

# Ebaketa-erremintaren tenperaturak neurtzeko tornuko ebaketa eten bidezko fresaketaren simulazioa

(Milling process simulation through interrupted turning process approximation for cutting tools temperatures measuring)

*Octavio Pereira, Alvaro Martínez, Igor Ansoategui\*, Iker Ganzarain, Amaia Calleja*

Ingeniaritza Mekanikako Saila. Euskal Herriko Unibertsitatea UPV/EHU

\* igor.ansoategui@ehu.eus

DOI: 10.1387/ekaia.16354

Jasoa: 2016-05-14

Onartua: 2016-12-14

**Laburpena:** Lan honetan zehar fresaketa bidezko simulazioa lantzen da tornuko ebaketa etenaren bitartez. Finkatutako helburu nagusia erremintaren jaulkitze-aurrepegiaren lortuko diren tenperaturak ezagutzea izango da ebaketa prozesuan. Helburu hori lortzeko, torneaketa prozesutik fresaketa prozesura estrapolazio bat egingo da, luzeran artekatutako pieza torneatzen bada posible izango dena, torneaketa fresaketa izango balitz bezala simulatuz, fresaketa ebaketa etena denez. Proba-baldintzetan tenperatura-neurketa horiek gauzatzeko K motako termoparea erabiliko da, zein jaulkitze aurrepegiarekiko 0,5 mm-ko distantziara kokaturik egongo den. Bero-transmisiozko modelo teoriko batean oinarrituz kalkulatu dugu kontaktuko batez besteko tenperatura. Ebaketa-baldintza ezberdinetarako proba ezberdinak garatu dira eta sakontasunez deskribatu ditugu. Horretaz gain, ebaketa jarraituan eta etenean lortuko diren tenperatura-diferentziak aztertuko dira, alde batetik, ebaketa-denbora berbera erabiliz eta, bestetik, ebaketa eraginkorraren luzera berbera erabiliz.

**Hitz gakoak:** Tenperatura-neurketa, torneaketa, fresaketa, mekanizazio-simulazioa.

**Abstract:** In this work, milling simulation through interrupted turning process approximation is carried out. The main objective is to obtain cutting tool temperatures in the tool rake surface during the cutting process. In order to obtain these values, the milling process is approximated by the turning process. It is possible to assume this simplification when a longitudinally grooved workpiece is turned. This way, turning interrupted processes can be equate to milling processes due to milling interrupted cutting singu-

larity. The tests measurements were carried out with a K-type thermocouple located at 0,5 mm from tool insert rake surface. The middle temperature value measured in the contact area will be estimated with a heat conduction theoretical model. Different trails with several cutting conditions are tested. Moreover, temperature difference between continuous and interrupted cutting for the same cutting time and cutting effective length is also studied.

**Keywords:** Temperature measurement, turning, milling, machining simulation.

## 1. HASIERAKO BALDINTZAK

Aipatutako simulazioan finkatutako helburuak lortzeko proba serie batzuk egin dira, LEALDE TCN 10 ereduko torneaketa-zentroan garatu direnak.

Proba horiek bi material ezberdinekin egin dira. Alde batetik, 35 Hrc-ko gogortasuna duen AISI 4340 (F1272, 40NiCrMo7) altzairua dugu; oso gogorra eta mekanizagarritasun zaila duena. Ondorioz, oso interesgarria izango da lortutako tenperaturak aztertzea [1,2]. Bestalde, AW 2030 HB108 aluminioa dugu; aurretik lortutako tenperaturekin konparazioak egiteko hautatu dugu material hau proba hauetan. Ohikoena, aluminioaren kasuan, altzairuarekin lortutako tenperaturak baino baxuagoak lortzea izango da, gogortasun baxuko materiala baita. Erabilitako probetak 60 mm diametrodun pieza zilindrikoak izan dira, 300 mm-ko luzera eta 240 mm-ko ebaketa erabilgarriko luzera dutenak. Makinaz, erremintaz eta piezez gain, K motako termopare bat behar izan dugu probetan tenperaturak neurtzeko, taladrina hozgarridun probetarako, datuak eskuratzeko txartel batez hornitutako ordenagailuak, aipatutako ordenagailuan voltetatik graduetara bihurtzeko programa (Labview 6.0) [4] eta seinale-anplifikadorea (0-10 V, 0-1.200° C).

## 2. METODOLOGIA

Artikulu honetan zehar, bi azterketa bereizgarri landuko ditugu, bakoitza dagokien aldagaiekin, baina, beti ere, denak elkarren artean modu zuzenean erlazionatuta.

### 2.1. Egonkortasun-tenperaturaren aldaketa $\theta_{\max}$ biraketa angeluaren araber

Egingo dugun lehenengo ikerketa  $\theta_{\max}$  angeluaren balio ezberdinetarako fresaketa tangentialaren prozesuan neurtutako tenperaturaren egonkortasuna izango da. Aluminio eta altzairuzko probetarako, egonkortasun-

temperaturak grafiko berdinetan islatuko ditugu eta  $\theta_{\max}$  balio bakoitzerako grafiko ezberdina erabiliko dugu. Datuak egokiak badira, altzairuan baino dezente baxuagoa izango den egonkortasun-temperatura lortu beharko genuke ebaketa etengarrian. Guztira 11 pasada egingo ditugu eta bakoitzean  $\theta_{\max}$ -aren balio ezberdina erabiliko dugu. Proba bakoitza lehorrean, MQLa-reakin [3] [5] [6] eta taladrina bidez errepikatuko dugu.

## 2.2. Egonkortasun-temperaturaren konparaketa jarraituan eta etenean

Bi aieruzko usteren arabera egingo dugu konparaketa; lehenik, mozke-tan-denbora berarekin, eta bigarrenik, mozke-ta eraginkor luzapen berarekin.

Ebaketa-denbora beraz hitz egiten ari garenean, mozten ari garen piezaren luzera bera dela esan nahi dugu, edo, beste modu batean esanda, torneaketa eragiketak irauten duen denbora bera dela. Logikoki, piezaren luzera berbera zilindratzen ari bagara, mozten ari garen material kantitatea askoz ere txikiagoa izango da ebaketa etengabea ebaketa jarraituan baino. Horregatik, lehenengo kasuan lortzen den egonkortasun-temperatura bigarren kasuan lortzen dena baino baxuagoa izango da.

Ebaketa eraginkor berberaz ari garenean, mozten ari deneko luzeraz ari gara. Beraz, zulatutako piezan, luzera berbereko jarraipeneko piezan mozten ari garen bostena mozten ari gara. Ondorioz, hipotesi hori indarrean jartzeko, totxoaren luzeraren bostena hartuko dugu. Etengabeakoaren aurrean, jarraitasuneko egonkortasuna behatuko dugu.

Proba horiek, altzairurako eta aluminiurako egingo ditugu, eta grafiko ezberdinetan azalduko ditugu. Proba horiek lehorrean eta taladrinan errepikatuko ditugu.

## 3. BALIOKIDETASUNAK ETA KALKULUAK

Gauzatu nahi dugun ikerketa, torneaketa etengabearen bidezko fresaketaren simulazioa da, baina ikerketa honek zenbait kalkulu matematiko behar ditu analogia hori bidezkoa izan dadin.

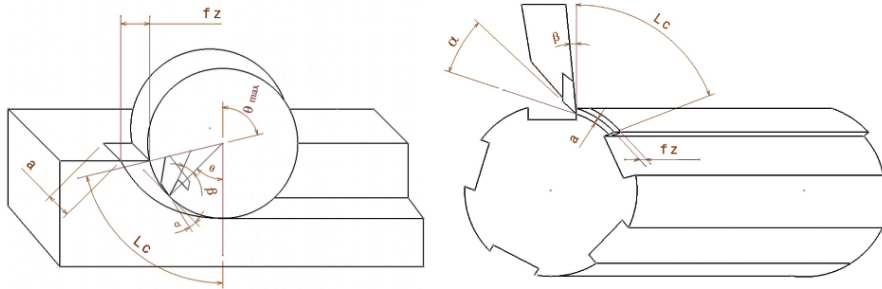
Ondoren, irudi bat ikusiko dugu (1. irudia), non etengabeko torneaketa-aren bidezko fresaketaren simulazioa laburbiltzen den.

$$\text{Bol}_{v1} = \text{Bol}_{v2}$$

$$l_{c1} = l_{c2} \Rightarrow a_r = 0,6365 \cdot a_a \quad (1)$$

$$f_z = f_t$$

$$\alpha_1 = \alpha_2 \Leftrightarrow \frac{\theta_{\max}}{\pi \cdot D} \approx \frac{l_c}{L} \Leftrightarrow \beta_1 = \beta_2 \quad (2)$$



**1. irudia.** Oinarrizko parametroak fresaketan (1) eta torneaketan (2).

Kalkuluetarako erabiliko dugun fresa bi hortzekoa eta 12 mm-ko diametroa izango da. Material bakoitzarentzat tornuan probak egiteko  $n_t = 800$  bira/min-ko bira-abiadura erabiliko dugu eta  $f = 0,2$  mm/bira-ko aitzinapena.

Aurretik lortutako hasierako datuak kontuan izanda, baliokidetasun parametroak kalkulatuko ditugu.

### 3.1. Biraketa-abiadura baliokidea fresaketan

Alde batetik, abiadura periferikoaren adierazpena dugu:

$$v_t = v_f \rightarrow w_t \cdot r_t = w_f \cdot r_f$$

non:  $v_t$  = abiadura periferikoa torneaketan (m/s),  $v_f$  = abiadura periferikoa fresaketan (m/s),  $w_t$  = errotazio-abiadura torneaketan (rad/s),  $w_f$  = errotazio-abiadura fresaketan (rad/s),  $r_t$  = piezaren erradioa torneaketan (m) y,  $r_f$  = fresaren erradioa (m).

Emandako datuak aurreko adierazpenean ordezkaturaz, honakoa lortuko dugu:

$$800 \cdot \frac{2 \cdot \pi}{60} \cdot 0,03 = w_f \cdot 0,06 \Rightarrow w_f = 418,879 \cdot \frac{60}{2 \cdot \pi} = 4000 \text{ bira/min} \quad (3)$$

Kontuan hartu behar dugu, materiala jaten dugun heinean, piezaren erradioaren  $r_t$  balioak behera egingo duela. Ondorioz, eginiko probetan errotazio-abiadura konstante mantentzean, fresaren errotazio-abiadurak behera egingo du eta balioa 3.000 bira/min-ko izatera iritsiko da.

### 3.2. Aitzinapen-baliokidetasuna fresaketan

0,2 mm/rev-eko torneaketa-aitzinapena aintzakotzat hartu dugu. Bi kasuetan kontuan hartu behar dugu aitzinapena bera izan behar dela, eta baita

ere jaten ari gareneko zatia zein den. Piezak 5 arteka eginda dituela jakinik, eta fresaketa-pieza 10 zatitan banatuko dutela (zati bakoitzak duen angelua ezezaguna delarik), honako adierazpena dugu:

$$f_{zatia} = f_z \quad \frac{0,2 \text{ mm/bira}}{2 \cdot \pi / \theta} = f_z \quad (4)$$

non:  $f_{zatia}$  = tornuaren piezaren aitzinapena zatiko den,  $f_z$  = aitzinapena hortzeko fresaketan, eta  $\theta$  = zati bakoitzaren angelua.

### 3.3. Ebaketa Prozesuen Baliokidetasuna

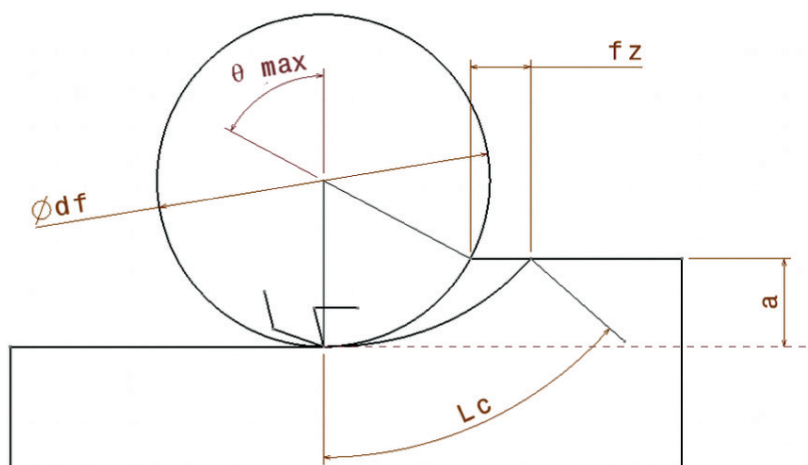
Bi ebaketa prozesuetan baliokidetasuna lortzeko bi gauza hartu behar ditugu kontuan. Alde batetik, mozketa-luzera, ebaketa-denbora bera izan dadin bi kasuetan analogoa izatea lortu behar duguna. Bestetik, txirbilaren bolumena, bi kasuetan jandako materiala berdina izan dadin analogoa izatea lortu behar duguna.

Ondorioz, aurreko kontsiderazioak kontuan hartuz,  $a_p$  ebaketaren sakontasuna aldagai bakar bezala utziz, bi ekuazio lortuko ditugu:

$$l_c = \frac{d_f}{2} \cdot \theta_{\max} \pm a_p \frac{V_f}{V} \sqrt{\frac{d_f}{a_p} - 1} \quad (5)$$

non  $f_z$  = aitzinapena hortzeko den,  $d_f$  = fresaren diametroa,  $a_p$  = ebaketaren sakontasuna,  $V_f$  = aitzinapen-abiadura, eta  $V$  = ebaketa-abiadura.

Fresaketaren geometriaren arabera (2. irudia):



**2. irudia.** Ebaketa-geometria fresaketan.

Alde batetik, fresaketan erazutako bolumena aldi bakoitzean honela sinplifikatuz:

$$Vol_f = f_z \cdot d_f \cdot a_p \quad (6)$$

Horretaz gain, torneaketan erazutako txirbil-bolumena kontuan hartuz:

$$Q = \frac{1000 \cdot V \cdot a_p \cdot f}{60} \quad (7)$$

Fresaketaren aldi bakoitzean erazutako bolumena torneaketa zati bakoitzean erazutako materialarekin berdintzean, honakoa lortuko dugu :

$$f_z \cdot d_f \cdot l \cdot (\text{mm}^3) = \frac{\frac{1000 \cdot V \cdot a_p \cdot f_z}{60} \cdot \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{seg}}\right) \cdot \frac{1}{n_t} \cdot \left(\frac{\text{min}}{\text{rev}}\right) \cdot 60 \cdot \left(\frac{\text{seg}}{\text{min}}\right)}{\frac{2 \cdot \pi}{\theta}} \quad (8)$$

1 mm-ko fresaketan pasaldi-sakontasun balio bat hartuko dugu. Aurreko ekuazioa ebazteko abiadura periferikoa behar dugu. Horregatik, lehenik eta behin honakoa kalkulatu beharko dugu:

$$V = \frac{\pi \cdot d_t \cdot n_t}{1000} = \frac{\pi \cdot 60 \cdot 800}{1000} = 150,796 \frac{m}{\text{min}} \quad (9)$$

Ebaketa-abiadura hau totxoaren 60 mm-ko diametro bati egokitzen zaio bakarrik. Ondorioz, diametro ezberdineko pieza batentzat balio ezberdina edukiko du.

Balio hau aurreko ekuazioan ordezkatzan badugu:

$$\frac{0,2 \cdot \theta}{2 \cdot \pi} \cdot 12 \cdot l \cdot (\text{mm}^3) = \frac{\frac{1000 \cdot 150,796 \cdot a_p \cdot \frac{0,2 \cdot \theta}{2 \cdot \pi}}{60} \cdot \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{seg}}\right) \cdot \frac{1}{800} \cdot \left(\frac{\text{min}}{\text{bira}}\right) \cdot 60 \cdot \left(\frac{\text{seg}}{\text{min}}\right)}{\frac{2 \cdot \pi}{\theta}}$$

Behatu dezakegun moduan, eragiketak egiteko datu bat gehiago falta zaigu,  $\theta$ -ren balioa, hain zuzen. Balio hori fresaketan luzerako ebaketaren formularen ordezkatzuz lortuko dugu, eta torneaketan izango dugunarekin berdinduz, honako hau izango dugu:

$$l_c = \frac{d_f}{2} \cdot \theta_{\max} \pm a_p \frac{V_f}{V} \sqrt{\frac{d_f}{a_p} - 1} = r_i \cdot \theta \quad (10)$$

Balioak ordezkatzuz honakoa lortuko dugu:

$$\frac{12}{2} \cdot \pi \pm 0,001 \frac{\frac{\theta}{2 \cdot \pi} \cdot 2 \cdot 4000}{150,796} \cdot \sqrt{\frac{0,012}{0,001} - 1} = \frac{60}{2} \cdot \theta \rightarrow \theta = 0,628 \text{ rad} \approx 36^\circ \quad (11)$$

Espero genuen emaitza da; izan ere, arteka zabalak egiten ari garenez eta luzerako 10 tarte daudenez, tarte bakoitzak  $360/10 = 36^\circ$  estaliko du. Aurretik aipatu dugun totxo metalikoaren tarteak diametro jakin bateko fresa baten bidez egingo ditugu. Tarte bakoitzaren luzera periferikoa honela kalkulatu dugu:

$$l_{\text{tarte}} = r_i \cdot \theta = \frac{0,06}{2} \cdot 0,6277 = 18,831 \text{ mm} \quad (12)$$

Ondorioz, luzera hori piezaren periferiaren gain neurtuta dagoela kontuan hartuz, balio horren azpitik dabilen diametro zehatz jakin bat duen fresa hautatu dugu. Kasu honetarako fresen diametro egokienak zein diren aztertzen badugu, ohartuko gara 18 mm-ko diametroan fresa dela egokiena.

Tarte horiek izango duten itxurarekin eta kontuan hartu behar izango ditugun ezaugarriekin jarraitu baino lehen, falta zaigun datu fundamentalak kalkulatu behar dugu: txirbilaren bolumenaren berdintasunaren ekuazioan ez dugunez beste ezezagunik izango, beharrezkoak diren ordezkapenak egin ahal izango ditugu torneaketan aplikatuko dugun ebaketaren sakonera aurkitu ahal izateko:

$$\frac{0,2 \cdot \theta}{2 \cdot \pi} \cdot 12 \cdot l \cdot (\text{mm}^3) = \frac{1000 \cdot 150,796 \cdot a_p \cdot \frac{0,2 \cdot 0,6277}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{\text{mm}^3}{\text{seg}}\right) \cdot \frac{1}{800} \cdot \left(\frac{\text{min}}{\text{rev}}\right) \cdot 60 \cdot \left(\frac{\text{seg}}{\text{min}}\right)}{\frac{2 \cdot \pi}{0,6277}} \quad (13)$$

Torneaketa diametroetan programatzen dela kontuan hartuz, ebaketa-sakonera 1,273 mm-koa izango da.

### 3.4. $\theta_{\max}$ biraketa-angeluari buruzkoak

Aurretik, zatiak 18 mm-dun fresa baten bidez egingo ditugula aipatu dugu. Ondorioz, fresaren diametroa konstante izatean, piezan sakontzen

joan ahala, tarte hutsei dagokien 18,831eko magnitudea konstante mantenduko da, nahiz eta material zatiak luzeran txikiagotzen joan.  $\theta$  angeluak markatzen duen material zatiak  $36^\circ$ -koa izateari utziko dio, eta balio txikiago batera igaroko da. Angelu-aldaketa horiek fresaketaren  $\theta_{\max}$  angeluan islatuko dira. Modu horretan, materialaren totxo bat bakarrik erabiltzen dugu,  $\theta_{\max}$  balio ezberdinetarako proba ezberdinak egiteko.

1,2745 mm-ko sakontasuna jenez, artekak zuen  $\theta$  balioa bilatzeko landu genuen prozesuaren alderantzizkoa garatu beharko dugu  $\theta_{\max}$  balioa bilatzeko. Artekaren zabalera finkoa denez,  $\theta$  balioan oinarrituz,  $\theta_{\max}$  kalkulatu dezakegu:

Ondorengo adierazpena betetzen delarik:

$$L_c = \pi \cdot d_t \quad (14)$$

Materialaren artekaren zati bakoitzean luzera honakoa izango da:

$$l_{arkua} = \frac{\pi \cdot d_t - 18,831 \cdot 5}{5} \quad (15)$$

$l_{arkua} = \theta \cdot r$  baldin bada:

$$\theta = \frac{l_{arkua}}{r} = \frac{2 \cdot l_{arkua}}{d} \quad \theta = \frac{2 \cdot \pi \cdot d_t - 188,31}{5 \cdot d_t} \quad (16)$$

Honezkerok, badugu  $\theta$  balioaren eta totxo zilindrokorako diametroaren balioaren arteko erlazioa. Orain erlazio hori erabiltzea besterik ez dugu behar  $\theta$  bakoitzari dagokion  $\theta_{\max}$ -a ezagutzeko. Berez, ebaketa-luzerak torneaketan eta fresaketan erlazionatzen zituen formula osoa erabili beharko genukeen arren, gutxi gorabeherako formula erabil dezakegu kalkuluak sinplifikatzeko:

$$d_t \cdot \theta = d_f \cdot \theta_{\max} \quad \theta_{\max} = \frac{d_t \cdot \theta}{d_f} \quad \theta_{\max} = \frac{2 \cdot \pi \cdot d - 188,31}{5 \cdot d_f} \quad (17)$$

Kalkulatutako ap-ren balioa kontuan hartuta, diametro balio ezberdinentzat  $\theta_{\max}$  balio ezberdinak kalkulatu ahal izango ditugu, eta ondorioz, modu horretan tenperaturak angeluaren balioarekin nola aldatzen diren aztertzea ahal izango dugu.

1. pasaldia  $\Rightarrow d = 58,7255 \rightarrow \theta_{\max} = 712,53^\circ$
2. pasaldia  $\Rightarrow d = 57,4510 \rightarrow \theta_{\max} = 164,88^\circ$
3. pasaldia  $\Rightarrow d = 56,1765 \rightarrow \theta_{\max} = 157,24^\circ$



4. pasaldia  $\Rightarrow d = 54,9020 \rightarrow \theta_{\text{máx}} = 149,59^\circ$
5. pasaldia  $\Rightarrow d = 53,6275 \rightarrow \theta_{\text{máx}} = 141,94^\circ$
6. pasaldia  $\Rightarrow d = 52,3530 \rightarrow \theta_{\text{máx}} = 134,29^\circ$
7. pasaldia  $\Rightarrow d = 51,0785 \rightarrow \theta_{\text{máx}} = 126,64^\circ$
8. pasaldia  $\Rightarrow d = 49,8040 \rightarrow \theta_{\text{máx}} = 118,99^\circ$
9. pasaldia  $\Rightarrow d = 48,5295 \rightarrow \theta_{\text{máx}} = 111,34^\circ$
10. pasaldia  $\Rightarrow d = 47,2550 \rightarrow \theta_{\text{máx}} = 103,69^\circ$
11. pasaldia  $\Rightarrow d = 45,9805 \rightarrow \theta_{\text{máx}} = 96,037^\circ$
12. pasaldia  $\Rightarrow d = 44,7060 \rightarrow \theta_{\text{máx}} = 88,387^\circ$

Sortutako artekek sakonera finitua izango dute. 0,75 mm-ko sakonera duten artekak egingo ditugu. Lortu ditugun datuentzat 11. pasaldiraino iritsi beharko gara ebaketa etenean sakonera horretara iristeko.

Dagokion ebaketa-abiadura kalkulatu beharko dugu, biraketa-abiadura konstantea eta ezaguna dela jakinik.

Horretaz gain, tarte bakoitza mekanizatzeke behar den denbora kontuan hartzea beharrezkoa da. Horretarako, erregela simple bat aplikatzea besterik ez dugu behar lehenengo pasaldian. Biraketa-abiadura 800 bira/minutu-ko dela jakinik, eta tarteak biraketaren 1/10 zatia estaltzen dutela:

$$t = \frac{60}{800 \cdot 10} = 0,0075 \text{ seg} \quad (18)$$

#### 4. TEMPERATURAREN EGONKORTASUNA

Fenomeno hau behar bezala adierazteko, ebaketa-gunean bero-balantzea egitea beharrezkoa da. Ebaketa prozesuan materialaren zizailadura bidez sortuko den beroa, zati batean eroankortasun bidez transmititzen da piezara, eta beste zati batean konbekzio bidez ingurunera. Horrenbestez, bero-sortzaile modura bi kasu ezberdin edukiko genituzke, bat ebaketa etenean, eta bestea, ebaketa jarraituan. Ebaketa etena egiten ari garen bitartean, beroa denbora tarte batzuetan bakarrik sortzen ari garen bitartean, ebaketa jarraituan sortutako beroa konstantea da eta balio jakin bat du.

Orain, beroaren ebakuazioa nola sortzen den ikusi behar dugu, tenperaturaren egonkortasuna nola gertatzen den azaltzeko. Txirbilarekin joango den beroaz gain, erremintara nahiz piezara eroapen bidez ebakuatuko da beroa.

Temperaturaren egonkortasunera iristen gareneko egoera suposatzen badugu, prozesuan erabiliko dugun formula honakoa izango da:

$$Q = \lambda_1 \cdot A_1 \cdot \left( \frac{\partial \theta}{\partial x_1} \right) + \lambda_2 \cdot A_2 \cdot \left( \frac{\partial \theta}{\partial x_2} \right) + Q_v \quad (19)$$

non:  $Q$  = momentuan sortutako beroa,  $\lambda_1$  = materialaren eroankortasun koefizientea piezan,  $\lambda_2$  = materialaren eroankortasun koefizientea piezan,  $A_1$  = beroaren ebakuazio-gainazala piezan,  $A_2$  = beroaren ebakuazio-gainazala piezan,  $\left(\frac{\partial\theta}{\partial x_1}\right)$  = temperatura-gradientea piezan,  $\left(\frac{\partial\theta}{\partial x_2}\right)$  = piezaren temperatura-gradientea y,  $Q_v$  = txirbilak ebakutatutako beroa.

#### 4.1. Cook-en metodo analitikoa

Cook jaunak 1973. urtean makinazio prozesuan zehar erreminta-txirbil interfasean gertatuko den temperaturaren handiagotzea aurreikustea ahalbidetzen zuen formula garatu zuen.

$$T = 0,4 \cdot \frac{U}{\rho \cdot C} \left( \frac{v \cdot t_0}{K} \right)^{0,333}$$

non:  $T$ : txirbil-erreminta interfasearen batez besteko temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $U$ : eragiketaren energia espezifikoa ( $\text{N} \cdot \text{m}/\text{mm}^3$ ),  $v$ : ebaketa-abiadura (m/s) eta,  $t_0$ : txirbilaren lodiera ebaketa aurretik (m),  $\rho \cdot C$ : materialaren bero espezifikoa ( $\frac{\text{J}}{\text{mm}^3 \cdot ^{\circ}\text{C}}$ ) eta,  $K$ : lan-materialaren difusibitate termikoa ( $\text{m}^2/\text{s}$ ).

Ekuazio horren bidez lortutako temperaturaren handiagotzeari erreferentziatzko temperatura gehitu behar diogu, normalean giro-temperatura izango dena:

$$T(V_C) = \Delta T(V_C) + T_{\text{Erreferentzia}} \quad (20)$$

non:  $T$  = prozesuaren batez besteko temperatura eta,  $T_{\text{Erreferentzia}}$  = erreferentziatzko temperatura (normalean ingurugirokoa).

Orain egindako probentzat Cook-en adierazpena aplikatzen badugu, ebaketa jarraituaren kasuan lortu beharko genukeen temperatura zein den jakin genezake.

Al-2030 T4 aluminioaren parametroak honakoak dira:

$$U = 0,56 \text{ Nm}/\text{mm}^3, v = 2,46 \text{ m/s}, \rho = 2,75 \text{ g}/\text{cm}^3, c = 0,882 \text{ J}/\text{g} \cdot ^{\circ}\text{C}, \text{ y } \lambda = 159 \text{ W}/\text{mK}$$

Ondorioz, Cook-en adierazpenaren aurreko balioak ordezkatzu honako lortuko dugu:

$$\Delta T = 266 \text{ }^\circ\text{C}$$

Horri erreferentziako tenperatura gehitzen badiogu:

$$T(V_C) = \Delta T(V_C) + T_{\text{Erreferentzia}} = 266 + 20 = 286 \text{ }^\circ\text{C}$$

40NiCrMo7 (AISI 4340, F 1272) altzairuaren balioak honakoak dira:

$$U = 3,61 \text{ Nm/mm}^3, v = 2,46 \text{ m/s}, \rho = 9 \text{ g/cm}^3, c = 0,507 \text{ J/g}\cdot^\circ\text{C}, \lambda = 44,5 \text{ W/mK}$$

Ondorioz, aurreko balioak Cook-en adierazpenean ordezkatzu eta erreferentziako tenperatura gehituz:

$$T(V_C) = \Delta T(V_C) + T_{\text{Erreferentzia}} = 1833 + 20 = 1853 \text{ }^\circ\text{C}$$

Beraz, lortutako emaitzak probetan lortu genituen emaitzekin alderatuz, desberdintasuna nabaria da. Jaulkitze-aurpegitik 0,5 mm-ko distantziara ezarri dugun termoparearen efektua oso garrantzitsua izan dela beha deza-kegu.

## 5. EGINDAKO PROBAK

Lan honen jarraipenak proba esperimental jakin batzuen ikerketa dakar. Ondorioz, «denbora-tenperatura» grafikoen bidez, probetako emaitzetan oinarritutako datuak aurkeztuko ditugu proba ezberdin bakoitzarentzat.

Gainera, proba bakoitza laginketa-denbora desberdinetan neurtu dugula kontutan izan beharko dugu, baina antzeko probetarako, aldiz, laginketa-denbora berbera erabiliko dugu.

75 ms-ko laginketa-denbora proba hauetarako nahiko baxua denez, aukera egokiena denbora horren multiplo bat hautatzea izango da. Adibidez, totxoaren 10 biratik behin jaulkitze-aurpegian izango dugun tenperatura neurtu ahal izango dugu, hau da, 750 ms-ko laginketa-denbora hartuko dugu, denbora egokiagoa delako. Proba hauek totxoaren 240 mm-an zehar egitean, tenperaturen laginketaren denbora totala 90 segundokoa izango dela ondorioztatuko dugu.

**1. taula.** Egindako proben laburpena.

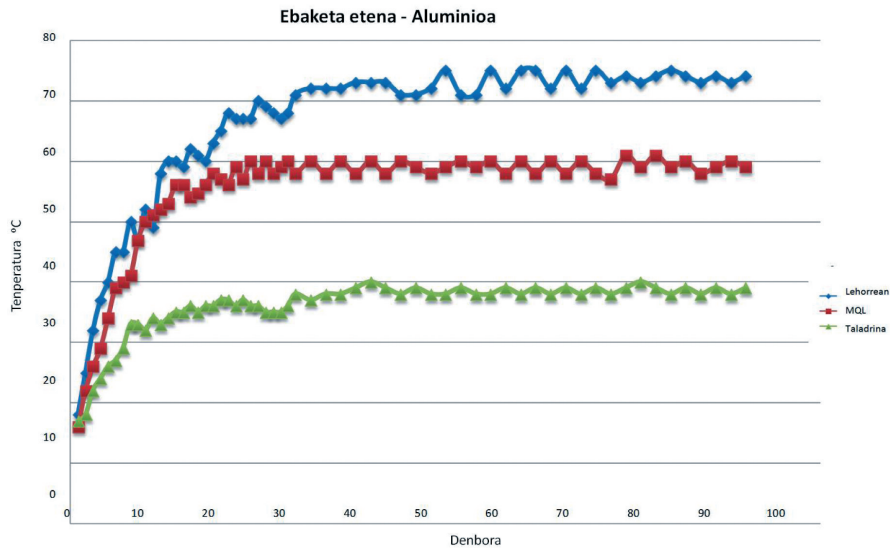
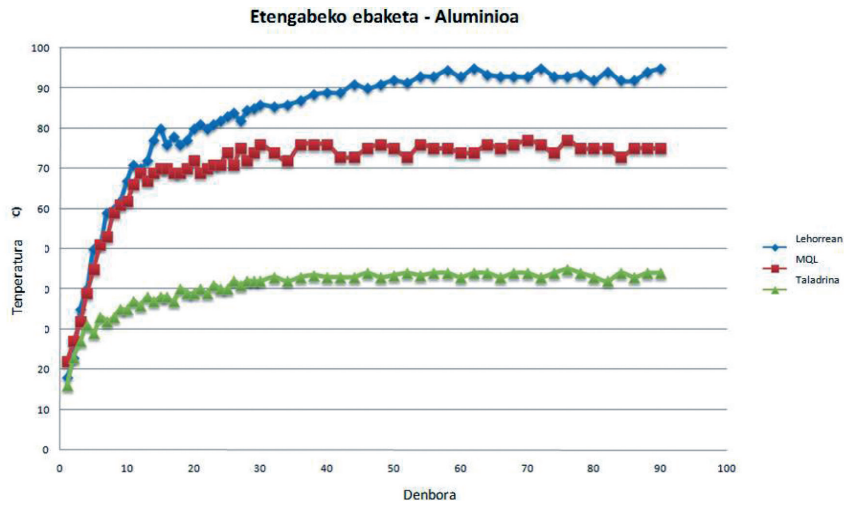
	N (bira/min)	D (mm)	Vc (m/min)	Lc (mm)	$\theta_{\max}$ fresaketa (°)
1. pasaldia	800	58,727	147,597	240	172,53
2. pasaldia	800	57,450	144,398	240	164,88
3. pasaldia	800	56,180	141,199	240	157,24
4. pasaldia	800	54,910	138,006	240	149,59
5. pasaldia	800	53,640	134,800	240	141,94
6. pasaldia	800	52,360	131,602	240	134,29
7. pasaldia	800	51,090	128,402	240	126,64
8. pasaldia	800	49,820	125,203	240	118,99
9. pasaldia	800t	48,540	122,004	240	111,34
10. pasaldia	800	47,270	118,795	240	103,69

Orain gure helburua grafikoak beraien artean konparatzea izango da; ebaketan parte hartzen duten parametro bakoitzaren efektuek eragingo dituzten ondorioetara iritsi gaitezten.

### 5.1. Murgilketa konstantearen bidezko grafiko konparatiboak

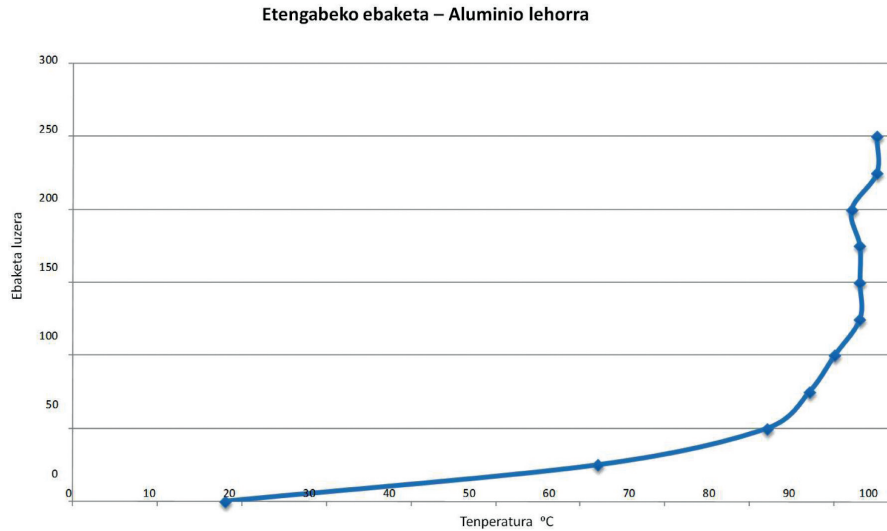
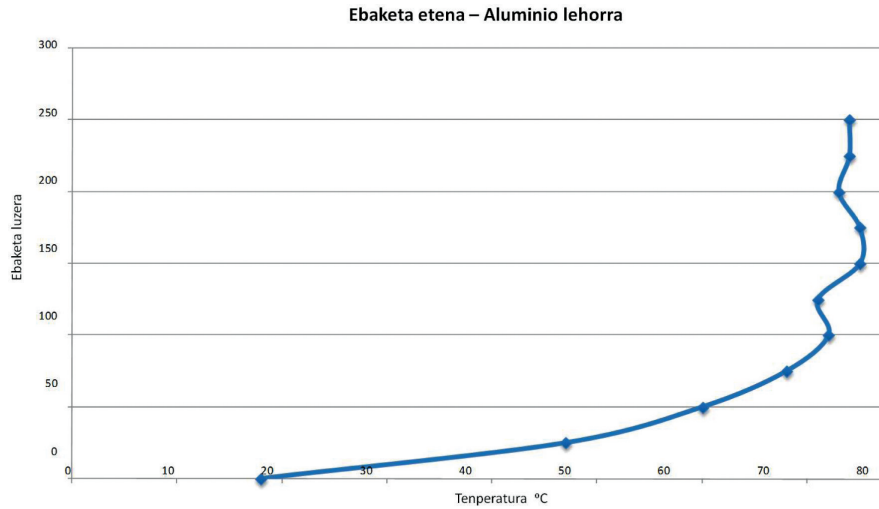
Atal honetan lortutako grafiko konparagarriak (3. irudia eta 4. irudia) ikusiko ditugu, kasu honetan murgilketa konstante mantentzen badugu eta aurretik azaldutako ebaketa-baldintzak aldatuz; hau da, lehorrean, MQL-rekin eta taladrinarekin.

*Ebaketa-erremintaren tenperaturak neurtzeko tornuko ebaketa eten bidezko fresaketaren simulazioa*



**3. eta 4. irudiak.** Etengabeko ebaketaren eta ebaketa etenaren bidezko proben grafikoak aluminioarekin.

## 5.2. Luzera-Temperatura proben grafikoak (5. irudia eta 6. irudia)



**5. eta 6. irudiak.** Luzera-Temperatura proben grafikoak.

## **6. EMAITZEN ANALISIA**

### **6.1. Denboraren eta Tenperaturaren azterketa grafikoak**

Aluminiozko murgilketa konstantepeko grafiko konparatiboei dagokie-  
nez, taladrina hozgarri era hobeezin modura aurkezten da ebaketa-baldin-  
tza jakin hauetarako, MQL metodoaren aurretik, hain zuzen. Taladrinare-  
kin tenperaturaren % 50eko beherapena gertatuko da, eta MQLaren kasuan  
% 22koa da.

Bestalde, grafiko konparatiboei behatuz, murgilketa konstantean zehar  
altzairuan egonkortze-tenperaturak altuagoak dira aluminiozkoetan baino.  
Izan ere, altzairuak fusio-tenperatura altuagoa du, eta beroarekiko jasanga-  
rritasun hobea erakusten du.

Ebaketa etenean zehar, tenperatura altuenak aluminio lehorrarentzat di-  
rela ikusiko dugu; hau da, 18-75 °C inguru, ondoren 16-61 °C tarteko ten-  
peraturak MQLarentzat eta 17-40 °C taladrinarentzat. Ondorioz, hozgarri  
egokiena taladrina izango dela ondoriozta dezakegu.

Bestalde, ebaketa jarraituan zehar, tenperatura altuenak aluminio leho-  
rrentzat direla behatuko dugu; 18-95 °C tartean, alegia. Ondoren, 22-  
76 °C inguru MQLarentzat eta, azkenik, 16-45 °C taladrinarentzat. He-  
mendik, lehen aipatu dugun moduan, taladrina hozgarri egokiena dela  
ondorioztatzen dugu.

### **6.2. Luzera eta Temperatura azterketa grafikoak**

Lehorreko altzairuaren ebaketa etengabea, tenperaturaren bilakaera  
handitu egiten da erdigunera iristen den arte, eta 60-70 °C inguruko balioak  
lortuko dira. Tenperaturaren egonkortasuna izango dugu, sortuko diren al-  
daketak mespretxagarriak izango direla-eta.

Bestalde, lehorreko aluminioaren ebaketa jarraituan zehar, piezaren er-  
diraino tenperaturaren igoera progresiboa jazoko da, 80-100 °C inguruko  
balio egonkorak lortu arte.

Taladrina bidezko mekanizazio etengabea, 100 mm-rainoko luzapena  
izatera iritsiko gara, eta 35 eta 40 °C bitarteko tenperatura lortuko dugu.  
Ondoren, konstante mantenduko da. Aipagarria da, lehorrekoan baino ten-  
peratura baxuagoak ditugula; izan ere, taladrina hozgarri hobea da eta ma-  
ruskadura proportzio handi batean ekidingo du.

Altzairurako ondorioak berdinak izango dira, ñabardura baten desber-  
dintasunarekin: tenperatura altuagoa izango da altzairuak baino fusio-ten-  
peratura altuagoa duelako.

## 7. ONDORIOAK

1. Plaketaren jaulkitze-aurpegitik termopararako 0,5 mm-ko distantzia dela eta, lortutako tenperaturak errealak ez direla frogatzen du Cook-en Legeak. Hala eta guztiz ere, horrek ez ditu aurreko ondorioak baliogabetzen.

2. Murgilketa konstanteko proba konparatiboetan, taladrina hozgarri onena bihurtzen da, MQLaren aurretik.

3. Pasada bakoitzean ebaketa-denborak gora egiten duela behatzen dugu, abiadurak behera egiten duen bitartean. Logikoa den zerbait da; izan ere, ebaketa-denbora kalkulatzeko ebaketa-luzera erabili behar dugu, eta luzera txikiagotzen doa pasaldi bakoitzean. Ebaketa-abiadurarekin gauza bera gertatuko da.

4. Konparaketazko proba etengarri-jarraituetan, tenperaturaren egonkortasun-denbora, mozketa-denboraren baitan dagoela ondoriozta dezakegu, eta ez moztutako materialaren kantitatearen baitan, tenperatura-gradienteen menpean egonik.

5. Gainera, ikus dezakegu materialaren erdia moztean egonkortasun-tenperaturaren balioa ez dela bere balioaren erdiraino jaisten; baizik eta, hasierako tenperaturarekiko 1/5. Izan ere, ebaketa etenean mozten dugunean erreminta hozteko aukera dago, eta jarraituan ez, ez baitugu prozesua gelditzen.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [1] J. Peláez Vara, El torno. Colección «La Máquina Herramienta» (tomo I), CEDEL, Barcelona (1992).
- [2] Shaw M.C., Metal Cutting Principles, Oxford Science Publications, (1989).
- [3] Chetan, Behera, B. C., Ghosh, S., and Rao, P. V., 2016, «Wear behavior of PVD TiN coated carbide inserts during machining of Nimonic 90 and Ti6Al4V superalloys under dry and MQL conditions,» *Ceram. Int.*, **42** (13), pp. 14873-14885.
- [4] Ponce, P., Ibarra, L., Molina, A., and MacCleery, B., 2012, «Real Time Simulation for DC and AC Motors Based on LabVIEW FPGAs,» *IFAC Proc. Vol.*, **45** (6), pp. 1777-1784.
- [5] Sharma, A. K., Tiwari, A. K., and Dixit, A. R., 2016, «Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review,» *J. Clean. Prod.*, **127**, pp. 1-18.
- [6] Sharma, A. K., Tiwari, A. K., Singh, R. K., and Dixit, A. R., 2016, «Tribological Investigation of TiO<sub>2</sub> Nanoparticle based Cutting Fluid in Machining under Minimum Quantity Lubrication (MQL),» *Mater. Today Proc.*, **3**(6), pp. 2155-2162.