, zaila da metodo honen bitartez bukaerako piezara heltzea. Hori dela eta, beharrezkoak izaten dira zenbait mekanizazio-prozesu akabera eta tolerantzia-muga horiek betetzeko. Akabera-eragiketa hauetan erabiltzen diren olio-emultsioen edo olioa barneratzen duten beste hozgarri/lubrifikazio-metodo batzuen ondorioz, pieza kutsatu egiten da. Hori horrela izanik, pieza behin bukatuta izanda, beharrezkoa da garbiketa-prozesu desberdinak aplikatzea, pieza desinfektatzeko eta esterilizatzeko.

Nahiz eta produktuari esterilizaziorako eta desinfekziorako garbiketa-prozesuak aplikatu, kasu batzuetan infekzioak agertzen dira protesi horiek ezartzean. Espainian, belauneko eta aldakako kirurgietan, 350-400 errefusatze-kasu izaten dira urtean, egiten direnen % 10 inguru, alegia [4, 5].

Lan honetan, belaun-protesi baten osagarrien fabrikazio-prozesua deskribatzen da. Mekanizazio-prozesu batean faktore ugari izan behar dira kontuan; horien artean: erabili beharreko erremintak, mekanizazio-aldagaiak, materiala eta hozketa-metodoa, besteak beste. Horiek guztiak sakonki azaltzen dira ondorengo ataletan. Hozgarriari dagokionez, gaur egun

geroz eta ezagunagoa den LCO_2-a erabili da belaun-protesiaren osagarriak mekanizatzeko.

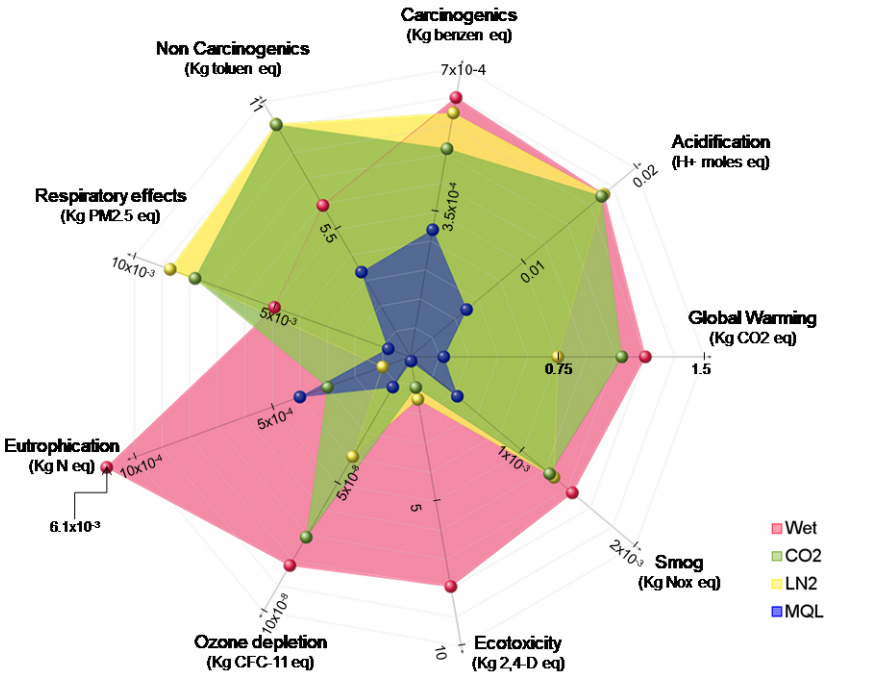
2. **HOZGARRI KRIOGENIKOA**

Lan honetan, geroago azalduko den bezala, Ti_6Al_4V materiala erabiliko da belaun-protesia egikaritzeko. Material hori eroankortasun termiko baxukoa izateak material termo-erresistenteen multzoan sailkatzea dakar. Familia horretako materialek arazoak izaten dituzte ebaketa-gunean sortutako beroa kanporatzeko; hori dela eta, beharrezkoa da horrelako materialak mekanizatzerakoan hozgarriren bat erabiltzea. Horiek, beroa kanporatzen laguntzeaz gain, gainazal mekanizatuaren alderdi tribologikoak kontrolatzen dituzte [6]. Azken urteotan, jatorri mineral edo sintetikoa duten emultsio bidezko hozgarriak hozketa kriogenikoarekin ordeztea bilatzen da.

Hozgarri kriogeniko bezala karbono dioxido likidotua (LCO_2) erabiltzeak baditu zenbait abantaila beste hozgarrien aurrean. Mekanizazioari dagokionez, hozgarri kriogenikoek, emultsioekin alderatuz, beroa ebakuatzeko ahalmen handiago dute; hori dela eta, mekanizazio-prozesuan tenperaturak baxuagoak izaten dira. Gainera, hozketa kriogenikoa erabiltzeak erremintaren bizi-zikloa luzatzea bermatzen du, eta baita sorbatza ez galtzea ere, lehorreko zein emultsio bidezko mekanizazioekin konparatuz [7]; horrek, aldi berean, produktibitatea hobetzea dakar. Shane Y. Hong eta Mark Broomer ikerlariek hozketa kriogenikoa erabiltzeak produktibitatean zuen hobekuntza aztertu zuten; kasu batzuetan, hobekuntza hori % 21,36koa zen [8]. Gainazal mekanizatuari dagokionez, K. Nimel Sworna Ross eta M. Ganesh ikerlariek ondorioztatu zuten Ti_6Al_4V materialaren mekanizazioan karbono dioxido likidotua (LCO_2) hozgarri bezala erabiltzeak gainazalaren akabera hobetzea zekarrela [9].

Hozketa kriogenikoa aipatzerakoan, bi jariakin nagusi erabiltzen dira: LCO_2 eta LN_2. Karbono dioxidoa ingurugiroko tenperaturan gordetzen da presio altuko ontzietan, 55-60 bar inguruan. Nitrogeno likidoari dagokionez, ordea, karbono dioxido likidotuaren aurkari zuzena dena, nahiz eta hozte-ahalmen handiagoa izan, –196ºC-tan gorde behar izaten da ontzi isolatuetan. Tenperatura horretan, nitrogeno likidoa irakiten dago uneoro, eta horrek galerak dakartza. Bestalde, ingurugiroari dagokionez, aztarna ekologikoa nabarmen murriztea lortzen da hozgarri kriogenikoak erabiliz, olio mineralekin/sintetikoekin/biodegradagarriekin alderatuz. Pereirak eta bestek hozgarri-sistema desberdinen inpaktuak aztertu zituzten [2]. Horretarako, hozte-sistema horien bizi-zikloa ikertu zen. 1. irudiak biltzen ditu lan horren ondorio nabarmenenak. Ikus daitekeenez, LCO_2 bidezko hozketa-metodoa garbiena da oliorik erabiltzen ez dutenen artean.

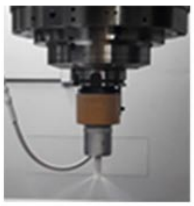
Mekanizazio-prozesuetan hozgarri bezala erabiltzeaz gain, LCO_2-ari erabilera anitza ematen zaio industrian. Enpresa ugari dira konposatu honen abantailak probetxuz kudeatzen dituztenak. CoolClean® da horietako bat. Enpresa honetan, autoklabe berezi batzuk garatu dira erreminta kirurgiko desberdinak esterilizatu ahal izateko. LCO_2 konposatua, materialen poroetan duen sarkortasun handia dela eta, osagai ortopedikoen garbitzeaz arduratzen da. Horrela, bakterioak ezabatzea lortzen da sarkortasun horri esker [10]. LCO_2 konposatua aukeratu da lan hori gauzatzeko, bere izaera garbi hori dela eta.



1. irudia. Hozgarri-sistema desberdinen bizi-zikloaren analisia [2].

Belaun-protesiko osagarri desberdinen mekanizaziorako erabili den LCO_2-aren injekziorako, BeCold® ekipoa erabili da. Ekipo hori UPV/EHUn garatu da Tecnaliaren laguntzarekin, eta HRE Hyrdaulics enpresaren bitartez banatu da. Aparailu horri esker, posible da –78ºC-tan dagoen LCO_2-a ebaketa-gunera helaraztea. Praxair konpainiak hornitutako jariakin honek (gaur egun, Nippon Gas enpresaren parte denak) % 99,9ko saturazio-maila du kanpo-patogenorik ez dadin sartu ebaketa-gunera mekaniza-

zio-prozesuan zehar. Erabilitako erreminta-euskarria LAIP enpresan aplikazio kriogenikoetarako garatutakoa da. Erreminta-euskarri horrek ez du oliorik edota koiperik erabiltzen lubrifikatzeko. 2. irudian ikusgai daude aipatutako erreminta-euskarri berezia eta BeCold® ekipoa.





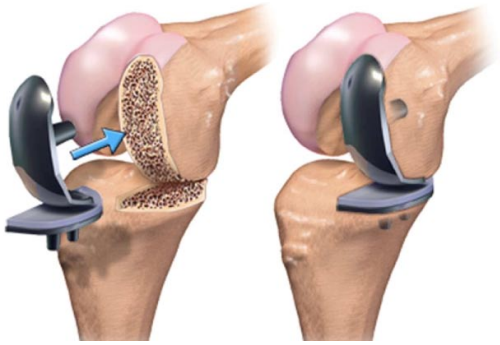
2. irudia. LCO_2 hozgarriaren injekzioan erabilitako osagai desberdinak.

3. **BELAUN-PROTESIAK**

Belaunaren ordezkapen-kirurgia belaunean dauden ehun kaltetuak, higatuak edo gaixotuak artikulazio artifizial batekin ordezkatzean datza (bereziki, kartilagoak eta hezurrak). Belaun-protesi horiek mota desberdinetakoak izan daitezke; horien artean, belaun-protesi totalak, konpartimentu bakarrekoak eta berrikuspenekoak. Pazientearen belaun gaixotuak duen higaduraren egoeraren edota aurretik jasandako kirurgien arabera, protesi bat edo bestea esleitzen zaio, eta, horrela, belaunari berriro funtzio egokia ematen zaio.

3.1. **Konpartimentu bakarreko belaun-protesia**

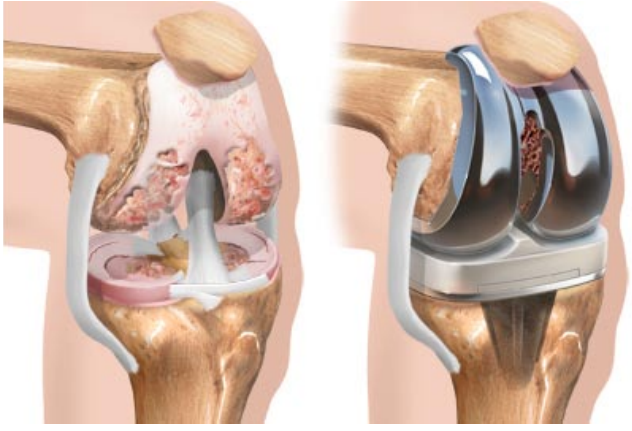
Pertsona batzuei belaunaren alde batean gehiago eragiten die belauneko artrosiak; hori dela eta garatu izan dira konpartimentu bakarreko protesiak (3. irudia). Artikulazioaren higadura belaunaren alde batera mugatzen denean erabiltzen dira konpartimentu bakarreko belaun-protesiak. Protesi horiek belaun-protesi totalen aldaera bat dira. Beren abantaila nagusia da teorikoki belaunaren funtzionaltasuna mantentzen dutela, belaunaren arkitektura artikularra mantendu egiten baita gehiengoan. Hala ere, horrelako inplanteen kasuan, artrosia belaunaren alde osasuntsura heda daiteke. Gainera, kirurgiaren ondoren, pazienteak jatorrizko sintomen hondar batzuk izan ditzake [11].



3. irudia. Konpartimentu bakarreko belaun-protesiaren inplantea [12].

3.2. **Belaun-protesi totala**

Egiten den inplanterik ohikoena da. Belauna osatzen duen artikulazio osoa ordezkatzen da (4. irudia). Modu horretan, konpartimentu bakarreko protesian gerta litekeen gaixotasuna hedatzea saihets liteke.



4. irudia. Belaun-protesi totala, inplantearen aurretik eta ondoren [13].

3.3. **Berrikuspeneko belaun-protesia**

Belaun-protesiek nekera egiten dute lan, eta, nahiz eta lan-baldintza horiek jasaten dituzten materialak erabili, higadura bat pairatzen dute urteetan zehar. Belaun-protesiek 20 urteko bizi-ziklo bat izaten dute, eta, epe hori igaro ostean, inplante berri bat jarri behar izaten zaio pazienteari. Berrikus-

peneko kirurgia horietan, hezurraren falta dela eta, produktu biologikoak erabiltzen dira protesi berriak hezurrarekin dituen hutsuneak betetzeko eta artikulazioa egonkortzeko. Kirtendun inplanteak dira horren aldaera bat, belauneko artikulazioa egonkortzen laguntzen dutenak (5. irudia).



5. irudia. Berrikuspeneko belaun-protesia [14].

Belaun-protesi totala da inplanteen kasurik ohikoena. Hori dela eta, mota horretako inplantea aztertuko da lan honetarako. Behin protesi mota aukeratuta, ezinbestekoa da protesi horren osagaiak identifikatzea. Belaun-protesi totalak lau osagai nagusi ditu:

— **Osagarri tibiala.** Tibiara loturik doan osagai metalikoa da.
— **Osagarri femorala.** Femurrera loturik doan osagai metalikoa da. Marruskadura-geruza bezala lan egiten du atal honek.
— **Txertatze meniskala.** Osagarri femoralaren eta tibialaren artean txertatzen den polietilenozko osagaia da. Marruskadura-geruza bezala lan egiten du osagarri femoralarekin batera.
— **Errotula osagarria.** Polietilenozko osagaia da. Ez da kasu guztietan erabiltzen; bere erabilera kirurgialariaren araberakoa da.

Aipatu bezala, zenbait osagai hezurrera finkatzen dira. Finkatze horiek bi motatakoak izan daitezke: zementua erabiliz edo zementua erabili gabe.

— **Zementua erabiliz.** Osagarri tibialean eta errotulan erabiltzen den finkatze-teknika da. Hezur-zementu bat erabiltzen da osagarriak ondo finkatzeko. Teknika honen abantailen artean dago, esaterako, protesiaren eta hezurraren lotura bat-batekoa dela. Hortaz, pazientea

oinez egiteko gai da mina eusteko gai izatearekin batera. Hala ere, hezur-zementua denboran zehar degradatu egiten da, eta faktore negatibo handia da hori.

— **Zementua erabili gabe.** Osagarri femoralean erabiltzen den teknika da. Kasu honetan, hezurrarekin bat egingo duen osagaiaren gainazalari testuradun akabera ematen zaio, hezurra bere inguruan hazteko eta horrela lotura zurrun bat sortzeko. Kasu honetan, pazientearen kirurgia aurreko hezur-egoerak baldintzatuko du loturaren zurruntasuna.

4. **BELAUN-PROTESIAREN FABRIKAZIO-PROZESUA**

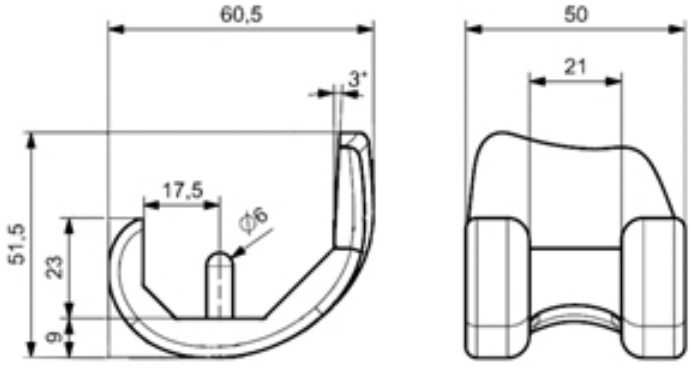
4.1. **Diseinua**

Edozein protesiren diseinua bezala, belaun-protesiaren diseinua konplexua da eta bakarra paziente bakoitzarentzat. Diseinua pazientearen gaixotasunaren egoeraren, adinaren eta aktibitate fisikoaren mailaren araberakoa da. Horretarako, zein protesi den egokiena aukeratzeko, nahitaezkoa da pazientearen inguruan ikerketa sakon bat egitea (belaunaren egoeraren analisia X izpien bitartez, besteak beste).

Lan honetan garatutako diseinua NX 12 softwareko CAD moduluan garatu da, eta B. Braun enpresaren Columbus® belaun-protesiko sisteman oinarritzen da. Honako atal honetan, osagarri bakoitzaren diseinua azalduko da.

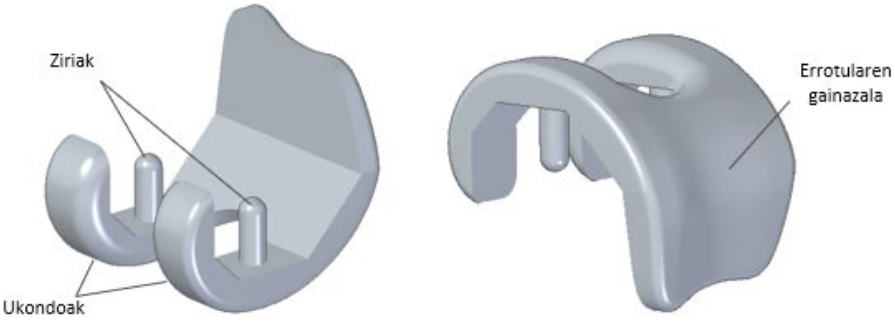
4.1.1. *Osagarri femorala*

Osagarri femorala femurrean txertatzen den osagaia da. Diseinua Columbus® PS zementatutako osagarri femoralean oinarritzen da, eta dimentsio esanguratsuenak B. Braun enpresak eskuragarri dituen katalogotik lortu dira. 6. irudian erakusten dira gauzatutako modeloaren dimentsio nagusiak.



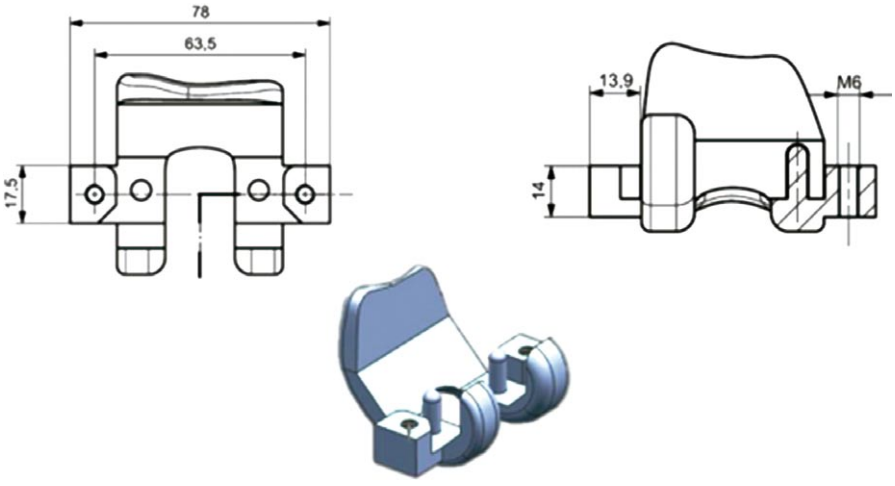
6. irudia. Osagarri femoralaren modeloaren dimentsio nagusiak.

Hiru atal nagusi bereiz daitezke geometria honetan: belaunaren flexio-estentsio mugimendua egonkortzen laguntzen duten bi ukondo simetrikoak, errotulak labaintzen duen gainazal kurbatua, eta hezurrarekin lotura hobetzen duten bi ziri (7. irudia). Mekanizazioaren ikuspegitik, errotularen gainazala eta ukondoak intereseko guneak dira, labainketa gertatzen baita gune horietan. Hortaz, marruskadurak eragin handirik izan ez dezan, bi gune horiek gainazal-akabera ona behar dute; hori dela eta, gune horiei txartaketa-eragiketak aplikatzen zaizkie orokorrean.



7. irudia. Osagarri femoralaren diseinua.

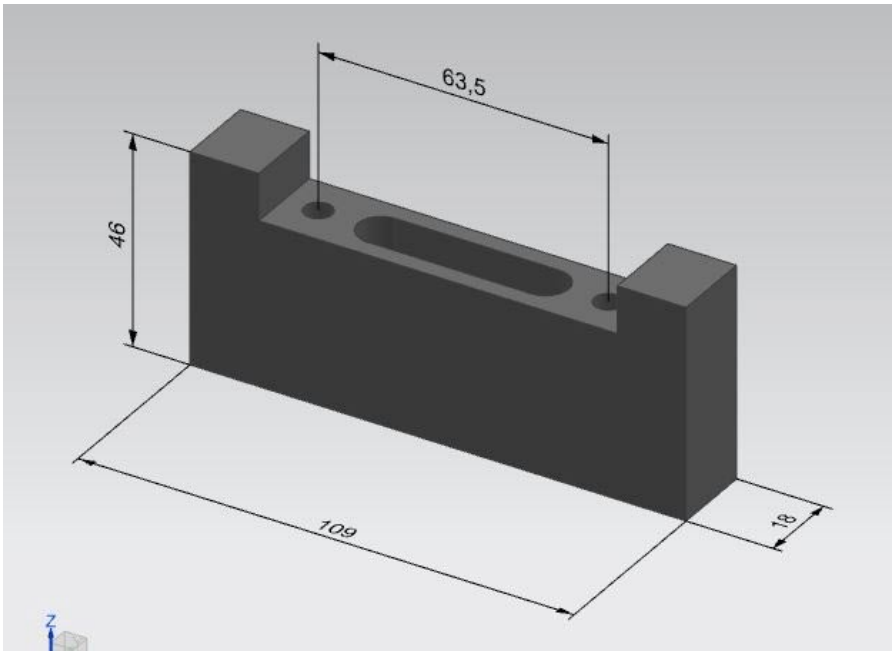
Osagarri honen mekanizazioa bi loturatan egin behar da bere konplexutasun geometrikoagatik. Bigarren lotura errazteko, betiere pieza kaltetu gabe, oinarrizko geometriari bi belarri gehitu zaizkio pieza euskarrira lotu ahal izateko torlojuen bitartez (8. irudia).



8. irudia. Pieza aldatuaren dimentsioak.

https://doi.org/10.1387/ekaia.21904

Osagarri femoralaren bigarren lotura mekanizatzeko, U formako geometria duen pieza-euskarri bat diseinatu da (9. irudia). Pieza-euskarria alderik alde zeharkatzen duten bi zuloei esker, osagarri femorala zurrunki lotzen da belarrietatik. Bi zulo horien arteko materiala hustu egin da ziriei lekua egiteko.

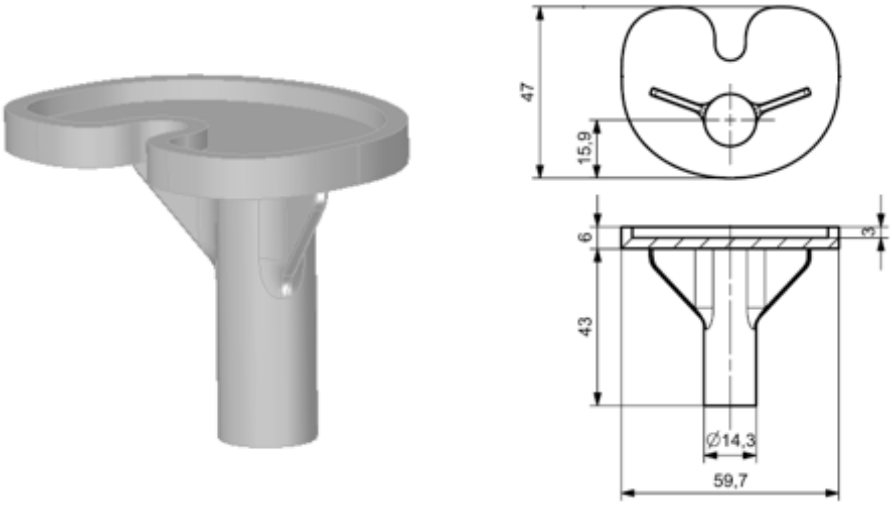


9. irudia. Osagarri femoralaren bigarren lotura mekanizatzeko pieza-euskarriaren geometria.

4.1.2. *Osagarri tibiala*

Osagarri femoralaren kasuan bezala, lan honetarako garatu den modeloa CR/PS tibiako lautada modularrean oinarritzen da. Dimentsio nagusiak Columbus® katalogoan daude.

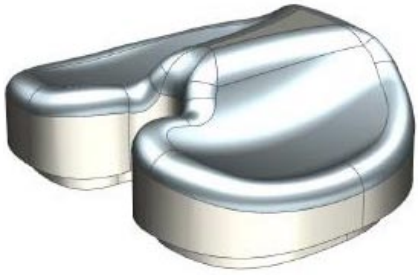
Osagarri tibialaren geometria konplexua dela eta, pieza hori ezin da mekanizatu lotura batean makinaren muga zinematikoak direla eta. Ondorioz, bi loturatan egin behar da, osagarri femorala bezala. Hala ere, oraingo honetan geometriak ez duenez euste-sistema berezirik behar, ez da aldatu beharko piezaren geometria.



10. irudia. Osagarri tibialaren modeloa eta dimentsio esanguratsuak.

4.1.3. *Txertatze meniskala*

Txertatze meniskala pisu molekular altuko polietilenoz egin ohi da. Lan honetan ABS materialez egitea proposatu da, inpresio bidez egiteko. Pieza hori osagarri tibialean kokatzen da, eta osagarri femoralarekin labaintzen du. Hori dela eta, bi kontaktu-gainazal horiek kontuan izanik garatu da osagarri honen diseinua. 11. irudian erakusten da diseinatu den geometria.



11. irudia. Txertatze meniskalaren modeloa.

4.2. **Muntatze esperimentala**

Muntatze esperimentalari dagokionez, bost ardatzeko Kondia HS-1.000 mekanizazio-zentroan garatu da lan hau. Kondia HS-1000 bost ardatzeko mekanizazio-zentroa da, Heidenhain iTNC530 zenbakizko kontrola barneratzen duena. Eragingailu nagusiaren biraketa-abiadura maximoa

18.000 bira/min da, eta potentzia 18 kW. Hiru ardatz linealen (X, Y, Z) eta bi errotazioko ardatzen (B, C) interpolazioak ahalbidetu du lan honen egituratzea. Hozgarri-teknikari dagokionez, lehenago aipatu den BeCold® ekipoa erabili da LAIP enpresan garatutako erreminta-euskarriarekin batera, CO_2 hozgarria ebaketa-gunera helarazteko. Materialari dagokionez, gizakiaren organismoarekin bateragarriak diren materialen artean, titanio-aleazioa aukeratu da. Zehazki 23. graduko Ti_6Al_4V aleazioa, ELI (Extra Low Instersticial) edo gradu medikoko titanio bezala ere ezagutzen dena. Aeronautikan erabiltzen den 5. graduko Ti_6Al_4V aleazioarekin alderatuz trakzioarekiko erresistentzia eta isurpen-muga baxuagoak erakusten dituen materiala den arren, ezpurutasun interstizialen kopurua txikiagoa izateak biobateragarritasuna hobetzea dakar [15]. Bere propietateak 1. taulan daude eskuragarri.

1. taula. ELI graduko titanio-aleazioaren propietateak [16].

Trakzioarekiko erresistentzia MPa	Isurpen-muga (% 0,2) MPa	4D elongazioa % min	Azaleraren estrikzioa % min
860	790	10	25

Erabilitako erremintei dagokienez, metal gogorrezko erremintak erabili dira TiAlN estaldurarekin. Piezaren erradio kritikoak eta erremintaren luzera konpromisoan jartzen duten distantzia kritikoak aztertuz, 2. taulak biltzen ditu belaun-protesiko osagarriak mekanizatzeko erabili diren erremintak. 12. irudian daude ikusgai erreminta horiek.

2. taula. Erreminten datu orokorrak.

Aukeratutako erremintak				
Id.	Erreminta	Diametroa (mm)	Operazio mota	Erreferentzia
T00	Zunda			
T01	Boladun fresa	4	(Erdi)akabera	VF4SVBR0200
T02	Fresaketa-erreminta laua	4	(Erdi)akabera	VFJHVD0400
T03	Fresaketa-erreminta torikoa*	10	(Erdi)akabera	VF6MHVRBCHD1000R050
T04	Boladun fresa	12	(Erdi)akabera	VF4SVBR0600
T05	Fresaketa-erreminta laua	12	Arbastaketa	VFSFPRD1200
T06	Boladun fresa	16	(Erdi)akabera	VF4SVBR0800
T07	Barautsa	5	Zulaketa	IZAR 8415-16945

(*) biribiltze-erradioa = 0,5 mm.



12. irudia. Erreminten aukeraketa.

Mekanizazio-operazioetan erabilitako ebaketa-baldintzak erreminta hornitzaileak aholkatutakoak dira. Hala ere, erremintaren murgilketarekin erlazionatutako aldagaiak doitu egin dira operazio bakoitzaren kasuistikara. 3. taulan laburtzen dira aldagai horiek, non:

Vc (m/min): ebaketa-abiadura.
D (mm): diametroa.
S (bira/min): biraketa-abiadura.
V_f (mm/min): aitzinapen-abiadura.
a_e (mm): iraganaldiko sakonera erradiala.
a_p (mm): iraganaldiko sakonera axiala.

3. taula. Erreminten ebaketa-aldagaiak.

Id.	Erreminta	D (mm)	Vc (m/min)	S (bira/min)	V_f (mm/min)	a_p (≤ mm)	a_e (≤ mm)
T01	BALL-D4	4	150-200	18000 (12000)	4000 (1700)	0,33	≤1
T02	MILL-D4	4	75	6000	510	≤1,5D	≤0,05D
T03	MILL-D10	10	150	4800	2000	≤1,5D	≤0,1D
T04	BALL-D12	12	150-200	6000 (4000)	3000 (1300)	1,2	≤3
T05	MILL-D12	12	60	1600	320	≤1,5D	≤0,5D
T06	BALL-D16	16	150-200	4500 (3000)	2500 (1100)	1,6	≤4
T07	DRILL-D5	5	35-50	2005–2860	135-193	5xD	D

* Boladun erremintetan, parentesi arteko balioak $\alpha > 15^o$ inklinazio-kasuari egiten diote erreferentzia.

4.3. **Mekanizatze-estrategiak**

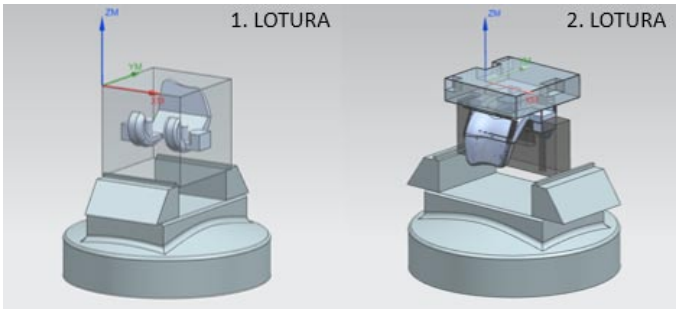
Mekanizazio-prozesu batean hiru etapa nagusi bereizten dira. Alde batetik, arbastaketa-eragiketa, non material bolumen handiena kentzea bilatzen baita denbora laburrenean. Bestetik, erdiakabera, zeinetan aurrez aipatutako arbastaketa-eragiketak utzitako geometria mailakatua homogeneizatzea bilatzen baita. Honako etapa honetan, material gehigarri konstantea uztea bilatzen da pieza guztian, akabera-eragiketan ezegonkortasunik ager ez dadin. Etapa honetan, arbastaketan bezala, denborak murriztea bilatzen da; hori dela eta, sigi-saga estrategia erabiltzen da, erremintak joaneko zein itzulerako ibilbidean materiala harrotuz. Azken etapa akabera-eragiketa da. Atal honetan, pieza bukatzea da helburu, piezari akabera egokia emanez. Akabera, eragiketa kritikoena izanik, aldeko fresaketa bitartez mekanizatzea bilatzen da, egonkortasuna bermatzen duen metodoa baita [17]. Aldeko fresaketari esker, txirbil-lodiera txikituz doa bere balio maximotik zeroraino, erremintak ebaketa-gainazala txartatzea saihestuz zizailadura-fenomenoa eman aurretik. Geometria konplexua dutenez belaun-protesiko osagaiek, aldeko fresaketa-eragiketa bermatzeko, ezinbestekoa da makinaren bost ardatzak eta sigi estrategia konbinatzea. Modu horretan, erremintak piezaren gainazalarekiko duen posizionamendua konstante mantentzea lortzen da mekanizazio-prozesu osoan zehar, erremintaren joaneko ibilbidean materiala harrotuz.

Aipatu beharra dago, hiru etapa horiez gain, badirela bitarteko etapak (berrarbastaketa, esaterako), zeinetan arbastaketa orokor batean ezabatu ezin izan den materiala harrotzen baita.

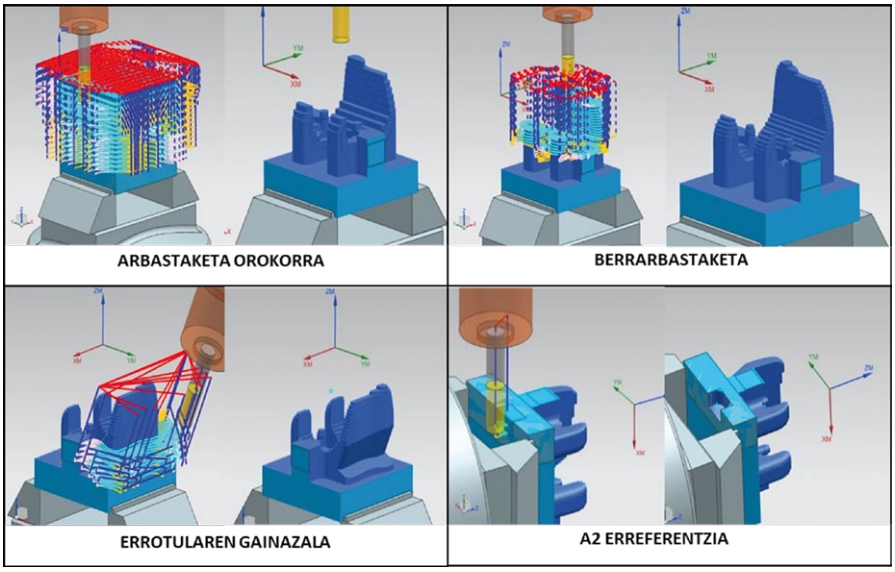
4.3.1. *Osagarri femorala*

Osagarri femoralaren geometria konplexua dela eta, beharrezkoa izan da makinaren bost ardatzen arteko interpolazioa. Bi loturatan egin da pieza hori (13. irudia), Ti_6Al_4V materialez egindako $80 \times 80 \times 80$ mm^3-ko kubo batetik abiatuz. Lehendabizi, piezaren zati bat gauzatu da, eta, jarraian, erreferentzia-sistema galdu gabe, pieza irauli da, eta beste aldea mekanizatu da. Bigarren lotura horretan, pieza finko mantendu ahal izateko, jada bukatutako gainazaletik kolpe egin gabe, euskarri berezi bat erabili da (9. irudia).

Lehenengo lotura arbastaketa orokor batekin hasi da, zeina material kantitate handiena harrotzean oinarritzen baita mekanizazio-denbora laburrenean. Pieza bukaerako geometriara hurbiltzeko, berrarbastaketa bat egin da, iraganaldi-sakonera murriztuz. Horrez gain, errotulak labaintzen duen gainazal kurbatuaren arbastaketa espezifiko bat egin da. Bukatzeko, bigarren loturarako erreferentzia izango den hutsunea mekanizatu da. 14. irudian erakusten dira eragiketa horiek. Erabilitako mekanizazio-aldagaiak, berriz, 4. taulan erakusten dira.



13. irudia. Osagarri femoralaren bi loturak mekanizazio-prozesuan.



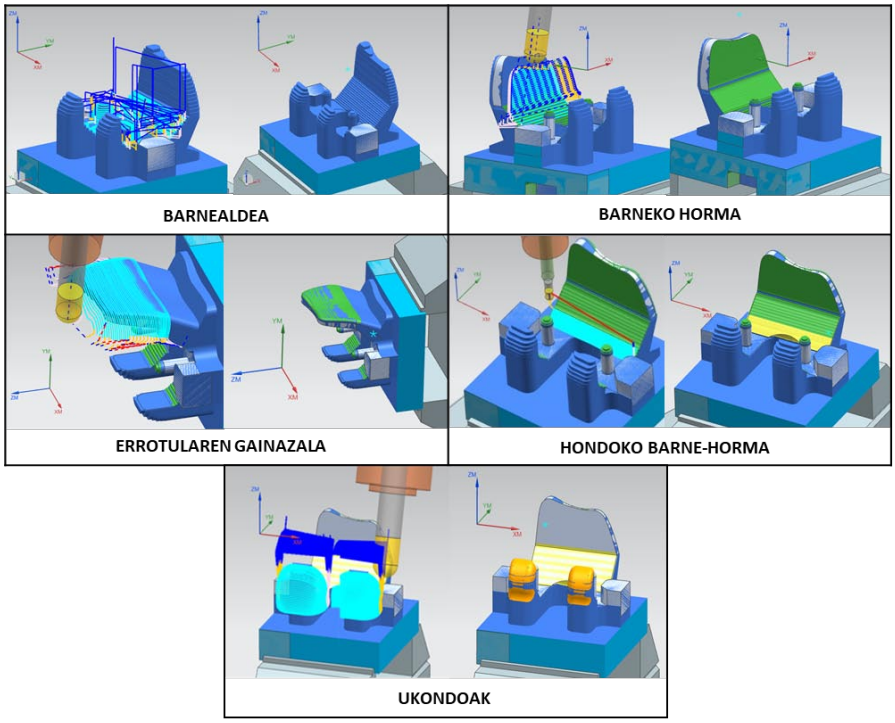
14. irudia. Osagarri femoralaren arbastaketa-estrategiak lehen loturan.

4. taula. Osagarri femoralaren arbastaketako mekanizazio-aldagaiak lehen loturan.

Eragiketa	Erreminta	(V_c – V_f – S – a_p – a_e)	Denbora (hh:mm:ss)
Arbastaketa orokorra	MILL-D12	60–320–1600–4–2,4	02:21:12
Berrarbastaketa	MILL-D12	60–320–1600–2–3	00:26:49
Errotularen gainazala	MILL-D12	60–320–1600–6–2,4	00:22:30
A2 erreferentzia	MILL-D12	60–320–1600–6–1,2	00:00:22
			03:10:53

* Aldagaien unitateak: V_c (m/min) – V_f (mm/min) – S (bira/min) – a_p (mm) – a_e (mm).

Gainerako prozesuak guneka egindako eragiketak izango dira. Hiru gune nagusi daude: barneko guneak (femurrarekin kontaktuan dauden gune guztiak), ukondoak eta errotularen gainazala. Erdiakabera-eragiketa horiekin gainazal homogeneo bat uztea bilatzen da, 0,2 mm-ko akaberarako soberakina utziz. 15. irudian erakusten dira eragiketa horiek. Erabilitako mekanizazio-aldagaiak, berriz, 5. taulan erakusten dira.



15. irudia. Osagarri femoralaren erdiakaberako estrategiak lehen loturan.

5. taula. Osagarri femoralaren erdiakaberako mekanizazio-aldagaiak lehen loturan.

Eragiketa	Erreminta	(V_f – S – a_p – a_e)	Denbora (hh:mm:ss)
Barnealdea	MILL-D4	510–6000–1–0,2	00:27:59
Barneko horma	BALL-D12	3000–6000–0,8–1	00:01:00
Errotularen gainazala	BALL-D12	3000–6000–0,8–1	00:01:12
Hondoko barne-horma	BALL-D4	4000–18000–0,25–0,5	00:01:35
Ukondoak	BALL-D16	1100–3000–1,8–1	00:07:14
			00:39:00

* Aldagaien unitateak: V_f (mm/min) – S (bira/min) – a_p (mm) – a_e (mm).

Akabera-eragiketa piezaren barnealdea bukatzean oinarritzen da, ezin baita bigarren loturan gune horretara iritsi. Horrez gain, errotulak labaintzen duen gainazal kurbatua bukatzen da, bost ardatzen interpolazioa erabiliz. Modu horretan, erremintaren ardatzaren orientazioa konstante manten daiteke. Horri sigi estrategia bat erantsiz, aldeko fresaketa gauzatu daiteke gainazal-akabera hobe bat lortuz. Piezaren barneguneko gainazal lau guztiak 4 mm-ko diametrodun fresaketa-erreminta lau batekin egin dira, errotulak labaintzen duen gainazal kurbatuaren kontrako aldeko bi gainazalak izan ezik. Bi gune horiek 4 mm-ko diametroko boladun erreminta batekin gauzatu behar dira talkak saihesteko. Ukondoak bigarren loturan bukatu dira, gainazal uniforme bat utzi ahal izateko. 16. irudian erakusten dira eragiketa horiek. Erabilitako mekanizazio-aldagaiak, berriz, 6. taulan erakusten dira.

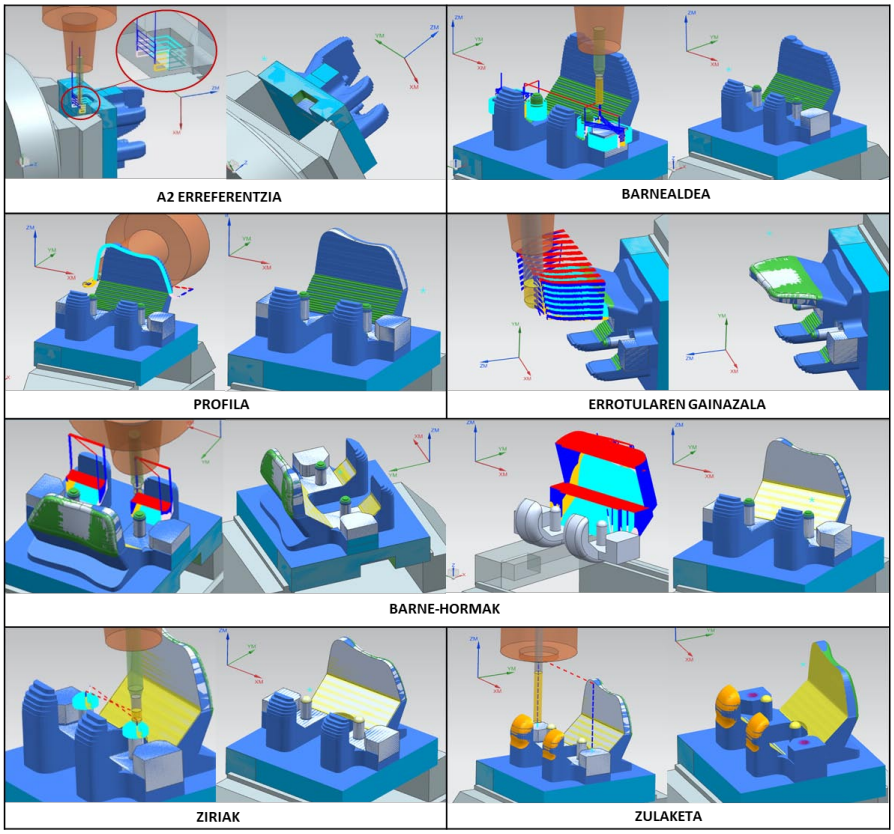
6. taula. Osagarri femoralaren akaberako mekanizazio-aldagaiak lehen loturan.

Eragiketa	Erreminta	(V_f – S – a_p – a_e)	Denbora (hh:mm:ss)
A2 erreferentzia	MILL-D4	510–6000–2,5–0,2	00:01:35
Barnealdea	MILL-D4	510–6000–2–0,2	00:20:19
Profila	MILL-D4	510–6000–4–0,2	00:02:31
Errotularen gainazala	BALL-D12	3000–6000–0,2–0,2	00:16:58
Barne-hormak	BALL-D4	4000–18000–0,2–0,1	00:34:03
Ziriak	BALL-D4	4000–18000–0,2–0,1	00:03:49
Zulaketa	DRILL-D5	135–2500–15-5	00:00:19
			01:19:34

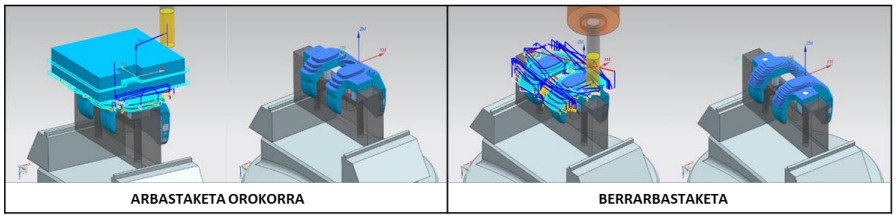
* Aldagaien unitateak: V_f (mm/min) – S (bira/min) – a_p (mm) – a_e (mm).

Zulaketa-eragiketak egin ondoren, lehenengo lotura bukatutzat eman daiteke. Hala ere, eskuzko eragiketa gehigarri bat egin beharko da; azken eragiketan mekanizatutako bi zuloen hariztaketa, alegia. Modu horretan, U formako euskarrian lot daiteke pieza, bigarren loturako eragiketak gauzatzeko.

Lehenengo loturan bezala, bigarren lotura honetan gauzatu den lehenengo eragiketa mailaz mailako arbastaketa orokor bat izan da (Z ardatzean). Horri jarraituz, berrarbastaketa-eragiketa bat egin da iraganaldi-sakonera txikiago batekin pieza bukaerako geometriara hurbiltzeko. 17. irudian erakusten dira eragiketa horiek. Erabilitako mekanizazio-aldagaiak, berriz, 7. taulan erakusten dira.



16. irudia. Osagarri femoralaren akaberako estrategiak lehen loturan.



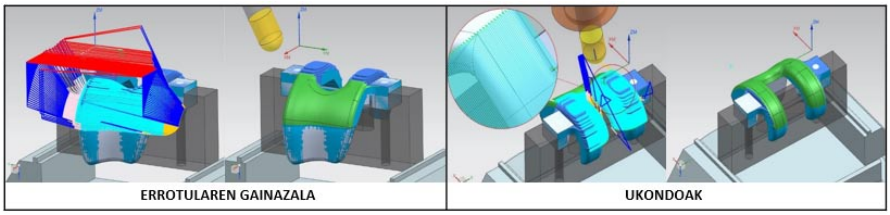
17. irudia. Osagarri femoralaren arbastaketa-estrategiak bigarren loturan.

7. taula. Osagarri femoralaren arbastaketako mekanizazio-aldagaiak bigarren loturan.

Eragiketa	Erreminta	(V_c – V_f – S – a_p – a_e)	Denbora (hh:mm:ss)
Arbastaketa orokorra	MILL-D12	60–320–1600–10–2,4	00:37:30
Berrarbastaketa	MILL-D12	60–320–1600–1–3,6	00:15:32
			00:53:02

* Aldagaien unitateak: V_c (m/min) – V_f (mm/min) – S (bira/min) – a_p (mm) – a_e (mm).

Arbastaketaren ondoren egin diren bi erdiakabera-eragiketek gainazalak leuntzea dute helburu, 0,2 mm-ko akaberarako soberakina utziz. Ukondoen mekanizazioan sigi-saga estrategia erabili da mekanizazio-denbora murrizteko. Errotularen gainazalean ezin izan da estrategia hori erabili, makinak talkak antzematen baitzituen. 18. irudian erakusten dira eragiketa horiek. Erabilitako mekanizazio-aldagaiak, berriz, 8. taulan erakusten dira.

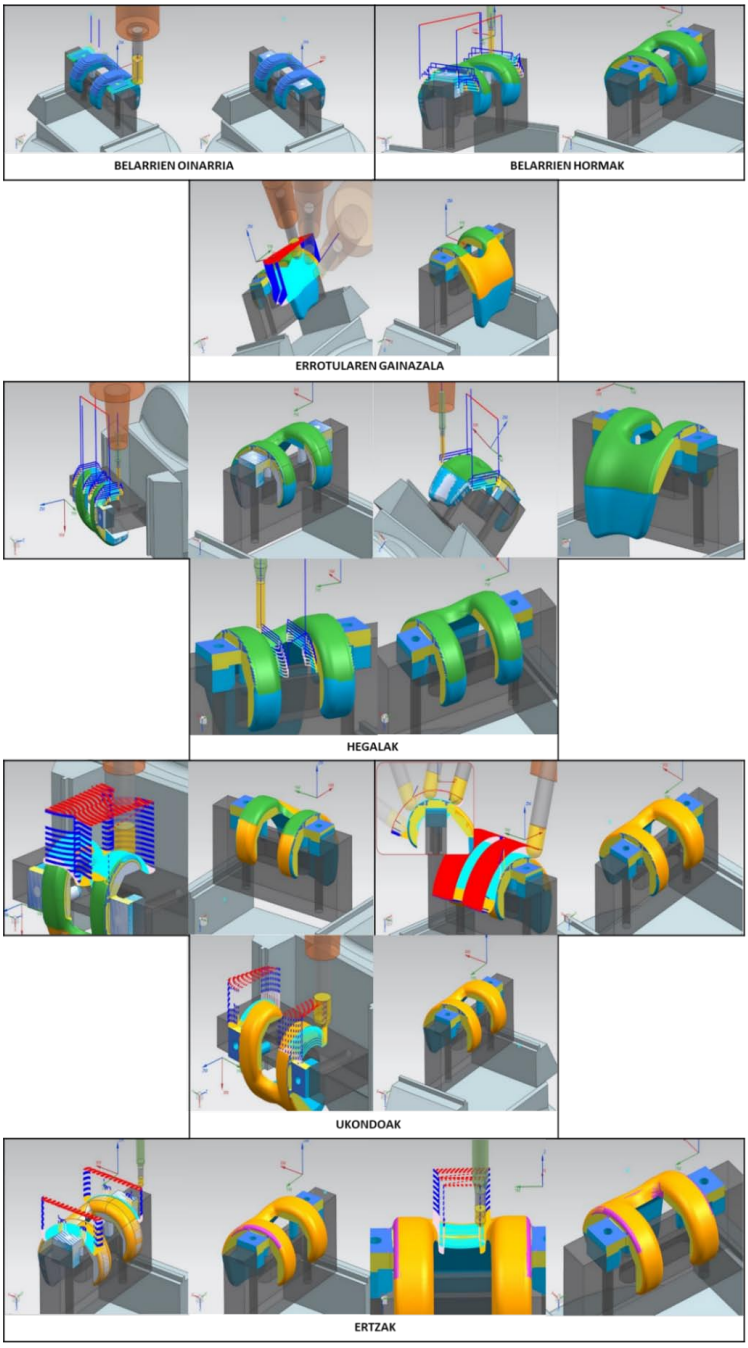


18. irudia. Osagarri femoralaren erdiakabera-estrategiak bigarren loturan.

8. taula. Osagarri femoralaren erdiakaberako mekanizazio-aldagaiak bigarren loturan.

Eragiketa	Erreminta	(V_f – S – a_p – a_e)	Denbora (hh:mm:ss)
Errotularen gainazala	BALL-D16	1100–3000–1,2–1	00:06:02
Ukondoak	BALL-D16	1100–3000–1,2–0,4	00:05:56
			00:11:58

* Aldagaien unitateak: V_f (mm/min) – S (bira/min) – a_p (mm) – a_e (mm).



19. irudia. Osagarri femoralaren akabera-estrategiak bigarren loturan.

Lehenengo loturan bezala, gune lauak 4 mm-ko diametroko fresaketa-erreminta lauarekin bukatu dira. Nahiz eta piezaren parte ez izan, belarriei akabera-eragiketa gauzatu behar izan zaie, horiek zenbait gune mekanizatzeko irismena zailtzen baitute. Behin akabera-eragiketak bukatuta daudela, ebaketa-prozesu gehigarri bat gauzatu beharko da belarri horiek piezatik banatzeko. 19. irudian erakusten dira eragiketa horiek. Erabilitako mekanizazio-aldagaiak, berriz, 9. taulan erakusten dira.

9. taula. Osagarri femoralaren akaberako mekanizazio-aldagaiak bigarren loturan.

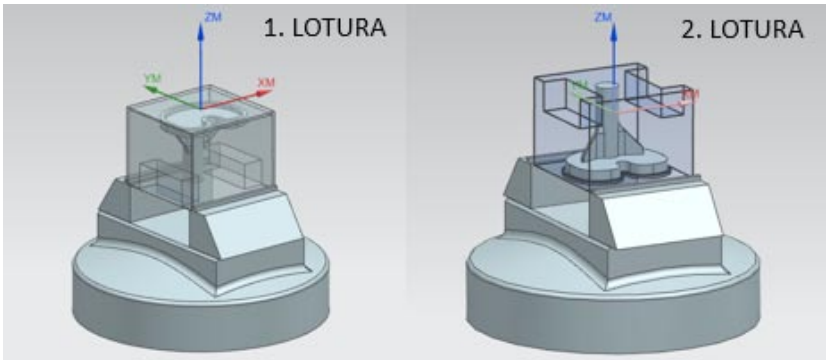
Eragiketa	Erreminta	(V_f – S – a_p – a_e)	Denbora (hh:mm:ss)
Belarrien oinarria	MILL-D12	320–1600–1,3–2,4	00:01:24
Belarrien hormak	MILL-D4	510–6000–4–0,4	00:02:40
Errotularen gainazala	BALL-D12	3000–6000–0,2–0,2	00:15:02
Hegalak	MILL-D4	510–6000–2–0,2	00:05:34
Ukondoak	BALL-D12	3000–6000–0,2–0,2	00:15:32
Ertzak	BALL-D4	4000–18000–0,2–0,1	00:01:17
			00:41:29

* Aldagaien unitateak: V_f (mm/min) – S (bira/min) – a_p (mm) – a_e (mm).

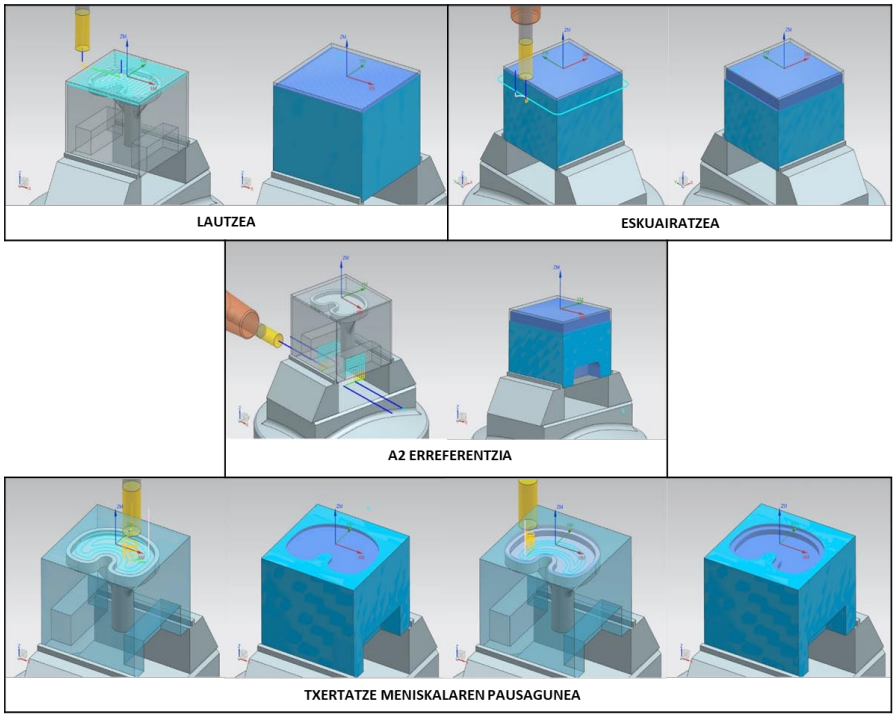
Lehenengo loturako akabera-eragiketan bezala, mekanizazio-zentroaren bost ardatzen interpolazioari esker erremintaren posizioa konstante mantendu ahal izan da mekanizazio-prozesu osoan barrena. Modu horretan, boladun erremintak zentroarekin moztea ekiditen da, V_c nulua baita puntu horretan. Gainera, sigi estrategiari esker aldeko fresaketa egin da, gainazal-akabera hobea lortuz.

4.3.2. *Osagarri tibiala*

Osagarri femoralak ez bezala, osagarri tibialak ez du behar mekanizazio-zentroaren bost ardatzen interpolaziorik. Oraingo honetan nahikoa da hiru ardatzen interpolazioarekin. Osagarri tibiala ere, osagarri femorala bezala, bi loturatan egin da 80 × 80 × 80 mm^3-ko Ti_6Al_4V materialezko kubo batetik abiatuz (20. irudia). Piezaren formari esker, material gehigarritik lotu da pieza bigarren loturan, pieza eusteko euskarri berezien beharrik gabe.



20. irudia. Osagarri tibialaren bi loturak mekanizazio-prozesuan.



21. irudia. Osagarri tibialaren arbastaketa-estrategiak lehenengo loturan.

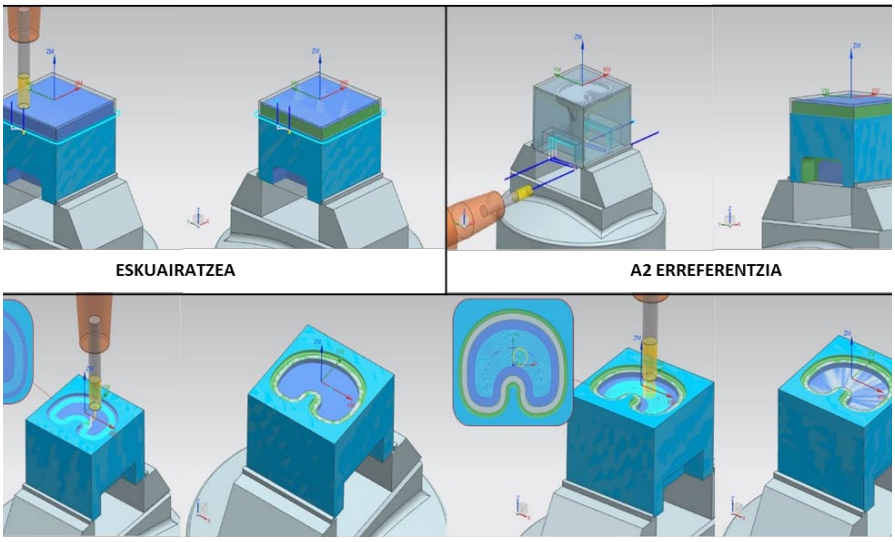
Osagarri tibialaren lehenengo loturako mekanizazio-eragiketek bi helburu dituzte: lehenik eta behin, pieza bigarren loturarako prestatzea, lotura-gunea prestatuz eta erreferentzia-marka mekanizatuz, eta, bigarrenik, txertatze meniskala pausatuko den gainazala guztiz bukatzea. Bigarren lo-

turarako prestaketan, lehenik eta behin, lautze- eta eskuairatze-eragiketak gauzatu dira piezaren lerrokatze egokia bermatzeko. Barailak bigarren loturan pieza eskuairatu den gunetik kolpeko du. Jarraian, piezaren erreferentzia ez galtzeko, bi erreferentzia-ahokalekuak mekanizatu dira. Piezaren bigarren loturarako prestaketak bukatu eta gero, txertatze meniskala pausatuko den gainazala mekanizatu da arbastaketa- eta akabera-eragiketak gauzatuz. 21. irudian eta 22. irudian erakusten dira eragiketa horiek. Erabilitako mekanizazio-aldagaiak, berriz, 10. taulan eta 11. taulan erakusten dira.

10. taula. Osagarri tibialaren arbastaketaren mekanizazio-aldagaiak lehenengo loturan.

Arbastaketa			
Eragiketa	Erreminta	(V_c – V_f – S – a_p – a_e)	Denbora (hh:mm:ss)
Lautzea	MILL-D12	60–320–1600–2–2,4	00:05:41
Eskuairatzea	MILL-D12	60–320–1600–5–1,3	00:02:20
A2 erreferentzia	MILL-D12	60–320–1600–16–1,2	00:05:26
Txertatze meniskalaren pausagunea	MILL-D12	60–320–1600–6–2,4	00:05:11
			00:18:38

* Aldagaien unitateak: V_c (m/min) – V_f (mm/min) – S (bira/min) – a_p (mm) – a_e (mm).



22. irudia. Osagarri tibialaren akabera-estrategiak lehenengo loturan.

11. taula. Osagarri tibialaren akaberako mekanizazio-aldagaiak lehenengo loturan.

Akabera			
Eragiketa	Erreminta	(Vc – Vf – S – ap – ae)	Denbora (hh:mm:ss)
Eskuairatzea	MILL-D10	150–2000–4800–5–0,5	00:00:23
A2 erreferentzia	MILL-D10	150–2000–4800–5,3–0,4	00:00:25
Txertatze meniskalaren pausagunea	MILL-D10	150–2000–4800–6–0,5	00:01:03
			00:01:51

* Aldagaien unitateak: V_c (m/min) – V_f (mm/min) – S (bira/min) – a_p (mm) – a_e (mm).

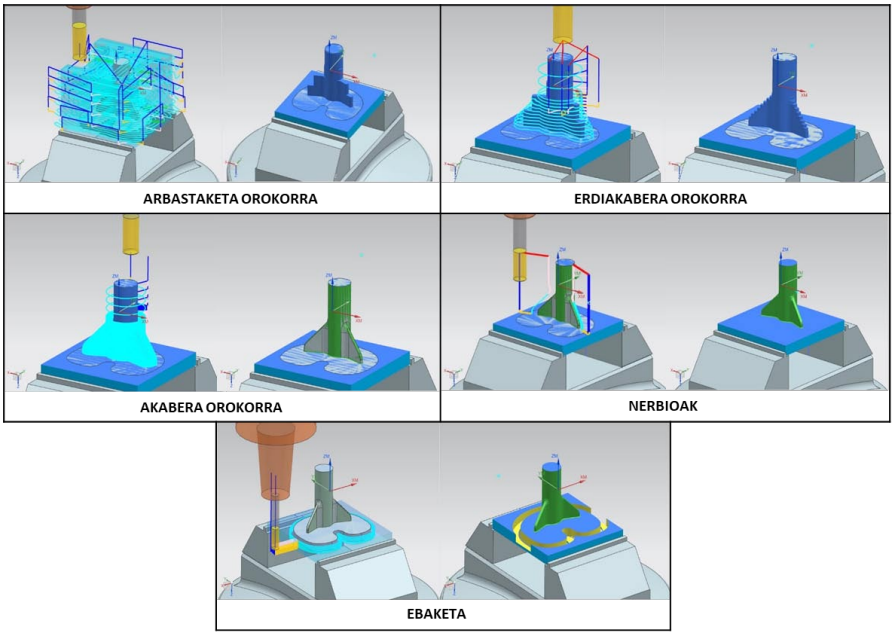
Bigarren loturari dagokionez, arbastaketa orokor bat egin da 12 mm-ko fresaketarako erreminta lauarekin iraganaldi-sakonera axial handiak erabiliz, modu horretan erremintaren luzera erabilgarria aprobetxatuz eta mekanizazio-denbora murriztuz. Ondoren, erdiakabera eta akabera orokorrak gauzatu dira, zeinetan Z ardatzeko maila desberdinetan inguraketa-eragiketak gauzatu baitira. Zurtoin zilindrikoan, nerbioekin alderatuz, iraganaldi-sakonera handiagoak erabili dira, modu horretan bukaerako geometriara gehiago hurbilduz. Nerbioei akabera-eragiketa bat egin zaie aurreko eragiketak utzitako zerra-hortz formako irtenguneak leuntzeko.

12. taula. Osagarri tibialaren arbastaketa, erdiakabera eta akaberako mekanizazio-aldagaiak bigarren loturan.

Eragiketa	Erreminta	(V_c – V_f – S – a_p – a_e)	Denbora (hh:mm:ss)
Arbastaketa			
Arbastaketa orokorra	MILL-D12	60–320–1600–10–2,4	00:39:38
			00:39:38
Erdiakabera			
Erdiakabera orokorra	MILL-D12	60–320–1600–6–2,4	00:07:02
			00:07:02
Akabera			
Akabera orokorra	MILL-D10	150–2000–4800–5–0,5	00:03:23
Nerbioak	MILL-D10	150–2000–4800–0,2–0,3	00:01:17
Ebaketa	MILL-D4	57–200–4500–1–4	00:07:44
			00:11:24

* Aldagaien unitateak: V_c (m/min) – V_f (mm/min) – S (bira/min) – a_p (mm) – a_e (mm).

Osagarri femoralarekin alderatuz, osagarri tibialak ez du behar ebaketa-prozesu gehigarririk material gehigarria kentzeko. Oraingo honetan, piezaren eta material gehigarriaren arteko banaketa artekaketa-prozesu batekin gauzatu da. Eragiketa horretan, 4 mm-ko fresaketa-erreminta lauarekin, txertatze meniskalaren pausagunea izango den geometriari inguraketa-eragiketa aplikatuko zaio, eta bi gorputzak bananduko dira modu horretan. Eragiketa hori torneaketako trontzaketa-eragiketaren hurbilketa bat da. Osagarri tibiala deforma ez dadin, iraganaldi-sakonera axial txikiak erabili dira, eta, modu horretan, eragiketan sortutako indarrak murriztu dira. 23. irudian erakusten dira eragiketa horiek. Erabilitako mekanizazio-aldagaiak, berriz, 12. taulan erakusten dira.



23. irudia. Osagarri tibialaren arbastaketa, erdiakabera eta akabera estrategiak bigarren loturan.

4.3.3. *Txertatze meniskala*

Bi aukera aurkitu dira txertatze meniskala fabrikatzerako orduan. Alde batetik, 3D-ko inpresioaren bidezko fabrikazioa, eta, bestetik, mekanizazio-zentro batean pieza mekanizatzea pieza gordin batetik abiatuz.

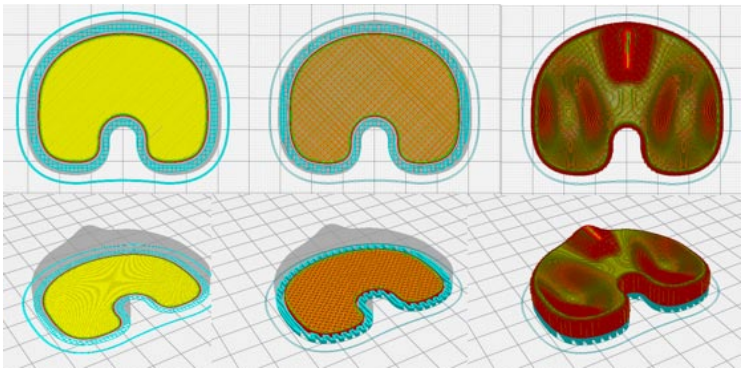
Lan hau garatzeko, inpresio bidezko metodoa aukeratu da. Horretarako, Stratasys SST 1200es (STRATASYS LDT., Minnesota, Estatu Ba-

tuak) 3D inprimagailua erabili da (**24. irudia**). Piezaren zehaztasuna grabatuen zehaztasunarekin lotuta dago, eta hori geruzen lodierarekin. SST 1200 makinak bi geruza-lodiera desberdinen erabilera baimentzen du: 0,254 mm (0,010 hazbete) eta 0,33 mm (0,013 hazbete). Kasu honetan, txertatze meniskalaren fabrikaziorako 0,254 milimetroko geruza-lodiera hautatu da. Bereizmenari dagokionez, geruza-lodieraren bereizmenak XY planoaren bereizmena gainditzen du. 3D inprimagailuaren bereizmena tenperaturaren araberakoa da; lan honetan neurtutako tenperaturak 18-30ºC izan dira.



24. irudia. Stratasys SST 1200 3D inprimagailua.

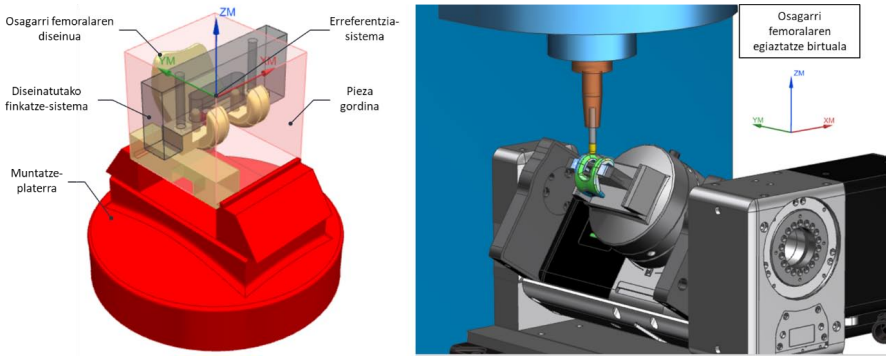
Pieza hau ABS materialez egin da, eta prozesuak 3 ordu eta 20 minutu iraun ditu. Inprimagailuari hari forman elikatzen zaio materiala. Materialaren kontsumoa 16 g izan da pisuan, eta 5,37 metro luzeran. Pieza horri erabilera errealik ez zaionez emango, ez da egin pieza konpaktu bat; hau da, pieza barrutik hustu egin da prozesua azkartzeko. Horrez gain, aipatzekoa da fabrikazio-prozesua egonkortzeko euskarriak gehitu direla. 25. irudian txertatze meniskalaren inpresioko hiru fase erakusten dira. Ezkerraldean lehenengo geruza erakusten da, guztiz beteta ageri dena. Erdian, tarteko geruza bat erakusten da; esan bezala, erabilerarik izango ez duenez, barnealdetik hustu egin da. Bukatzeko, eskuinean, piezaren azken geruza erakusten da.



25. irudia. Txertatze meniskalaren inpresio faseak.

4.4. **Egiaztatze birtuala**

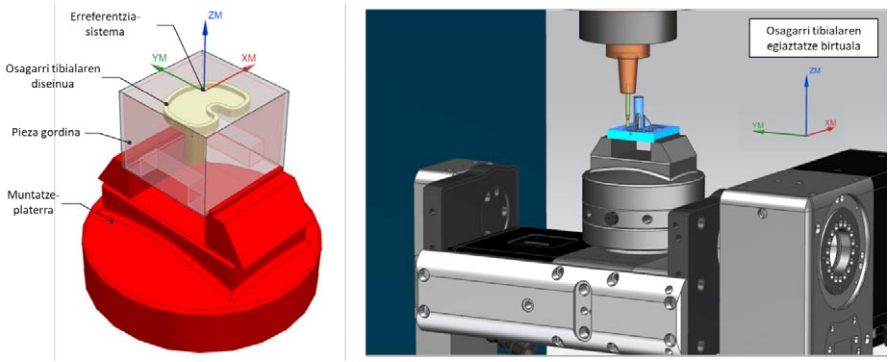
Geometria zailen fabrikazio-prozesuetan, beharrezkoa da egiaztatze birtuala egitea. Egiaztatze birtualak argitzen du CAM programan diseinatutako ibilbideetan zehar talkak gertatzen diren ala ez. Makinaren osagaien, erremintaren eta piezaren arteko talka horiek kalkulatzeko, beharrezkoa da makinaren errepresentazio bat edukitzea. 26. irudian erakusten dira piezaren kokapena, erremintaren kokapena eta makinaren kokapena (ardatzen errepresentazioekin). Horrez gain, osagarri femorala gauzatzeko behar den material gordina erakusten da, eta baita pieza errazago irauli dadin erabili den U formako brida ere.



26. irudia. Osagarri femoralaren muntaketa (ezk.) eta egiaztatze birtuala (esk.).

27. irudian errepresentazio berbera erakusten da, baina kasu honetan osagarri tibialaren kasurako. Elementu horren fabrikazioan ez da beharrez-

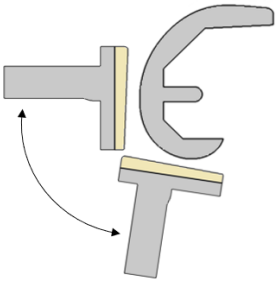
koa makinaren 5 ardatzen interpolazioa egitea, nahikoa da 3 ardatzekin egitea. Hori dela eta, oraingo honetan, egiaztatze birtuala erraztu egiten da.



27. irudia. Osagarri tibialaren diseinua eta fabrikazio-osagaien definizioa (ezk.) eta egiaztatze birtuala (esk.).

5. **EMAITZAK**

Belaun-protesi batean, marruskadura-fenomenoa agertzen da txertatze meniskalaren eta osagarri femoralaren ukondoen artean. 28. irudian erakusten dira belauneko artikulazioaren mugimenduaren bi mugak: belaun-artikulazioa guztiz luzatuta eta guztiz tolestuta. Beharrezkoa da ukondo horiek akabera egokia izatea, osagai bien arteko mugimendua egokia izan dadin; hori dela eta, osagarri meniskalaren ukondoen gainazal-integritatea aztertuko da atal honetan.



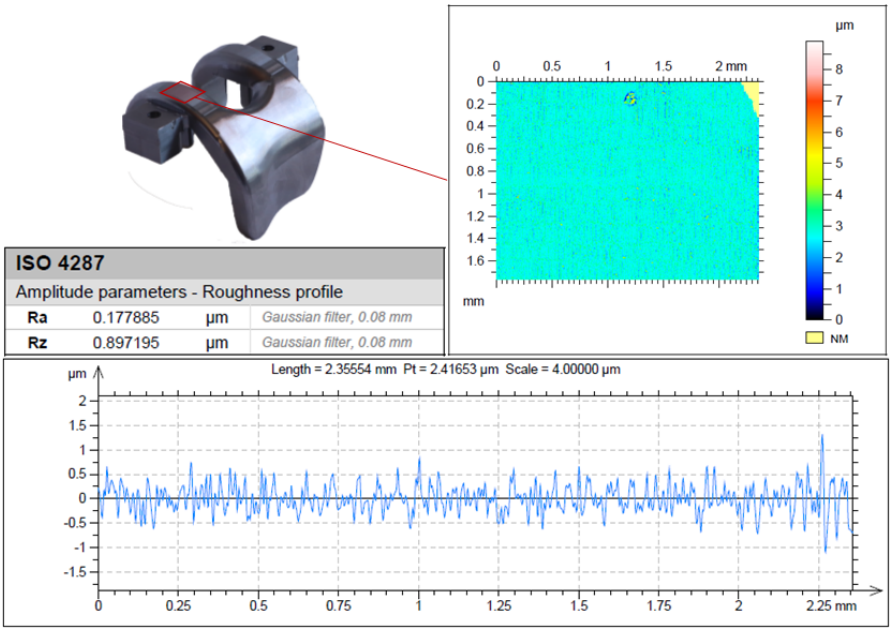
28. irudia. Belauneko artikulazioaren toleste- eta luzatze-mugimendua.

Neurketa hau 2,35 milimetroko luzera batean gauzatu da 0,08 milimetroko ebaketa-luzerarekin eta iragazki Gaussiarra erabiliz ISO 4288 iriz-

pideen arabera [18]. 30. irudian erakusten dira lortutako emaitzak. Neurtutako gainazalaren batez besteko zimurtasuna (Ra) 0,178 μm izan da, eta ondoz ondoko bost gailur-haranen arteko distantzien batezbestekoa 0,9 μm.



29. irudia. «Drag» txartaketa-makina [20].



30. irudia. Gainazal-zimurtasuna.

Osagarri femoralak, lehenago aipatutako txertatze meniskalarekin duen marruskadura dela eta, ezaugarri tribologiko egokiak behar ditu; hori dela eta, beharrezkoa da txartaketa-prozesu bat. Badira horrelako zenbait prozesu, horien artean *Drag* izenekoa, zeinetan gainazalaren batez besteko zimurtasuna (Ra) 1 μm-ko balio batetik abiatuz 0,02 μm inguruko balioak lor baitaitezke [19, 20]. Fabrikazio-prozesuaren atal hau ez da lan honen irismenetan aurkitzen; hala ere, ikus daitekeenez, lan honetan lortu den zimurtasuna piezaren hasierako balioen azpitik dago txartaketa-prozesu batean.

6. **ONDORIOAK**

Honako hauek dira lan honen ondorio nabarmenenak:

— Erdiakabera-eragiketen helburua ez denez akabera on bat uztea, sigi-saga estrategia erabili da sigi estrategiaren ordez. Modu horretan, erremintaren joaneko ibilbidea eta itzulerako ibilbidea aprobetxatzen dira materiala harrotzeko, erremintaren hutseko mugimenduak murriztuz. Gainera, murriztu egiten dira erremintaren sarrera eta irteeretan talkak gertatzeko aukerak. Alde batetik, sartze eta irtetze kopurua murrizten delako, eta, bestetik, mekanizazio-prozesua jarraiagoa delako.
— Sigi estrategiari esker eta erremintaren ardatzaren kokapenaren kontrolari esker, akabera-eragiketan 0,178 μm batez besteko zimurtasuna lortu da osagarri femoralak txertatze meniskalarekin kontaktuan lan egingo duen gunean.
— Egiaztatze birtualari esker, sortutako erremintaren ibilbideak frogatu dira makinan ager daitezkeen talka mota desberdinak aztertzeko. Horri esker, sortutako ibilbide okerrak zuzendu ahal izan dira, eta arrakastatsua izan da osagarri desberdinen gauzatzea.
— Erabilitako tresneriari dagokionez, hozgarria ebaketa-gunera bideratzeko erabili diren erreminta euskarriaz eta BeCold® ekipoaz gain, ez da behar izan aparteko eskaera berezidun tresnarik. Erabilitako mekanizazio-zentroa gama ertaineko mekanizazio-zentro bat izan da, ezaugarri estandarrak dituena. Erremintei dagokienez, ez da ezaugarri berezidun erreminten beharrik eduki.

7. **ESKER ONAK**

Esker bereziak Euskal Herriko 1377-19 unibertsitate-taldeari eta Zientzia Ministerioari (DPI2016-74845-R proiektua). Halaber, egileek eskerrak eman nahi dizkiote UPV/EHUko Berrikuntza, Gizarte Konpromiso eta Kultur Ekintzako errektoreordeari (Eusko Jaurlaritzaren Bizialab

programa), Eusko Jaurlaritzari KK-2020/00102 erreferentziarekin, eta PROCODA Elkartek proiektuari KK-2019/00004 erreferentziarekin. Bukatzeko, autoreek eskerrak eman nahi dizkiote Espainiako Zientzia Ministerioari ere (PID2019-104488RB-I00 proiektua).

BIBLIOGRAFIA

[1] Pereira, O., Urbikaín, G., Rodríguez, A., Fernández-Valdivielso, A., Calleja, A., Ayesta, I., López de Lacalle, L.N. (2017). Internal cryo lubrication approach for Inconel 718 milling. Procedia Manufacturing, 13, 89-93.

[2] Pereira, O., Rodríguez, A., Fernández-Abia, A.I., Barreiro, J., López de Lacalle, L.N. (2016). Cryogenic and minimum quantity lubrication for an eco-efficiency turning of AISI 304, Journal of Cleaner Production, 139, 440-449.

[3] Pereira, O., Martín-Alfonso, J.E., Calleja, A., Fernández-Valdivielso, A., López de Lacalle, L.N. (2017). Sustainability analysis of lubricant oils for mínimum quantity lubrication based on their tribo-rheological performance, Journal of Cleaner Production, 164, 1419-1429.

[4] Nieto-Díez, M.I. (2017). Clínica, epidemiología y pronóstico de la infección de prótesis articular, PhD Thesis University of Sevilla.

[5] Prácticas y tendencias en el proceso de atención de las artoplastias primarias totales de rodilla y cadera. Situación en España 2018. Sociedad Española de Cirugía Ortopédica y Traumatología.

[6] Park, K.-H., Yang, G.-D., Suhaimi, M. A., Lee, D. Y., Kim, T.-G., Kim, D.-W., & Lee, S.-W. (2015). The effect of cryogenic cooling and minimum quantity lubrication on end milling of titanium alloy Ti-6Al-4V. Journal of Mechanical Science and Technology, 29(12), 5121-5126.

[7] Venugopal, K. A., Paul, S., & Chattopadhyay, A. B. (2007). Growth of tool wear in turning of Ti-6Al-4V alloy under cryogenic cooling. Wear, 262(9-10), 1071-1078.

[8] Shane Y. Hong, Mark Broomer (2000). Economical and ecological cryogenic machining of AISI 304 austenitic stainless steel. Clean Products and Processes volume 2, 157-166.

[9] Nimel Sworna Ross, K., & Ganesh, M. (2019). Performance Analysis of Machining Ti-6Al-4V Under Cryogenic CO_2 Using PVD-TiN Coated Tool. Journal of Failure Analysis and Prevention.

[10] http://coolclean.com/2014/11/18/lco2-cleaning-for-medical-devices/ (2020/04/10an bisitatua 12:45etan).

[11] Dr. Jaime Duboy U. (2014). Prótesis total y unicompartimental en el manejo de artrosis grave de rodilla. Revista Médica Clínica Las Condes, 25 (5), 780-785.

[12] Cañizares, S., & Angel., M. (2017). Externalización de la cirugía protésica de rodilla : valoración de la viabilidad económica y grado de satisfacción del paciente.

[13] https://medlineplus.gov/spanish/ency/article/002974.htm (2020/04/08an bisitatua 12:00etan).
[14] https://www.mba.eu/blog/tipos-de-protesis-de-rodilla/ (2020/04/06an bisitatua 11:00etan).
[15] https://performancetitanium.com/6al-4v-eli/ (2020/09/24an bisitatua 11:30etan).
[16] http://www.matweb.com/search/datasheettext.aspx?matguid=c4297fb8f1094da189732c224e3be1ed (2020/04/08an bisitatua 11:00etan).
[17] https://www.sandvik.coromant.com/es-es/knowledge/milling/pages/up-milling-vs-down-milling.aspx (2020/09/24an bisitatua 10:30etan).
[18] Geometrical Product Specifications (GPS), Surface Texture: Profile Method, Rules and Procedures for the Assessment of Surface Texture; ISO Standard 4288; ISO: Geneva, Switzerland (1996).
[19] Turger, A., Köhler, J., Denkena, B. (2013). Manufacturing conditioned roughness and wear of biomedical oxide ceramics for all-ceramic knee implants. BioMed Eng OnLine 12, 84.
[20] Los implantes requieren una superficie óptima. Interempresas, https://www.interempresas.net/Pintura/Articulos/194769-Los-implantes-requieren-una-superficie-optima.html (2021/01/20an bisitatua 12:30etan).