

Doktorego Tesia

DIAMANTAGAILUAREN HIGADURAREN AZTERKETA ESPERIMENTALA ARTEZKETA PROZESUAN

Xabier Cearsolo Aranberrik
aurkeztua

Ingeniaritza Mekanikoa Saila

Euskal Herriko Unibertsitatea

Industria Ingeniaritza Doktore
titulua bereganatzeko

Itziar Cabanes Axpe eta José Antonio Sánchez Galíndez
Doktoreek zuzendua

2017ko otsaila

Doktorego Tesia

**DIAMANTAGAILUAREN HIGADURAREN AZTERKETA
ESPERIMENTALA ARTEZKETA PROZESUAN**

Xabier Cearsolo Aranberrik
aurkeztua

Ingeniaritza Mekanikoa Saila

Euskal Herriko Unibertsitatea

Industria Ingeniaritza Doktore
titulua bereganatzeko

Itziar Cabanes Axpe eta José Antonio Sánchez Galíndez
Doktoreek zuzendua

2017ko otsaila

ESKER ONAK

Lerro hauen bidez, eskerrik beroena eman nahi dizuet azken lau urte hauetan, era batera edo bestera, doktoretza tesi hau aurrera ateratzen lagundu didazuen guztioi.

Lehenik eta behin, lan hau Ainhoa emazteari eta Beñat eta Maite seme-alabei eskaini nahi diet, urte hauetan guztietan emandako laguntza eta adoreagatik eta, batez ere, euren pazientziagatik.

Era berean, nire eskerrik beroena ama eta aitari, betidanik eman didaten laguntzagatik eta nire alde egindako ahaleginengatik.

Zorionekoa ni, Itziar eta Josean, zuek izan zaituztedalako tesi honen zuzendari; eskerrik asko bai arlo teknikoan, bai pertsonalean eman didazuen guztiagatik, plazer hutsa izan da. Aurrerantzean ere izango dugu elkarlanean aritzeko beta, ez izan dudarik.

EHUn eta IMHn ere pertsona askok lagundu didate, nola edo hala, doktoretza tesi hau garatzen, alegia, proba esperimentalak egiten, seinaleak prozesatzen, txostenak zuzentzen, tresneria nola erabili erakusten, larunbat goizetan tailerrean laguntzen, etab. Guztiei eskertu nahi diet emandako laguntza, bereziki Iker, Iñigo, Haritz, Eva, Mario, Aintzane, Julen, Diego, Josu, Edu, Joxe, Raul eta Ander.

Eskerrak, halaber, Fermini eta Ixakari; emandako laguntzagatik, jakina, baina batez ere, 2011n IMHn lanean hasi nintzenean, doktore tesia egiteko proposamena luzatu zidatelako. Orduko egoera pertsonala kontuan hartuta, ez zen unerik aproposena, baina zezenari adarretatik oratu eta aurre egin nion erronkari; gaur, harro nago erabaki hartaz. Eta aprobetxatu nahi dut aukera, baita ere, IMHri eskerrak emateko, doktoretza tesi hau garatzeko eman dizkidan erraztasunengatik.

Aipamen berezia merezi dute Jonek eta Robertok. Lehena, Maite alabaren aita pontekoa, oso gaztetatik izan dut ikaskide eta benetako lagun, eta ziur naiz berarengandik jasotako laguntzak baduela nolabaiteko arrastoa lan honetan. Eskerrik asko, Roberto, zure solasaldi eta dultzaina saioengatik, benetan lagungarriak izan zaizkit eta.

Azkenik, beste hainbat senitarteko eta laguni ere eskerrak eman nahi dizkiet, denbora honetan guztian adorea eman didatelako. Haiekin igarotako aisialdiko uneak ere oso lagungarriak izan zaizkit, dudarik gabe. Aurrerantzean, patxadatsuago hartuko ditugu ardoak eta gilda goxoak, besteak beste.

Bihotz-bihotzez, eskerrik asko guztioi.

Xabier

AURKIBIDE OROKORRA

1.	SARRERA.....	1
1.1.	TESTUINGURU INDUSTRIALA.....	1
1.2.	HELBURUAK ETA EKARPENAK.....	6
1.3.	TXOSTENAREN ANTOLAKETA.....	6
2.	DIAMANTATZE PROZESUAREN EGUNGO EGOERA	11
2.1.	SARRERA.....	11
2.2.	DIAMANTATZE PROZESUA.....	12
2.2.1.	<i>Diamante motak.....</i>	13
2.2.2.	<i>Diamantagailu motak.....</i>	15
2.2.3.	<i>Punta bakarreko diamantagailu estatikoak.....</i>	17
2.2.4.	<i>Diamantatze parametroak eta haien eragina artezketan.....</i>	19
2.2.4.1.	Diamantagailuaren eta artezarriaren arteko interakzio mekanikoa	20
2.2.4.2.	U_d gainezarpen ratioa.....	23
2.2.4.3.	γ_d zorroztasun ratioa	26
2.3.	DIAMANTAGAILUAREN HIGADURA	28
2.4.	DIAMANTATZE PROZESUAREN MONITORIZAZIOA	39
2.4.1.	<i>Soinu igorpen seinaleak.....</i>	41
2.4.2.	<i>Diamantagailuaren higaduraren monitorizazioa</i>	43
2.4.3.	<i>Diamantatze zikloak zehazteko monitorizazio sistemak</i>	46
2.4.4.	<i>Beste sentsoz batzuen erabilera diamantatze prozesuetan</i>	52
2.5.	SISTEMA HOZGARRIAK ARTEZKETA ETA DIAMANTATZE PROZESUETAN	55
3.	DIAMANTAGAILUAREN HIGADURA ETA MONITORIZAZIOA.....	67
3.1.	SARRERA.....	67
3.2.	DIAMANTAGAILUEN GEOMETRIAREN AZTERKETA.....	68
3.2.1.	<i>Diamantagailuen gainazal akabera</i>	71
3.2.2.	<i>Diamantagailuaren puntaren r_d erradioa.....</i>	73
3.2.3.	<i>Diamantagailuaren eta harriaren arteko b_d kontaktu luzera.....</i>	74
3.2.4.	<i>Diamantagailuaren 0,3 mm-ko higadurarako b_d kontaktu luzera.....</i>	76
3.2.5.	<i>Artezarriko ale urratzaileen diametroa</i>	77
3.3.	DIAMANTAGAILUAREN HIGADURAREN EBOLUZIOAREN AZTERKETA	81
3.3.1.	<i>Entseguen deskribapena eta jarraitutako prozedura</i>	82
3.3.2.	<i>Lan baldintzak.....</i>	90
3.3.2.1.	Diamantatze baldintzak.....	90
3.3.2.2.	Artezketa baldintzak	92

3.3.3.	<i>Proba esperimentalak – emaitzen lehen azterketa</i>	95
3.3.3.1.	<i>A_r kontaktu azalera</i>	95
3.3.3.2.	<i>Diamantagailuaren eta harriaren arteko b_d kontaktu luzera</i>	104
3.3.3.3.	<i>Piezaren R_z gainazal akabera</i>	105
3.3.3.4.	<i>Piezaren gainazaleko Barkhausen zarata magnetikoa</i>	108
3.3.3.5.	<i>Artezketako e_c energia espezifikoa</i>	110
3.3.3.6.	<i>P_d diamantatze potentzia</i>	112
3.3.3.7.	<i>Soinu-igorpen seinaleak</i>	118
3.3.4.	<i>Diamantearen biziraupenaren amaiera zehazteko K_A kurba adierazlea</i>	128
4.	DIAMANTATZE PROZESUAREN AZTERKETA TERMIKO TEORIKO-ESPERIMENTALA ETA HOZGARRIRIK GABEKO DIAMANTATZE EKOLOGIKOARI BURUZKO PROPOSAMENA	145
4.1.	DIAMANTATZE PROZESUAREN AZTERKETA TERMIKO ESPERIMENTALA.....	146
4.1.1.	<i>Sarrera</i>	146
4.1.2.	<i>Ohiko diamantatze prozesuaren azterketa termikoa altzairuzko euskarriarekin.</i>	147
4.1.2.1.	<i>Entseguen deskribapena eta jarraitutako prozedura</i>	147
4.1.2.2.	<i>Emaitzak eta lehen ondorioak</i>	151
4.1.2.2.1.	<i>Temperaturaren neurketa</i>	151
4.1.2.2.2.	<i>Diamanteen higaduraren eta grafitizazioaren azterketa</i>	153
4.1.2.2.3.	<i>Diamantatze prozesuko P_d potentzia</i>	155
4.1.3.	<i>Lehorreko diamantatze prozesu berri bati buruzko proposamena kobrezko euskarriarekin.</i>	157
4.2.	DIAMANTATZE PROZESUAREN ELEMENTU FINITU BIDEZKO SIMULAZIO TERMIKOA.....	171
4.2.1.	<i>Sarrera</i>	171
4.2.2.	<i>Diamanterantz barreatutako bero kopuruaren kalkulu teorikoa</i>	172
4.2.2.1.	<i>Modelo termiko teorikoa</i>	172
4.2.2.2.	<i>Diamantagailuan zehar barreatutako bero fluxuaren kalkulu</i>	176
4.2.2.3.	<i>Simulazio termikoaren emaitzak eta azterketa</i>	179
4.3.	LEHORREKO DIAMANTATZE PROZESU EKOLOGIKO BERRIA.....	182
4.3.1.	<i>Sarrera</i>	182
4.3.2.	<i>Industriari begirako hozgarririk gabeko diamantatze proposamena</i>	182
4.3.2.1.	<i>Entsegu esperimentalak</i>	183
4.3.2.2.	<i>Kobrezko euskarriaren dilatazio termikoak</i>	185
4.3.2.3.	<i>Diamantatze prozesuaren doitasuna lortzeko haize hotzeko hozgarria</i>	187
5.	ONDORIOAK, EKARPENAK ETA ETORKIZUNEN IKERKETA ILDOAK	195
5.1.	ONDORIOAK.....	195
5.2.	EKARPENAK.....	200
5.3.	ETORKIZUNEN IKERKETA ILDOAK.....	202
	BIBLIOGRAFIA	207

IRUDIEN AURKIBIDEA

1-1. irudia: Artezketa prozesuaren adierazpen grafikoa: artezketa zilindrikoa ezker aldean eta artezketa laua eskuinaldean.....	1
1-2. irudia: Arteztutako turbina-besoa (ezker aldean – www.zw3d.es), horiek artezteko DANOBAT makina (erdialdean – www.danobatgroup.com) eta birabarkiarene artezketa prozesua (eskuinaldean – www.emag.com)	2
1-3. irudia: Diamantatze prozesua punta bakarreko (www.talleresbatuak.com) eta lauza-erako diamantagailuekin.....	3
1-4. irudia: Artezketa eta diamantatze prozesuei dagokienez, monitorizazio, prozesu ekologiko eta higadura arloetan azken 36 urteotan argitaratutako artikulu kopurua (SCOPUS iturria).....	5
2-1. irudia: Artezarriaren egokitzapenaren definizioak.....	12
2-2. irudia: Diamantearen eta grafitoaren kristalezko egiturak (hurrenez hurren ezker aldean) eta materialen gogortasun taula (eskuinaldean) (Volker, 2004).....	14
2-3. irudia: Diamante moten sailkapena eta ezaugarriak	14
2-4. irudia: Punta bakarreko diamantagailu motak (Marinescu et al., 2007).....	15
2-5. irudia: Diamantagailu estatikoak.....	16
2-6. irudia: Punta anitzeko diamantagailu estatikoak (Marinescu et al., 2007).	16
2-7. irudia: Diamantatze prozesua diamantagailu estatikoarekin.....	17
2-8. irudia: Diamantatze prozesua diamantagailu birakariekin.....	17
2-9. irudia: Hainbat formatako diamantagailu birakariak (Dr. Kaiser, 2016).	17
2-10. irudia: a) Punta bakarreko diamantagailurako geometriak (Dr. Kaiser, 2016); b) Erradio puntadun diamantagailuaren ezaugarri geometrikoak (tesi honen garapenean eskuraturiko irudiak).	17
2-11. irudia: Punta bakarreko diamantagailuaren jarrera gomendagarria artezarriarekiko (Graf, 2011).	18
2-12. irudia: Artezketa harriaren higadura mekanismoak diamantatze prozesuan (Linke, 2007).	20
2-13. irudia: Diamantagailuaren eta harriaren interakzio mekanikoaren soinu igorpen seinalearen maila (Oliveira et al., 1994).	21
2-14. irudia: Punta bakarreko diamantagailu konikoarekin sortutako gainazal zimurtasuna.....	22
2-15. irudia: Diamantatze prozesuaren eskema punta bakarreko diamantagailuarekin (Tawakoli eta Rasifard, 2011).	23
2-16. irudia: U_d gainezarpeneratioaren eragina artezketako indar espezifikoa (ezker aldean), harriaren higadura erradialean (erdian) eta piezaren gainazal zimurtasunean (eskuinaldean) (Tawakoli eta Rasifard, 2011).....	25
2-17. irudia: Diamantatze lan-baldintzen eragina artezketa prozesuaren potentzia kontsumoan eta piezaren gainazal zimurtasunean (Rowe, 2014).	26
2-18. irudia: Higatutako diamantagailuaren eragina artezketa potentzian, arteztutako material kopuruaren arabera (Chen, 1995).	27
2-19. irudia: Diamantagailuaren higaduraren eboluzioa 3 fasetan (Marinescu et al., (2013)).....	29

2-20. irudia: Punta bakarreko diamantagailu estatikoak jasandako higadura egoerak neurtutako azalera balioarekin: lehen fasea (ezkerraldean), bigarren fasea (erdialdean) eta hirugarren fasea (eskuinaldean)...	30
2-21. irudia: Diamantearen eroankortasun termikoa tenperaturaren menpe ezkerraldean (Wörner et al., 1996) eta ale-urratzaile motetarako eroankortasun termikoaren balioa giro-tenperaturaren eskuinaldean....	32
2-22. irudia: Ohiko ale-urratzaileen gogortasuna tenperaturaren arabera (Telle, 2015).....	33
2-23. irudia: Kolore biko pirometro bidezko tenperatura neurketa diamantagailuan (Linke eta Klocke, 2010).	34
2-24. irudia: CVD motako diamantagailuaren higadura (Linke eta Klocke, 2010).....	36
2-25. irudia: Lauza-erako diamantagailuaren higaduraren neurketa (Shih eta Akemon, 2001).	38
2-26. irudia: Soinu-igorpen sentsorea (ezkerraldean) eta seinalea (eskuinean).	42
2-27. irudia: Soinu-igorpen seinalearen maiztasun espektroa (goialdean) eta soinu-igorpen seinaleen RMS balioak maiztasun bandarekiko funtzio bezala (behealdean).....	44
2-28. irudia: Martins et al.-ek (2014) diamantagailuaren higadura kontrolatzeko proposaturiko neurona sare artifizialaren eredu.....	44
2-29. irudia: Normalizatutako Integral Diferentziaren eboluzioa diamantatze zikloen arabera (kolore horiz beti alde berera diamantatuz lortutako kurba) (Wehmeier eta Inasaki, 2002).	47
2-30. irudia: DPO (goian) eta DPKS (behean) parametro estatistikoaren garapena 21 diamantatze ziklotan (Aguiar et al., 2009).	49
2-31. irudia: Diamantatze prozesuan jasotako soinu-igorpenen RMS, MVD eta MARSE parametro estatistikoaren bilakaera (Moia et al., 2014).	51
2-32. irudia: Gehieneko diamantatze zikloa zehazteko diamantatze indarren bilakaera (ezkerraldean) eta piezaren gainazal zimurtasunaren bilakaera (eskuinaldean) diamantatze zikloen menpe (Young eta Chen, 2005).	52
2-33. irudia: Diamantagailuaren eta artezarriaren arteko talka azalera (Filho et al., 1999).	53
2-34 irudia: Automobilgintzaren industriako produkzio kostuen banaketa (Sanchez et al., 2010).	57
2-35. irudia: Nitrogeno likidoa hozgarri bezala erabiliz artezketa prozesuaren eskema.....	59
2-36. irudia: Haize hotza (253 K) hozgarri bezala erabiliz mikroartezketa prozesuaren eskema	59
2-37. irudia: MQL eta tenperatura baxuko CO ₂ aire hotza artezarriaren gainazalean aplikatzeko sistema: 1) MQL haizebidea, 2) CO ₂ haizebidea eta 3) errasketa artezariak sortutako aire korronea gelditzeko	61
3-1. irudia: KAISER etxeko punta bakarreko diamantagailu estatikoa	68
3-2. irudia: Diamantagailuaren jarrera irudiak egiteko.....	71
3-3. irudia: D1 diamantagailuaren gainazal akabera.	72
3-4. irudia: D2 diamantagailuaren gainazal akabera.	72
3-5. irudia: D3 diamantagailuaren gainazal akabera.	72
3-6. irudia: D4 diamantagailuaren gainazal akabera.	72
3-7. irudia: D1 diamantagailuaren goitiko ikuspegi mugatua	74
3-8. irudia: D2 diamantagailuaren goitiko ikuspegi mugatua	74
3-9. irudia: D3 diamantagailuaren goitiko ikuspegi mugatua	74

3-10. irudia: D4 diamantagailuaren goitiko ikuspegi mugatua.....	74
3-11. irudia: Ale-urratzailearen geometria modelizatzeko erabilitako 3 forma geometrikoak (esfera, moztutako konoa eta konoa) (Liu et al., 2013).....	77
3-12. irudia: D1 diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talkaren modelizazio geometrikoa.....	79
3-13. irudia: D2 diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talkaren modelizazio geometrikoa.....	79
3-14. irudia: D3 diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talkaren modelizazio geometrikoa.....	79
3-15. irudia: D4 diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talkaren modelizazio geometrikoa.....	80
3-16. irudia: Proba esperimentaletan erabilitako tresneria eta konfigurazioa.....	83
3-17. irudia: DANOBAT FG-600-S makinaren kanpo itxura.....	83
3-18. irudia: DRAGAO etxeko 82AA70-9J6VW harria.....	83
3-19. irudia: Artezteko pieza.....	83
3-20. irudia: Diamantagailuaren jarrera harriarekiko.....	84
3-21. irudia: Soinu igorpen sentsorea (ezkerraldean) eta aukeratutako VS45H sentsorearen laneko maiztasun banda.....	85
3-22. irudia: VS45H sentsorea diamantagailuaren euskarriaren gainean jarrita eta eutsita.....	85
3-23. irudia: Potentzia kontsumo neurgailua (Load Control Inc.).....	85
3-24. irudia: Soinu igorpen eta potentzia seinalea eskuratzeko instrumentu elektronikoak.....	87
3-25. irudia: LEICA etxeko Z6APO mikroskopia (ezkerraldean) eta diamantagailuaren argazkiak egiteko euskarria (erdian eta eskuinaldean).....	88
3-26. irudia: Taylor-Hobson etxeko rugosimetro eramangarria piezaren gainazalaren R_z zimurtasuna neurtzeko.....	88
3-27. irudia: Barkhausen metodoaren bidez piezaren gainazaleko tentsio aldaketak neurtzen.....	89
3-28. irudia: Diamantagailua artezarriarekin kontaktuan.....	90
3-29. irudia: Artezketa makinako kontaktu sentsorearen kurba diamantatze iraganaldietan.....	92
3-30. irudia: Artezketa prozesua (artezarriaren eta piezaren arteko kontaktua).....	93
3-31. irudia: Diamantagailuen higadura eboluzioa aztertzeko erabilitako saiakuntza esperimentalen diseinua.....	94
3-32. irudia: D1 diamantagailuaren puntaren higadura azaleraren eboluzioa.....	96
3-33. irudia: D2 diamantagailuaren puntaren higadura azaleraren eboluzioa.....	96
3-34. irudia: D3 diamantagailuaren puntaren higadura azaleraren eboluzioa.....	96
3-35. irudia: D4 diamantagailuaren puntaren higadura azaleraren eboluzioa.....	97
3-36. irudia: D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuen higadura azaleraren portzentajezko handitzea.....	98
3-37. irudia: D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuen batez besteko A_f higadura azaleraren eboluzioa.....	99
3-38. irudia: D1 diamantagailuaren goitiko irudia hasieran, 25 eta 1.575 diamantatze iraganaldi egin ondoren.....	99
3-39. irudia: D1 diamantagailuaren aurretiko irudia hasieran, 500 eta 1.575 diamantatze iraganaldi egin ondoren.....	100

3-40. irudia: D2 diamantagailuaren goitiko irudia hasieran, 25 eta 1.575 diamantatze iraganaldi egin ondoren.....	100
3-41. irudia: D2 diamantagailuaren aurretiko irudia hasieran, 500 eta 1.575 diamantatze iraganaldi egin ondoren.....	101
3-42. irudia: D3 diamantagailuaren goitiko irudiak hasieran, 25 eta 1.500 diamantatze iraganaldi egin ondoren.....	101
3-43. irudia: diamantagailuaren aurretiko irudia hasieran, 600 eta 1.500 diamantatze iraganaldi egin ondoren.....	102
3-44. irudia: D4 diamantagailuaren goitiko irudia hasieran, 25 eta 1.300 diamantatze iraganaldi egin ondoren.....	102
3-45. irudia: D4 diamantagailuaren aurretiko irudia hasieran, 625 eta 1.300 diamantatze iraganaldi egin ondoren.....	102
3-46. irudia: U_d gainezarpen ratioaren eboluzioa	104
3-47. irudia: D2 diamantagailuaren b_d aldagaiaren balioak 75, 800 eta 1400 diamantatze zikloen ondoren.	105
3-48. irudia: Piezaren gainazalean neurtutako R_z gainazal zimurtasun balioak.....	106
3-49. irudia: Diamantatze ostean artezarriaren gainazalean lortutako hariaren R_t sakoneraren kurba teorikoa.....	107
3-50. irudia: Piezaren gainazalean neurtutako R_a gainazal zimurtasunaren batez besteko balioa.....	108
3-51. irudia: Artezarriaren gainazaleko hariaren R_t sakoneraren batez besteko balioa.....	108
3-52. irudia: Piezen gainazaleko Barkhausen zarata magnetikoaren neurketa D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuekin.	109
3-53. irudia: 4 piezaren gainazaleko Barkhausen zarata magnetikoaren batezbesteko balioa.	109
3-54. irudia: Artezketa prozesuan jasotako artezarriaren buruaren potentzia kontsumoa artezketa ziklo batean (seinale gordina).	110
3-55. irudia: D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuekin neurtutako artezketako energia espezifikokoaren eboluzioa.	111
3-56. irudia: 4 probatan neurtutako artezketako energia espezifikokoaren batez besteko balioa eta desbideraketa estandarra.....	111
3-57. irudia: Diamantagailuen zorrotasuna lehen 400 diamantatze zikloetan.....	112
3-58. irudia: Diamantatze prozesuan jasotako artezarriaren buruaren potentzia kontsumoa (seinale gordina grisez eta RMS balioa urdinez) 25 diamantatze iraganaldiko ziklo baterako.....	113
3-59. irudia: D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuekin neurtutako potentzia maximoaren eboluzioa.....	114
3-60. irudia: D1 diamantagailuarekin neurtutako P_d diamantatze potentzia, b_d kontaktu luzera eta aurretiko A_f kontaktu azalera.	114
3-61. irudia: D2 diamantagailuarekin neurtutako P_d diamantatze potentzia, b_d kontaktu luzera eta aurretiko A_f kontaktu azalera	115
3-62. irudia: D2 diamantagailuaren goitiko bistako irudiak 875 eta 900 iraganaldietan.....	115

3-63. irudia: D3 diamantagailuarekin neurtutako P_d diamantatze potentzia, b_d kontaktu luzera eta aurretiko A_f kontaktu azalera.....	116
3-64. irudia: D4 diamantagailuarekin neurtutako P_d diamantatze potentzia, b_d kontaktu luzera eta aurretiko A_f kontaktu azalera.....	117
3-65. irudia: 4 probetan neurtutako artezketako energia espezifikoaren batezbesteko balioa eta desbiderapen estandarra.	118
3-66. irudia: Soinu igorpen seinale gordina (gorriz) eta RMS balio estatistikoa (urdinez) 25 diamantatze iraganaldiko ziklo baterako.	118
3-67. irudia: D1, D2, D3 eta D4diamantagailuekin neurtutako soinu igorpenaren eboluzioa.	119
3-68. irudia: 4 probetan neurtutako soinu igorpenaren batez besteko balioa eta desbideraketa estandarra.	119
3-69. irudia: b_d kontaktu luzeraren eboluzioa.	120
3-70. irudia: D1 diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talkaren modelizazioa 1.575. diamantatze iraganaldian (neurriak mikratan).	121
3-71. irudia: Diamantagailuaren higaduraren irudikapena.	122
3-72. irudia: Higadura D4 diamantagailuan eta hausturak diamantagailuaren eta artezarriaren arteko lehen talkaren ingurunean.	122
3-73. irudia: D1 diamantagailuaren higaduraren aurretiko eta goitiko ikuspegiak 775. iraganaldiaren ondoren.	123
3-74. irudia: D1 diamantagailuarekin neurtutako AE_{RMS} diamantatze potentzia, b_d kontaktu luzera eta aurretiko A_f kontaktu azalera.	124
3-75. irudia: D1 diamantagailuaren higaduraren aurretiko ikuspegia 25, 500 eta 1.100 iraganaldi ondoren.	124
3-76. irudia: D2 diamantagailuarekin neurtutako AE_{RMS} diamantatze potentzia, b_d kontaktu luzera eta aurretiko A_f kontaktu azalera.	125
3-77. irudia: D2 diamantagailuaren goitiko ikuspegia 100., 225. eta 725. iraganaldietan, hurrenez hurren.	125
3-78. irudia: D3 diamantagailuarekin neurtutako AE_{RMS} diamantatze potentzia, b_d kontaktu luzera eta aurretiko A_f kontaktu azalera.	126
3-79. irudia: D3 diamantagailuaren higaduraren aurretiko ikuspegia 425., 675. eta 975. iraganaldietan. .	126
3-80. irudia: D3 diamantagailuaren higaduraren goitiko ikuspegia 425. eta 675. iraganaldietan.....	127
3-81. irudia: D4 diamantagailuaren higaduraren aurretiko eta goitiko ikuspegiak 625. iraganaldian.	128
3-82. irudia: D4 diamantagailuarekin neurtutako AE_{RMS} diamantatze potentzia, b_d kontaktu luzera eta aurretiko A_f kontaktu azalera.....	128
3-83. irudia: D3 diamantagailuaren potentzia balioen aldakortasun koefizientearen alderantzizko funtzioak 3, 5 eta 8 lagineko adierazlerako.	131
3-84. irudia: D3 diamantagailuaren AE_{RMS} balioen aldakortasun koefizientearen alderantzizko funtzioak 3, 5 eta 8 lagineko adierazlerako.	131

3-85. irudia: D1 diamantagailuaren puntaren A_f aurretiko kontaktu azalera, b_d kontaktu luzera eta kurba adierazlea.....	132
3-86. irudia: D2 diamantagailuaren puntaren A_f aurretiko kontaktu azalera, b_d kontaktu luzera eta K_A kurba adierazlea.....	133
3-87. irudia: D2 diamantagailuaren higaduraren aurretiko irudiak 375. eta 475. iraganaldietan.....	133
3-88. irudia: D2 diamantagailuaren higaduraren aurretiko irudiak 825. iraganaldian.	133
3-89. irudia: D3 diamantagailuaren puntaren A_f aurretiko kontaktu azalera, b_d kontaktu luzera eta K_A kurba adierazlea.....	134
3-90. irudia: D4 diamantagailuaren puntaren A_f aurretiko kontaktu azalera, b_d kontaktu luzera eta K_A kurba adierazlea.....	134
3-91. irudia: D14 diamantagailuaren puntako A_f aurretiko kontaktu azalera, b_d kontaktu luzera eta K_A kurba adierazlea.....	136
3-92. irudia: D14 diamantagailuaren higaduraren aurretiko irudiak 500., 600. eta 900. iraganaldietan.....	137
3-93. irudia: D14 diamantagailuaren higaduraren goitiko irudiak 600. eta 900. iraganaldietan.	137
3-94. irudia: D10 diamantagailuaren puntaren A_f aurretiko kontaktu azalera, b_d kontaktu luzera eta K_A kurba adierazlea.....	138
3-95. irudia: D10 diamantagailuaren higaduraren aurretiko irudia hasieran, 300. iraganaldiaren eta 700. iraganaldiaren ondoren.	138
3-96. irudia: D11 diamantagailuaren puntaren A_f aurretiko kontaktu azalera, b_d kontaktu luzera eta K_A kurba adierazlea.....	139
3-97. irudia: D11 diamantagailuaren higaduraren aurretiko irudia 900. eta 1.450. iraganaldien ondoren, eta goitiko irudia 1.450. iraganaldiaren ondoren.	139
4-1. irudia: Diamante naturalez eginiko diamantagailuak (ezkerraldean) eta sekzio konstanteko kristal anitzeko diamantagailuak (eskuinaldean).....	148
4-2. irudia: Altzairuzko diamante euskarria eta euskarriaren kokapena makinan.....	149
4-3. irudia: Diamantagailu euskarria makinan muntatuta eta tenperatura neurtzeko muntaia pirometro bidez.....	149
4-4. irudia: IMPAC etxeko IGAR12-LO pirometroa.....	150
4-5. irudia: Pirometroaren laser erakuslea diamantagailuaren puntan jarrita neurketa egiteko.....	150
4-6. irudia: Proba esperimentalak egiteko erabilitako tresneria eta konfigurazioa.....	151
4-7. irudia: 1. eta 2. entsegetan neurtutako diamantagailuaren puntaren tenperatura maximoen batezbestekoa altzairuzko euskarriarekin.....	152
4-8. irudia: : Altzairuzko euskarriarekin erabilitako diamantearen aurretiko SEM irudiak, diamante osoa ezkerrean eta xehetasuna eskuinean.....	153
4-9. irudia: Altzairuzko euskarriarekin erabilitako diamantearen goitiko SEM irudiak, diamante osoa ezkerrean eta xehetasuna eskuinean.....	154
4-10. irudia: Altzairuzko euskarriarekin erabilitako diamantearen X izpien difrakzio diagrama.....	155

4-11. irudia: 1. eta 2. entseguetan neurtutako potentzia maximoen batezbestekoa altzairuzko euskarriarekin.....	156
4-12. irudia: 1. eta 2. entseguetan neurtutako diamantagailuaren puntaren tenperatura maximoen batezbestekoa kobrezko euskarriarekin.....	158
4-13. irudia: 1 eta 2 entseguetan neurtutako potentzia maximoen batezbestekoa kobrezko euskarriarekin.....	159
4-14. irudia: 1. eta 2. entseguetan neurtutako potentzia maximoen batezbestekoa altzairu eta kobrezko euskarriekin.....	160
4-15. irudia: Kobrezko euskarriarekin erabilitako diamantearen SEM irudiak.....	161
4-16. irudia: Entsegu gehigarrietan neurtutako batezbesteko tenperaturen emaitzak.....	162
4-17. irudia: 600 iraganaldi ostean LB4 baldintzekin lanean aritutako diamantearen aurretiko, goitiko eta zehaztasun irudiak, hurrenez hurren.....	164
4-18. irudia: Altzairuzko eta kobrezko euskarriak erabiliz diamantatze prozesuko potentzia balioak	167
4-19. irudia: Diamantagailu eta artezarriaren arteko talka-azalera.....	168
4-20. irudia: Talka-azalera eta potentziaren arteko erlazioaren joera-kurba.....	168
4-21. irudia: Diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talka kopurua handitzea Sd-ren eraginez.....	169
4-22. irudia: Altzairuzko eta kobrezko euskarriak erabiliz diamantatze prozesuko tenperatura balioak diamantagailuaren puntan neurtuak.....	170
4-23. irudia: Laugarren entseguan erabilitako diamantagailuaren SEM irudia.....	173
4-24. irudia: Elementu finitu bidezko modelo termikoa	175
4-25. irudia: Diamantagailuaren eta euskarri sistemaren elementu finitu bidezko modelo (ANSYS® softwarea).....	175
4-26. irudia: Diamantagailu puntaren tenperatura neurketa elementu finitu bidezko simulazio bidez ($\alpha_d=0,03$ mm, $v_{fd}=679$ mm/min, $R_d=0,54$) (ANSYS® softwarea).....	178
4-27. irudia: 4. entsegurako esperimentalki eta simulazio bidez lortutako tenperatura eboluzioa R_d 0,5 eta 0,6 balioetarako.....	179
4-28. irudia: 8 entseguetan neurtutako batez besteko T tenperatura maximoak eta P_d diamantetik barreiatutako P_d bero fluxua.....	181
4-29. irudia: Kobrezko euskarriarekin eta hozgarririk gabe erabilitako diamantearen eta altzairuzko euskarriarekin eta hozgarri likidoarekin erabilitako diamantearen SEM irudiak (ezkerrean eta eskuinean, hurrenez hurren).....	183
4-30. irudia: : 4-29 irudian aukeratutako azalaren SEM irudi handituak (kobrezko euskarriarekin ezkerrean eta altzairuzko euskarriarekin eskuinaldean).....	183
4-31. irudia: Kobrezko euskarria eta hozgarririk gabe eta altzairuzko euskarria eta hozgarri likidoarekin neurtutako potentzia maximoen batezbestekoa.....	184
4-32. irudia: Euskarriaren dilatazio termikoen neurketa erloju konparatzaile bidez.....	185
4-33. irudia: Kobrezko euskarrian eta hozgarririk gabe, diamantearen puntan neurtutako desplazamendua mikratan.....	186

4-34. irudia: Diamantatze prozesua haize hotzeko hozgarri sistemarekin (Vortex tutua).....	187
4-35. irudia: Kobrezko euskarrian hozgarririk gabe eta altzairuzko euskarrian hozgarri likidoarekin neurtutako diamantearen Δ_T batez besteko desplazamenduak	188
4-36. irudia: Kobrezko euskarrian hozgarririk gabe eta altzairuzko euskarrian hozgarri likidoarekin neurtutako diamantearen Δ_T batez besteko desplazamenduak	188
4-37. irudia: Kobrezko euskarrian hozgarririk gabe, kobrezko euskarrian haize hotzeko hozgarriarekin eta altzairuzko euskarrian hozgarri likidoarekin neurtutako potentzia maximoen batezbestekoak.	189
4-38. irudia: Kobrezko euskarria eta haize hotzeko hozgarri sistema erabiliz frogatutako diamantearen SEM irudiak, aurretiko irudia (ezkerraldean), aurretiko irudi handitua (erdialdean) eta goitiko irudia (eskuinaldean).....	189

TAULEN AURKIBIDEA

2-1. taula: Diamantatze prozesuan eragiten duten parametro nagusiak.....	19
2-2. taula: U_d gainezarpen ratioaren ohiko erabilpen balioak aluminazko artezketa harrirako (Graf, 2011; Marinescu et al., 2013; Rowe, 2009).....	24
2-3. taula: Erabilitako diamantearen eroankortasun termikoaren aldaketa temperaturarekiko (Tkhangapsoev et al., 1983).....	31
2-4. taula: Hozgarririk gabe eginiko diamantatze probetan erabilitako prozesu parametroak.	35
3-1. taula: Diamantagailuen gainazal akabera.....	72
3-2. taula: D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuen puntaren haserako r_d erradioa eta piezaren gainazal zimurtasun teorikoa.	73
3-3. taula: D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuen haserako b_d kontaktu luzera, piezaren gainazal zimurtasun teorikoa, U_d gainezarpen ratioa eta diamantagailuaren γ_d zorroztasuna.....	75
3-4. taula: D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuen b_d kontaktu luzera eta U_d gainezarpen ratioa, 0,3mm-ko sakonerako higadura jasan eta gero.	77
3-5. taula: Diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talka azalera.....	80
3-6. taula: Artezarriaren gainazaleko hariaren sakonera diamantatu ondoren.	81
3-7. taula: Diamantatze zikloetako lan baldintzak.....	90
3-8. taula: Artezketa prozesuko lan-baldintzak.....	93
3-9. taula: Diamantagailuen gainazal akabera.....	103
3-10. taula: D4 diamantagailuarekin lortutako AE_{rms} kurbaren azterketa.	127
3-11. taula: Prozesuko aldagaiak eta eboluzio kurbako adierazleak.	129
3-12. taula: Kurba adierazlearen puntaren balioak.	135
3-13. taula: Proba esperimental gehigarriak.....	136
3-14. taula: : Kurba adierazlearen puntako balioak.	140
4-1. taula: Diamantatze prozesuko lan baldintzak altzairuzko euskarriarekin.	147
4-2. taula: Entsegetan erabilitako erreminta eta instrumentazioa.....	151
4-3. taula: Altzairuaren k eroankortasun termikoa temperaturaren arabera (eFunda, 2016).....	155
4-4. taula: Kobrearen k eroankortasun termikoa temperaturaren arabera.....	158
4-5. taula: Diamanteen azterketa termikoa burutzeko entsegu gehigarrien datuak.....	161
4-6. taula: α_d eta U_d diamantatze aldagaien eragina temperaturan.	163
4-7. taula: Diamantatze prozesuko lan baldintzak.....	166
4-8. taula: Diamantatze prozesuko α_d eta U_d aldagaien eragina diamantatze potentzian.....	169
4-9. taula: Diamantatze prozesuko α_d eta U_d aldagaien eragina diamantearen puntaren temperaturan. ...	171
4-10. taula: Elementu finituen modeloan erabilitako materialen propietate termikoak (eFunda, 2016; Six Elements, 2016).....	176
4-11. taula: 8 entsegetan elementu finitu bidezko modeloaren bidez lortutako emaitzak.....	180

NOMENKLATURA

σ :	Desbiderapen estandarra edo tipikoa	
Δ_d :	Diamantagailuaren higadura sakonera	μm
γ_d :	Diamantagailu puntaren zorroztasuna	
Δt :	Integrazio denbora	s
Δ :	Desplazamentu termikoa	μm
$ \bar{x} $:	Batezbesteko balioa	
α_d :	Diamantatze prozesuaren sakonera	μm
A_d :	Diamantagailu eta artezarriaren arteko talka-azalera	mm^2
α_e :	Artezketako sakonera	μm
AE:	<i>Acoustic Emission</i> – Soinu Igorpen	
A_f :	Diamantagailuaren puntan higatutako aurretiko azalera	mm^2
Al_2O_3:	Alumina	
ANN:	<i>Neural Network</i> – Neurona sare artifiziala	
α_{pd} :	Diamantagailu eta harriaren arteko benetako kontaktu zabalera	mm
b_d :	Diamantagailu eta harriaren arteko kontaktu luzera	mm
b_s :	Artezarriaren zabalera	mm
c :	Bero ahalmena	J/kg·K
CAD:	Computer Aided Design	
CBN:	Boro Nitruro Kubikoa	
CNC:	Computer Numerical Control	
CNT:	Carbon nanotube	
CO₂:	Karbono dioxidoa	

CpK:	Prozesuaren kapazitate indizea	
CuO:	Kobre oxido	
Cv:	Aldakortasun koefizientea	
CVD:	Chemical vapour deposition	
d_{f_muga}:	Higadura azaleraren gehieneko diametroa	mm
d_g:	Artezarriko ale-urratzailearen batezbesteko diametro	μm
DPKS:	Soinu igorpen eta artezketa potentzia balioen arteko parametro estatistiko konkretu bat	
DPO:	Artezketa prozesuko soinu igorpen balioaren desbiderapen tipikoa eta potentzia maximoaren biderkadurak definitzen duten parametro estatistikoa	
d_s:	Artezarriaren kanpo diametroa	mm
d_{s_o}:	Artezarriaren hasierako kanpo diametroa	mm
d_w:	Piezaren diametroa	mm
d_h:	Diamantagailu puntako higaduraren neurria	mm
e_c:	Artezketako energia espezifikoa	J/mm^3
EDX:	Espektroskopia bidezko azterketa kimikoa	
F_n:	Diamantatze indar normala	N
F_t:	Diamantatze indar tangenziala	N
G_d:	Diamantatze prozesuko higadura ratioa	
h:	Konbekziozko bero transmisio koefizientea	$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$
HRC:	Rockwell gogortasuna	
HV:	Brinell gogortasuna	
i:	Tenperatura neurrien arteko periodoa	s
ID:	<i>Integral difference</i> – Integral diferentzia	

<i>k</i> : Eroankortasun termikoa	W/m·K
<i>K_A</i> : Kurba adierazlea	
<i>L_r</i> : Ale-urratzaileen arteko tartea	μm
<i>m</i> : Ale urratzailearen tamaina erreferentzia	
<i>M</i> : Artezarriaren gogortasun maila	
<i>MARSE</i> : Measured area under the rectified signal envelope	
<i>MCD</i> : Monocrystalline diamond	
<i>MCG</i> : Minimum coolant grinding	
<i>MDV</i> : Mean Deviation value	
<i>MoS₂</i> : Molibdeno disulfuro	
<i>MQL</i> : Minimum quantity lubrication	
<i>n</i> : Elementu finituen nodoa	
<i>n_s</i> : Harriaren biratzen abiadura	bir/min
<i>n_w</i> : Piezaren biratzen abiadura	bir/min
<i>P</i> : Potentzia	W
<i>P_b</i> : Diamantagailura barreatutako bero-potentzia	kW
<i>PCD</i> : Polycrystalline diamond	
<i>P_d</i> : Diamantatze prozesuko potentzia	kW
<i>Q'</i> : Artezketa prozesuko txirbil emari espezifikoa	mm ³ /mm.s
<i>q_s</i> : Abiadura ratioa	
<i>Q_w</i> : Txirbil emaria	mm ³ /s
<i>R_σ</i> : Batezbesteko zimurtasun aritmetikoa	μm
<i>R_d</i> : Bero partizioa	%
<i>r_d</i> : Diamantearen puntako erradioa	mm

RMS:	Root mean square	
ROP:	Ratio of power	
R_t:	Artezarriaren gainazaleko hariaren sakonera diamantatze prozesuaren ondoren	μm
R_z:	Luzera konkretu batetan, gailurrik garaiena eta errorik sakonenaren arteko 5 balioen batzbestekoa	μm
S:	Artezarriaren egitura zenbakia	
S_d:	Diamantagailuaren luzetarako aitzinamendu abiadura harriaren bira bakoitzeko	mm/bira
SEM:	Ekorketazko Mikroskopia Elektroniko	
SiC:	Silizio karburo	
SiO₂:	Silizio dioxido	
T:	Tenperatura aldagaia	K
t:	Denbora aldagaia	s
U_d:	Gainezarpen ratioa	
v_(t):	AE seinalea	
v_d:	Diamantagailuaren luzetarako aitzinamendu abiadura	mm/min
V_d:	Diamantagailuak jasandako higadura bolumena	mm ³
v_f:	Artezarriaren aitzinapen abiadura	mm/min
V_g:	Ale-urratzaileen bolumen portzentajea	%
v_s:	Harriaren abiadura periferikoa	m/s
V_{sd}:	Diamantatutako artezarriaren gainazal bolumena	mm ³
v_w:	Piezaren abiadura periferikoa	m/s
W:	Diamantagailu puntako angelua	°
z:	Tenperatura neurketa kopurua iraganaldi bakoitzean	

ρ : Densitatea

kg/m³

1.Kapitulua

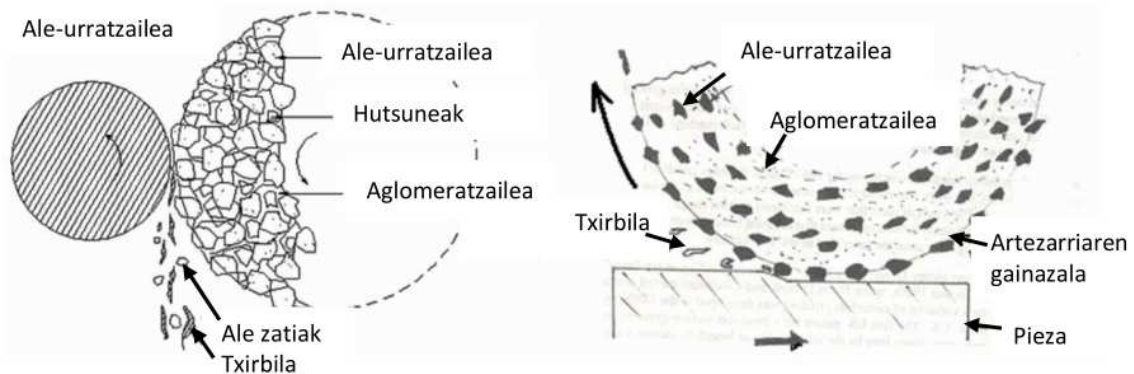
Sarrera

1. SARRERA

1.1. TESTUINGURU INDUSTRIALA

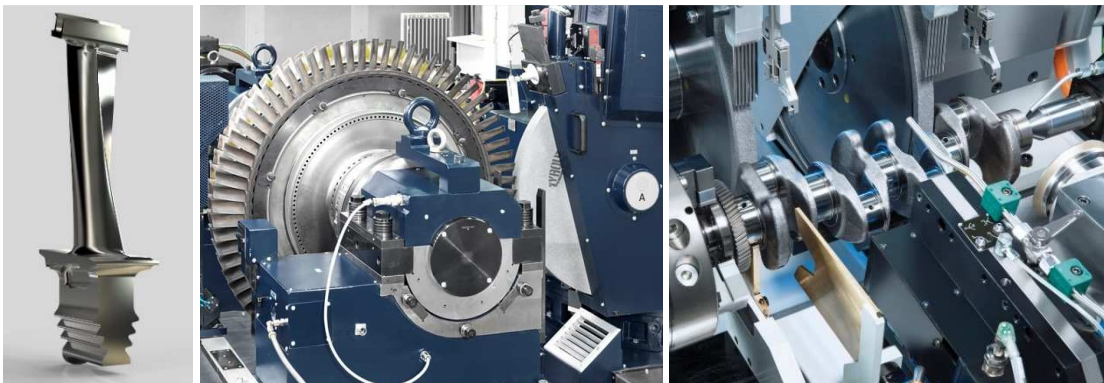
Azken urteetan, fabrikazio prozesu guztiek aldaketa nabarmenak jasan behar izan dituzte, merkatuaren hainbat eskakizunen ondorio gisa: produkzio kostuen murrizketa, produktibitate hobekuntza, produkzio sistema malguak, piezen gainazal akabera hobeak eta dimentsio zehatzagoak lortzea, eta material berriein lan egitea, besteak beste (Karpuschewski et al., 2000; Moia et al., 2011).

Artezketa da piezaren gainazal akabera ona eta dimentsio eta geometria perdoi estuak bermatzen dituen prozesu egokiena, eta horrexegatik da, askotan, fabrikazio prozesuan egiten den azken eragiketa (1-1. irudia). Oro har, balio erantsi handiko piezak izaten dira artezketa prozesua eskatzen dutenak, batez ere aeronautika (1-2. irudia), optika, ibilgailu industria edo energia sorkuntza merkatura bideratutako piezak edo material berriein (zeramikoak, zuntzak, gogortasun handikoak, etab.) sortutako piezak (García, 2014; Hassui eta Diniz, 2003). Hegazkin zibilen merkaturua, adibidez, handituz doa urtetik urtera, eta 2030-erako % 3,6-ko hazkundea espero da urte bakoitzeko (Klocke et al., 2015a); horrek esan nahi du, hegazkinetako beste osagai mekanikoez gain, gas turbinazko motorren eskaera nabarmen handituko dela. Gaur egun, artezketa da oraindik prozesu nagusia gas-turbinazko motor osagaien akabera prozesuan.



1-1. irudia: Artezketa prozesuaren adierazpen grafikoa: artezketa zilindrikoa ezkerrean eta artezketa laua eskuinaldean.

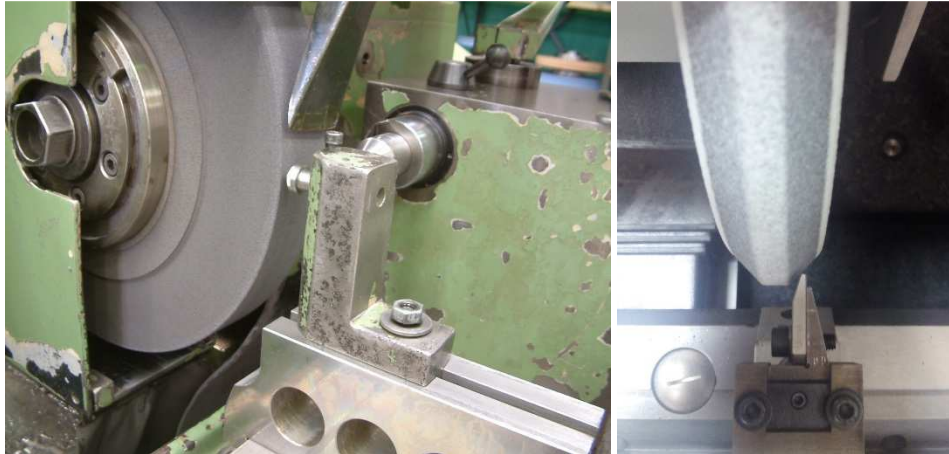
Artezketa prozesuaren produktibitatea eta arteztutako piezaren kalitatea, nagusiki, piezaren eta artezarriaren gainazalaren topografiaren arteko elkarrekintza zinematikoaren zuzeneko ondorio dira (Klocke et al., 2016). Topografiak, baina, ale urratzaileek prozesu osoan jasandako higaduraren ondorioz, aldaketa nabarmenak jasan ditzake, eta horrek eragin negatiboa dauka piezaren kalitatean eta prozesuaren errendimenduan, harriaren ebaketa ahalmena berreskuratzeko diamantatze eragiketa beharrezkoa egiten baitu (Chen et al., 1998).



1-2. irudia: Arteztutako turbina-besoa (ezkerraldean – www.zw3d.es), horiek artezteko DANOBAT makina (erdialdean – www.danobatgroup.com) eta birabarkiarene artezketa prozesua (eskuinaldean – www.emag.com).

Diamantatze prozesua (1-3. irudia) artezarriaren gainazalean torneaketa prozesu bat egitean datza, diamante bakar edo anitzeko erreminta batez, diamantatze sakonera eta aitzinamendu abiadura balio zehatzekin, lortu nahi den emaitzaren arabera. Adituen ustez, punta bakarrek diamantagailuekin, 5 eta 10 bitarteko diamantatze ziklorekin, nahikoa da artezarriaren gainazaleko ale urratzaileen ebaketa ahalmen egokia lortzeko (Xue et al., 2002).

Baina, beste erreminta batzuek bezala, artezarria zorrozteko erabiltzen den diamanteak ere higadura eta hausturak jasaten ditu, ale urratzailearekin izaten dituen talka ugarien ondorioz. Higadura horien jatorri nagusia karga termikoak eta mekanikoak izaten dira; beraz, artezarria bezalaxe, diamantagailua ere zorroztu edo aldatu beharra dago. Gaur egun, produkzio tailerretan, oro har, diamantagailuaren aldaketa edo zorrozketaren kudeaketa makinan lan egiten duen beharginaren esperientziaren mende uzten da.



1-3. irudia: Diamantatze prozesua punta bakarreko (www.talleresbatuak.com) eta lauza-erako diamantagailuekin.

Diamantatze prozesuaren egungo egoeraren azterketan azaltzen den bezala (2. Kapituluua), ez dago diamantagailuaren higadura eboluzioa aztertu eta, horren arabera, diamantearen biziraupenaren amaiera noiz gertatzen den zehazteko erreferentziarik. Horixe da, hain zuzen ere, doktoretza tesi honen helburu nagusietako bat, hots, entsegu esperimentaletan oinarrituta diamanteen higadura eboluzioa ezagutzea, eta jarraian, diamantatze prozesuan jasotako datuak prozesatuz, metodologia bat garatzea diamanteak ordeztzeko edo zorrozteko erabakia hartzeko. Soinu igorpenaren eta artezarriaren buruaren potentzia kontsumoaren seinaleen edukia oinarri hartuta, parametro estatistiko bat definitu da diamantearen biziraupenaren amaieraren adierazle gisa. Metodologia hori industria mailan artezketa makinetan ezartzea litzateke proposatzen den hurrengo pausoa.

Izan ere, asko dira artezketa arloan industrializatu diren ikerketa lanak: harriaren orekatze sistema azkar eta automatikoak, diamantatzeko gailu malgu eta automatikoak, artezketa prozesu simulatzaileak, piezaren erredura aurrealeak, etab. Badira, halaber, ingurune akademikoan garatu izan direnak, baina ez industriaren alorrean. Kasu horiek adierazten dute bi mundu horien artean lotura eza dagoela oraindik ere.

Adibide bat hozgarri likidorik gabeko artezketa prozesuen industrializazioa da; hainbat saiakera egin izan dira hozgarri kopurua gutxitzeko edo gabetzeko, *MQL*, nitrogeno gasa edo izoztutako CO_2 gas bidezko teknologiak aztertuta. Baina industria mailako kasurik gehientsuenetan, hozgarri likidoa erabiltzen jarraitzen da, gizakiarengan eta ingurumenean sortzen dituen kalteak ezagunak izan arren. Azken urteotan, ingurumena babesteko

onartutako lege berriak ikerketa horietan lortutako emaitzak prozesu industrialetan aplikatzeko bultzada izango direla aurreikus daiteke.

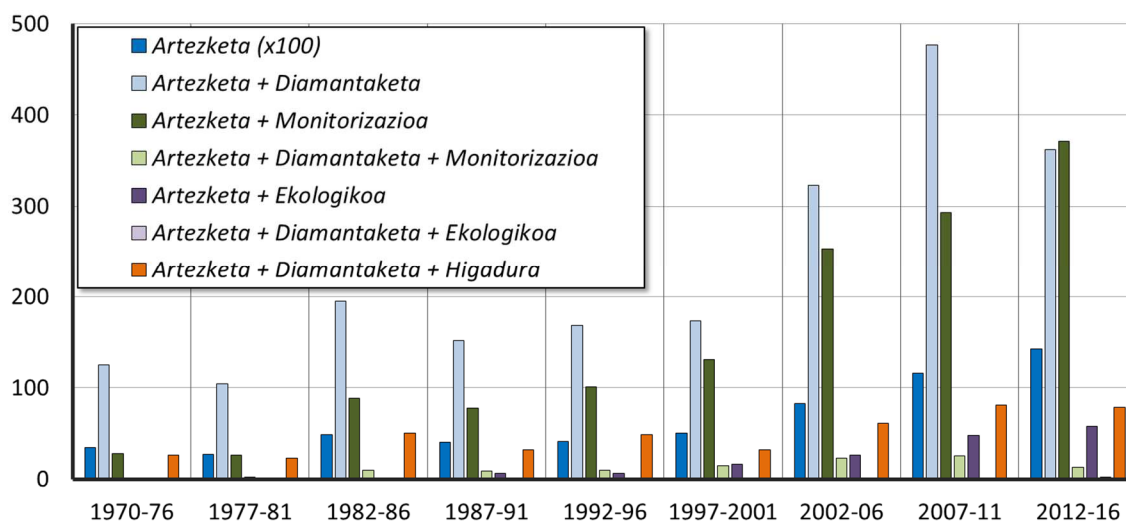
Halere, ikerketa guztiak artezketa prozesura bideratuta daude, eta ia ezin da aurkitu diamantatze prozesuko hozgarri sistemaz hitz egiten duen erreferentziarik (ikusi 1-4. irudiko grafikan eta 2.5. atala). Egia da, eta hala ondorioztatu da diamantearen azterketa termikoa egiteko proba esperimentalen bidez (4.kapitulua), diamantatze prozesuan sortutako karga termiko eta mekanikoak oso garrantzitsuak direla, are handiagoak lehorreko baldintzak erabiltzen badira; ezinbestekoa da, beraz, era bateko edo besteko hozgarri sistema erabiltzea diamantagailuaren osotasunari eusteko.

Doktoretza tesi honen bigarren helburu nagusia da diamantatze prozesu ekologiko bat garatzea diamantagailuaren euskarri gisa industria mailan ohikoa den altzairuarena baino eroankortasun termiko handiagoko materialak erabiliz eta lehorreko bestelako hozgarri sistema bat aplikatuz. Artezketaren inguruan garatutako hozgarririk gabeko irtenbideekin konbinatuta, proposamen honek artezketa makinatik ohiko hozgarri sistema kentzeko aukera eskaintzen du.

Aurrez esandakoak laburbiltzeko, esan daiteke doktoretza tesi honetan egindako ikerketaren hitz gako nagusiak *artezketa*, *diamantatze prozesua*, *monitorizazioa*, *ekologikoa* eta *higadura* direla. Ikerketa arloan ezaguna den *SCOPUS* iturria erabiliz 1970 urtetik gaur arte arlo tekniko zehatz horietan argitaraturiko lanen kopuruaren garapena aztertuta (ikusi 1-4. irudia), zenbait ondorio atera daitezke:

- I. Lehenik eta behin, artezketa prozesuak egun industrian duen garrantzia azken urteotan artezketaren inguruan argitaratutako ikerketa kopuruaren hazkundera islatzen da. Era berean, diamantatze prozesuari buruzko ikerketa lanen kopuruak ere nabarmen egin du gora, batez ere 2002. urtetik aurrera; lehenago argitaratutako lan kopurua ere kontuan hartzeko modukoa da, prozesu horrek izandako garrantzia azpimarratzeko.
- II. Monitorizazioaren arloan, lan dezente dago artezketaren gainean, baina diamantatze prozesuarekin loturikoak oso gutxi. Halere, azken urteotan argitaratutako lanen kopuruak gora egin du.

- III. Prozesu ekologikoez hitz egitean, garbi ikusten da teknologia horren inguruko lanak nahiko berriak direla (1991-tik aurrerakoak). Hozgarri kopurua gutxiagotzeko edo kentzeko lehen garapenak torneaketa eta fresaketa prozesuetarako garatu dira, eta, ondoren, konponbide horietako batzuk artezketa prozesuari egokitzeko lanak egin izan dira. Diamantatze prozesu ekologikoez, ostera, ia ez dago argitalpenik aurkitzerik: orotara, lau, 2016-ra arte. Horrenbestez, badago zer aztertu, artezketa makina ekologikoa bide industrialetik garatu nahi bada; tesi honen helburua da, hain zuzen ere, hori lortzeko teknologia garatzea.



1-4. irudia: Artezketa eta diamantatze prozesuei dagokienez, monitorizazio, prozesu ekologiko eta higadura arloetan azken 36 urteotan argitaratutako artikulu kopurua (SCOPUS iturria).

- IV. Azkenik, aipatu behar da, diamantatze prozesuaren inguruan diamantagailuaren higaduraren azterketa oinarri bezala duten ikerketa kopurua ere handituz joan dela azken urteetan; honek esan nahi du zientzia komunitatean gero eta garrantzi handiagoa dutela diamantatze prozesuan gertatzen diren higadura arazoek.

Beraz, doktoretza tesi honek planteatzen dituen bi helburu nagusiak (diamantatze prozesu ekologiko bat garatzea eta diamantearen biziraupenaren amaiera zehazteko adierazle bat garatzea) ekarpen oso interesgarriak izan daitezke artezketa eta diamantatze prozesuen errendimendua eta arlo ekologikoa hobetzeko bidean.

1.2. HELBURUAK ETA EKARPENAK

Aipatu bi helburu nagusiak alde batera utzita, jarraian azaltzen diren beste azpi-helburu hauei ere erantzuna ematen zaie doktoretza tesi honetan:

- I. Erabili gabeko punta bakarreko diamante naturalen ezaugarriek (geometria, gainazal akabera eta pitzadurak) eta horien higaduraren eboluzioak artezketa eta diamantatze prozesuen errendimenduan izan dezaketen eragina aztertzea.
- II. Diamanteen biziraupenaren amaiera zehaztuko duen monitorizazio metodologia definitzea, soinu igorpen eta potentzia kontsumo seinaleen bidez.
- III. Baldintza zehatz batzuetan egindako entsegu esperimentaletako emaitzak oinarri, diamantatze prozesuaren azterketa termikoa egitea, diamantearen higaduraren eta jasandako tenperatura maximoaren arteko harremana aztertzeko.
- IV. Erabilera industrialean, diamantearen euskarri gisa ohikoa den altzairuaren ordez, eroankortasun termiko handiagoko materiala erabiliz (kobrea), euskarriko materialek diamantagailuaren egoera termikoan izan dezaketen eragina aztertzea.
- V. Artezketa makina ekologiko bat garatzeko ekarpena egitea, lehorreko diamantatze prozesu berritzaile baterako proposamenarekin batera.

1.3. TXOSTENAREN ANTOLAKETA

Lan hau bost kapitulutan antolatuta dago:

1 kapituluan, balio erantsi handiko produktuen merkatu beharrei begira artezketak duen garrantziaz hitz egiten da, zehaztasun handiko prozesu gisa. Artezketa eta diamantatze prozesuei buruzko bi zertzelada eman, eta doktoretza tesi honen helburu nagusiak labur azaltzen dira, memoriaren antolaketaren deskribapena egiteaz batera.

2. kapituluan, doktoretza tesi honen oinarri diren diamantatze prozesua, diamantagailua edo diamantearen higadura, diamantatze prozesua monitorizatzeko seinaleak eta artezketa prozesua termikoki egonkor mantentzeko egungo teknologia edo egindako ikerketen egoeraren azterketa egiten da, hurrengo bi kapituluetan garatuko diren metodo edo teknologiei buruzko proposamen berrien sarrera gisa.

3. kapituluuan, lehenik eta behin, entseguetan erabilitako diamante naturalen azterketa topografikoa egiten da, haien arteko desberdintasunek emaitzetan eraginik duten ala ez aztertzeko. Jarraian, diamante mota berdinekin egindako diamantatze eta artezketa probak deskribatu eta lortutako emaitzak aztertzen dira. Ondoren, soinu igorpen eta potentzia seinaleak, piezaren gainazal egoera eta, diamantearen higadura mailan izaten diren aldaketen arteko kointzidentziak lotuz, diamantearen biziraupenaren bukaera zehazteko definitutako adierazlea azaltzen da.

4. kapituluuan, diamantatze prozesuaren azterketa termikoa egiten da, diamanteak jasandako higadura, bereziki, diamantatze prozesuan sortutako karga termikoari dagokiola erakusteko. Era berean, diamantearen puntaren tenperatura neurtzeko egindako proba esperimentalen berri ematen da, eta lortutako emaitzak aztertzen dira, diamantearen puntaren tenperatura, diamantatze potentzia eta higadura mailaren emaitzak nabarmenduta. Diamante prozesuaren simulazio bidezko azterketa termikoaren berri ere ematen da, diamantean zehar barreiatutako bero kantitatea ezagutzeko. Azkenik, diamantera iristen den bero kantitate horrek diamantean eragiten duen karga termikoa arintzeko, euskarri gisa eroankortasun termiko handiko materiala erabiltzea proposatzen da.

5. kapituluuan, lan honen ekarpen nagusiak aurkeztean gain, egindako ikerkuntzaren ondorioz eta gaian sakontzeko xedez sorturiko etorkizunari begirako balizko ikerkuntza ildoak aipatzen dira.

2. Kapituluia

Diamantatze prozesuaren egungo egoera

2. DIAMANTATZE PROZESUAREN EGUNGO EGOERA

Kapitulu honetan, punta bakarreko diamantagailuarekin eginiko diamantatze prozesuari buruzko egungo egoeraren azterketa egingo da. Lehenik eta behin, diamantatze prozesua zertan datzan azaltzeaz gain, prozesuan bertan parte hartzen duten aldagaiak aztertuko dira, hala nola horietako bakoitzak zer nolako eragina duen artezketa prozesuan, hots, azken piezan lortutako emaitzan. Jarraian, diamantagailuak diamantatze prozesuan jasaten duen higadurari erreparatuko zaio; aztertuko da, batetik, higaduraren eboluzioa, eta, bestetik, higadura bera sorrarazten duten fenomeno termiko eta mekanikoak. Higaduraren eboluzio edo garapenarekin lotuta, egun erabiltzen diren monitorizazio sistemak aztertuko dira. Azkenik, oro har artezketa prozesuan lubrifikatzaileek duten garrantzia landuko da, sortutako tenperatura altuen eraginez arazo termikoak ekiditeko funtzioarekin lotuta, batez ere.

2.1. SARRERA

Bibliografiako hainbat erreferentzian esan ohi den moduan, “*Grinding is dressing*”, hau da, diamantatze prozesua da artezketaren oinarria, baina, era berean, bada artezketa prozesu osoan gutxien azertu izan dena; Azken finean, artezketa bidez lortutako piezaren kalitatea, harriaren bizi-zikloa eta artezketa prozesuaren beraren errendimendua ere diamantatze prozesuaren baitan daude (Filho et al., 1999; Klocke et al., 2015b).

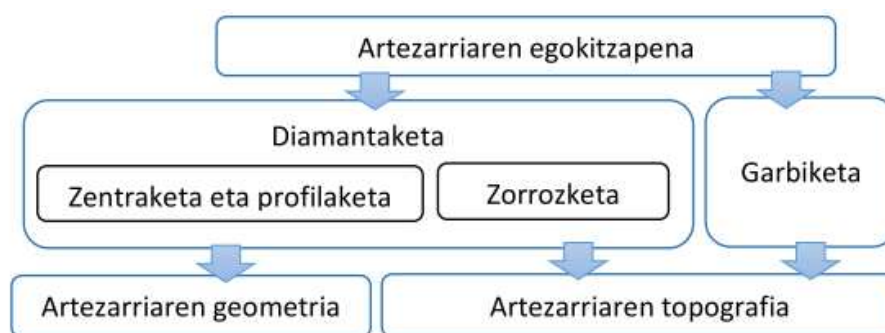
Aurreko kapituluan azaldu den bezala, azken urteotan diamantatze prozesuari buruzko argitalpenen kopuruak oro har gora egin duen arren, oraindik ere oso urriak dira, eta badago zer ikertu diamantatze prozesuaren inguruan. Doktoretza tesi honen garapena diamantagailuen higaduraren inguruko hiru arlotan ardaztu da: higaduraren jatorri diren karga termiko eta mekanikoak, diamantearen higadura mailaren monitorizazioa eta karga termikoen ondorioz sortutako tenperatura altuak kontrolatzeko hozte sistemak. Horiek dira nagusiki kapitulu honetan lantzen diren gaiak.

2.2. DIAMANTATZE PROZESUA

Aurreko atalean esan bezala, arteztutako piezaren akaberaren kalitatea eta prozesuaren beraren efizientzia artezarriaren gainazaleko topografiaren menpe daude (Brinksmeier eta Çinar, 1995; Hassui et al., 1998; Klocke eta Linke, 2008). Artezketa prozesuan, ale urratzaileen eta piezaren arteko kontaktuaren ondorioz sortutako aleen higadurak eragina izaten du topografiaren aldaketan eta artezketa prozesuaren errendimendu jaitsieran; une horretan esan daiteke harriaren bizi-iraupena bukatu egin dela, eta ezinbestekoa dela diamantatze prozesua burutzea, higatutako ale ebakitzailak zorrotzu edo gainazaletik kentzeko eta beste batzuk sortzeko.

Artezketa buruzko literatura zientifikoan, terminologia bat baino gehiago erabiltzen da artezarriaren egokitzapenaz hitz egiteko, eta hainbat sailkapen daude diamantaketaren gainean (Marinescu et al., 2007; Shih eta Akemon, 2001; Tawakoli eta Rasifard, 2011; Wegener et al., 2011; Young eta Chen, 2005). Oro har lantzen diren kontzeptuak hauek dira (2-1. irudia):

- I. **Zentraketa edo *Truing***: harriaren makrogeometriaren sorrera hartzen du kontuan, hau da, biraketa ardatzarekiko harriaren zentroidetasuna, alde batetik, eta luzetarako geometria, bestetik. Beharrezkoa izanez gero, harriaren gainazaleko profil zehatz baten sorrera ere hartzen du kontuan.
- II. **Garbiketa edo *Cleaning***: prozesu honek pieza, ale urratzaile eta aglutinatzaile hondakinak kentzen ditu harriaren gainazaletik. Artezketa prozesuan, hondakinok ale-urratzailearen eta aglutinatzailearen arteko hutsuneak betetzen dituzte, eta, ondorioz, hozgarriak ez du behar bezala betetzen hozteko funtzioa.



2-1. irudia: Artezarriaren egokitzapenaren definizioak.

- III. **Zorrozketa edo *Sharpening/dressing***: eragiketa honek harriaren ebaketa ahalmena hobetzen du, higatutako aleak kenduz eta artezarriaren gainazalean ertz-ebakitzaila berriak sortuz. Esan daiteke mikrogeometria berria sortzea dela prozesu honen helburua.

Diamantaketaz hitz egiten denean, zentraketa eta zorrozketa prozesuak hartzen dira kontuan: harriaren makrogeometria zentraketaren bidez kontrolatuko da, eta mikrogeometria edo gainazal topografia, berriz, zorrozketa eta garbiketa prozesuen bidez.

2.2.1. Diamante motak

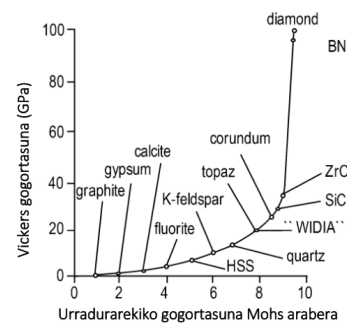
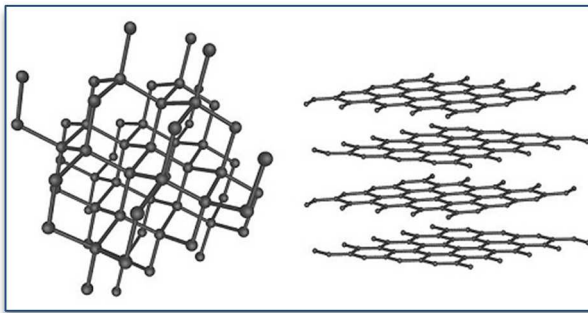
Karbonoaren atomoak bi modutan egon daitezke antolatuta lotura kimikoen bidez, eta horrexegatik esaten da karbonoak bi alotropo dauzkala: bata, diamantea, non atomoak kristalezko egitura tetraedrikoan dauden antolatuta; bestea, grafitoa, atomoak sareta hexagonalez osatutako orrietan lotuta (Tawakoli eta Rasifard, 2011) (2-2. irudia).

Diamanteak, naturan aurki daitezkeen material gogorrena izateaz gain, eroankortasun termiko oso ona dauka; halere, propietate hori ez da beti onerako izaten. Oro har, diamantatu beharreko materialak ez dira eroale termiko onak izaten, eta, ondorioz, diamanteak jokatzen du bero garraiatzailearen paper nagusia; prozesuan sortutako bero kantitate handien eraginez, diamantagailuaren tenperatura asko igo daiteke (973 K-etik gora), eta diamantean grafitizazioa sortu. Hori gerta ez dadin, diamantatze prozesuak hozgarri emari egokiarekin burutu behar dira.

Diamantagailuak egiteko erabiltzen diren diamanteak bi multzotan sailka daitezke (2-3. irudia): kristal bakarrekoak (diamante naturalak eta *MCD* kristal bakarreko diamanteak) eta *PCD* polikristalinoak (aglutinatzailearekin edo gabe).

Diamante naturalak erabiltzen dira beren jatorrizko forman edo mekanikoki ale tamaina zehatz batean eraldatuta. Tamaina, forma, kristalaren purutasuna, barne tentsioak eta kristalezko egiturako akatsak asko alda daitezke diamante batetik bestera eta, ondorioz, urradurarekiko erresistentziak eta higadura ratioak ere gorabehera handiak izan ditzakete. Materialaren propietate ez-homogeneo horrek diamantatze prozesuaren errepikakortasunean izan dezakeen eragina aztertzen da 3.3.3 atalean, erreferentzia

bereko lau diamantagailurekin burututako froga esperimentalen emaitzak azaltzen direnean.



2-2. irudia: Diamantearen eta grafitoaren kristalezko egiturak (hurrenez hurren ezkerretik) eta materialen gogortasun taula (eskuinaldean) (Volker, 2004).

MCD diamanteak, berriz, grafitotik hasi, eta sintesi prozesu kimiko konplexu baten ondorengo produktu bezala sortzen dira. Gogortasun oso handiko diamantea da, kristalezko egituraren orientazioa kontrolatu egiten baita; beraz, diamante naturalekin alderatuta, produktu oso homogeneoa sortzen da.

	Kristal bakarreko diamanteak		Diamante polikristalinoak (PCD)	
	Diamante naturala	MCD	Aglutinatzailerekin	Aglutinatzailerik gabe
Prozesua	about 4000 years ago at depth of 150-300 km deposits in: Australia, Zaire, Botswana, South Africa	1600 °C, 7 GPa	diamond (2 ... 25 µm) Co matrix	H ₂ + 1% CH ₄ MW plasma CVD process structure
Forma				
Gogortasuna [Koop]	6000 - 9000	8000 - 9000	4000 - 5500	8500 - 9000
Aplikazioa	all diamond tools	stationary dressing tools	edge reinforcement form rollers	form rollers with small radii and angles

2-3. irudia: Diamante moten sailkapena eta ezaugarriak.

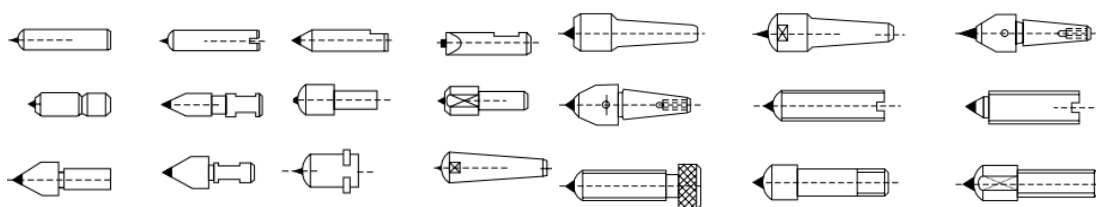
Diamante poli-kristalinoei dagokienez, sinterizazio prozesu baten bidez sortzen dira, diamante partikulen (2-25 µm-ko tamainakoak) arteko lotura egiteko kobaltozko edo wolframiozko aglutinatzailea erabiltzen denean. Diamante guztien artean, horiek dute gogortasunik txikiena, aglutinatzailearen eraginez, eta, diamante partikulen orientazioa ausazkoa denez, ez du norabide zehatzik gogortasun maila handiena bermatzeko.

Azkenik, aglutinatzaile gabe sortutako diamante polikristalinozko egiturak daude. Horiek ekoizten dira lurrunketa faseko jalkitze kimiko bidez (*chemical vapour deposition – CVD*). Hausturarako tentsio erresistentzia oso handia dute, egitura polikristalino homogeenogatik eta barneko egitura trinkogatik; propietate mekanikoak ez daude diamanteen orientazioaren menpe, eta higadurarekiko erresistentzia bera da norabide guztietan. Prozesu horrek lodiera oso txikiko geruzak ekoiztea ahalbidetzen duenez, *CVD* diamanteak oso egokiak dira erremintetarako eta beste produktu batzuetarako estaldura gisa funtzionatzeko. Oro har, sekzio lauki eta borobileko geometrian saltzen dira.

2.2.2. Diamantagailu motak

Industrian, oro har, aglutinatzaile zeramikoko eta beste aglutinatzaile mota batzuetako artezarrien zorrozketara prozesua diamantezko erreminta geldikor edo birakariarekin burutzen da (Marinescu et al., 2004). Diamantagailu geldikorra erabiltzen denean, ez du higadura zirkularrik izaten, soilik mugitzen da artezarriaren biratze ardatzaren norabidean, harriaren gainazalean zehar; prozesu hori torneaketa edo zilindraketa oso antzekoa da (2-7. irudia).

Merkatuan, mota askotako diamantagailu geldikorak daude, diamantagailuaren puntaren beraren geometria, gorputzaren bukaerako forma eta makinarekiko loturaren arabera (ikus 2-4. irudia). Mota horretako diamantagailuak, oro har, soilik erabiltzen dira profil zuzen edo sinpleko artezarriak diamantatzeko, baina, CNC kontrolaz lagunduriko makinetan, profil komplexuak zorrozteko ere erabil daitezke (Krajnik et al., 2007; Marinescu et al., 2007).



2-4. irudia: Punta bakarrekoko diamantagailu motak (Marinescu et al., 2007).

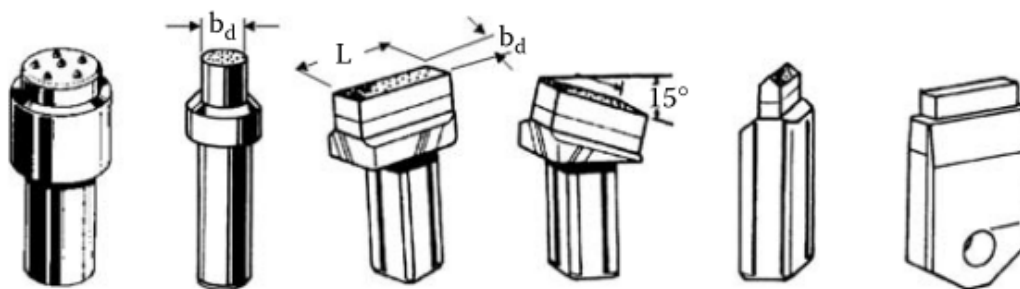
Bestalde, diamantagailu geldikorren artean, beste sailkapen bat ere egin daiteke: punta bakarra edo anitz dituztenak. Punta aniztunen kasuan, diamante batek baino gehiagok eragiten dute artezarriko aleetan, eta, ondorioz, diamantagailuetan sortutako higadura txikiagoa izaten da ale bakarrekoko diamantagailuetan baino. Punta horiek modu

estokastikoan edo patroi zehatz bati jarraiki egon daitezke kokatuta erremintan 2-5. irudian ikus daitekeen bezala (Messer, 1983).

Ale urratzaile anitzeko erremintak arbastatze eragiketak egiteko erabiltzen dira oro har (2-6. irudia); sortutako mekanizazio indarrak handiagoak izaten dira punta bakarrekoekin konparatuta.



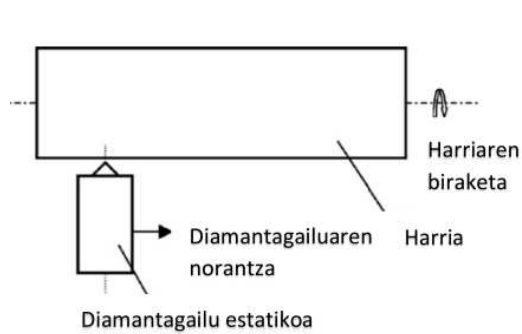
2-5. irudia: Diamantagailu estatikoak.



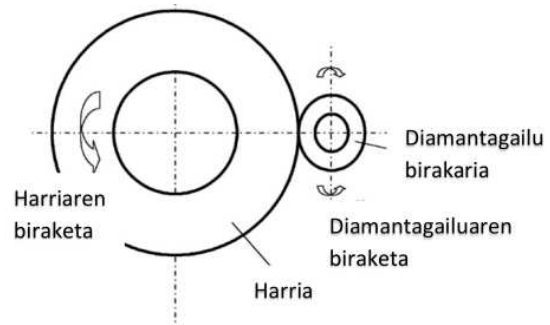
2-6. irudia: Punta anitzeko diamantagailu estatikoak (Marinescu et al., 2007).

Diamantagailu estatikoekin alderatuta, birakariak errotazio mugimendua ere badauka, non diamantagailuaren eta artezarriaren biratze ardatzak paraleloak diren (2-8. irudia). Kanpoko gainazalean, diamantez osaturiko geruza bat izaten da beti artezarriarekin kontaktuan, eta diamante kopurua diamantagailu estatikoekin alderatuta askoz ere handiagoa izaten da. Ondorioz diamanteen higadura askoz ere txikiagoa izaten da diamantagailu birakarien kasuan (Tawakoli eta Rasifard, 2011).

Oro har, diamantagailu birakariak CBN eta diamantezko artezarriak zorrozteko erabiltzen dira, erremintaren higadura azkarra ekiditeko. Geometriari dagokionez, erreboluziozko xafla mehe bat edo forma bereziko gorputz bat izan daiteke, non kanpoko gainazala diamante txikiz beterik egoten den (2-9. irudia).



2-7. irudia: Diamantatze prozesua diamantagailu estatikoarekin.



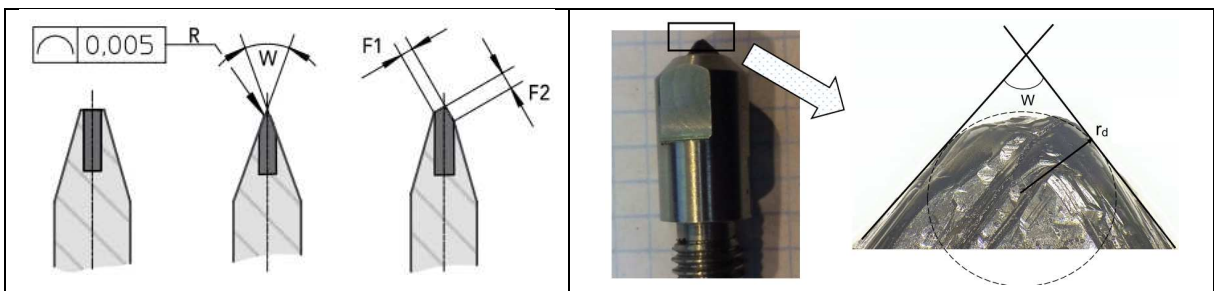
2-8. irudia: Diamantatze prozesua diamantagailu birakariekin.



2-9. irudia: Hainbat formatako diamantagailu birakariak (Dr. Kaiser, 2016).

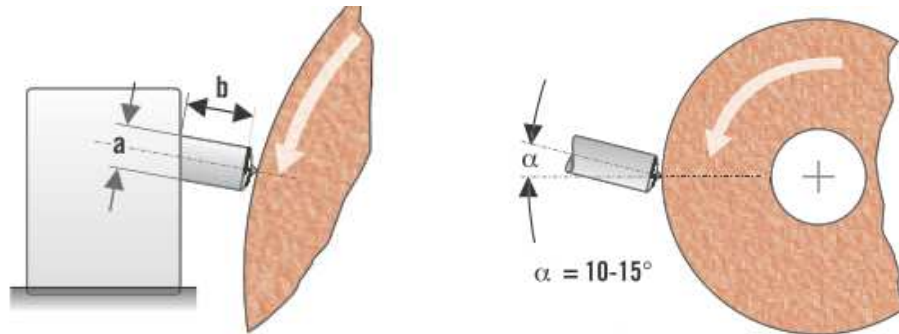
2.2.3. Punta bakarreko diamantagailu estatikoak

Industrian, diamantatze erreminten artean, punta bakarreko diamantagailua da erabilienetakoa (Marinescu et al., 2007; Zan et al., 2004), besteak beste, prestaketa prozesurik samurrena duelako. Erreminta horien oinarria metalezko matrize batean sartutako punta zorrotzeko diamante gordina da; diamantearen heren bat geratzen da metalezko gorputzetik kanpora (Marinescu et al., 2007). 2-10. irudian ikus daitekeen bezala, erremintaren puntak hainbat geometria izan ditzake: sekzio konstantea, erradioan bukatutako punta, angelu jakin batean bukatutako punta, etab.



2-10. irudia: a) Punta bakarreko diamantagailurako geometriak (Dr. Kaiser, 2016); b) Erradio puntadun diamantagailuaren ezaugarri geometrikoak (tesi honen garapenean eskuratutako irudiak).

Diamantagailuaren punta azkar kamuts dadin saihesteko, gomendagarria da diamantagailua artezarriarekiko angelu zehatz batean kokatzea, 2-11. irudian bezala (Graf, 2011; Marinescu et al., 2007; Rowe, 2014). Hala, diamantagailua bere euskarrirekiko 90 gradu biratuz, bestelako ertz zorroztaile batekin lan egiten jarrai daiteke, diamantagailu berria balitz bezala (Rowe, 2009).



2-11. irudia: Punta bakarrekiko diamantagailuaren jarrera gomendagarria artezarriarekiko (Graf, 2011).

Diamantagailuaren puntaren higaduraren eraginez, diamantagailuaren eta artezarriaren arteko kontaktu azalera aldatu egiten da, bai eta diamantatze prozesuaren ezaugarriak ere (hurrengo atalean, sakonago helduko zaio gai horri). Horren ondorioz, lan baldintzak berriro ere definitu behar dira, artezarriaren gainazaleko topografiaren homogeneotasunari eusteko. Hori ekiditeko, gomendatzen da sekzio konstanteko diamantagailu sintetikoak erabiltzea, prozesu osoan diamantagailuaren eta artezarriaren arteko kontaktu luzera berari eutsi ahal izateko (Filho et al., 1999; Wegener et al., 2011).

Kasu bakoitzean erabili beharreko diamantearen kalitatea artezarriaren tamainaren arabera aukeratzen da; zenbat eta diametro handiagoa izan, orduan eta kalitate hobeko diamantea behar da. Kalitatea *carat* deritzon unitatean neurtzen da, eta diamantearen pisuarekin du zerikusia; *carat* bat 0,2 gramo dira. Zenbat eta kalitate hobea, orduan eta ahalmen handiagoa diamantatze prozesuan sortutako beroa diamantagailuaren euskarrira barreiatzeko; horrela, diamantatze baldintza gogorragoekin lan egin daiteke. Oso garrantzitsua da diamantearen tamaina edo kalitate egokia aukeratzea tenperatura altuen eraginez grafitizazioa, kasu, ekiditeko (Graf, 2011).

2.2.4. Diamantatze parametroak eta haien eragina artezketan

2-1. taulan, laburtuta ageri dira punta bakarreko diamantagailuak diamantatze prozesuan eragiten dituen parametro edo aldagai garrantzitsuenak. Horiez guztiez gain, diamantagailuaren puntaren beraren geometriak eta burututako diamantatze iraganaldi kopuruak ere badute eragina harriaren gainazalean lortutako topografiaren kalitatean (Martins et al., 2014; Xue et al., 2002).

2-1. taula: Diamantatze prozesuan eragiten duten parametro nagusiak.

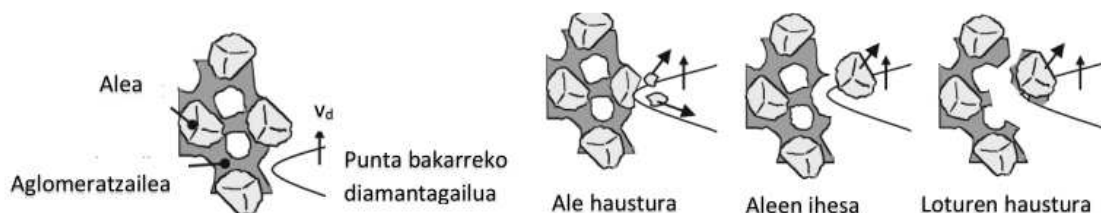
Diamantatze parametroa	Azalpena	Unitateak
U_d	Gainezarpen ratioa	-----
b_d	Diamantagailuaren eta harriaren arteko kontaktu luzera	mm
a_d	Diamantatze prozesuaren sakonera	μm
n_s	Harriaren biratze abiadura	bira/min
S_d	Diamantagailuaren luzetarako aitzinamendu abiadura harriaren bira bakoitzeko	mm/bira
v_d	Diamantagailuaren luzetarako aitzinamendu abiadura	mm/min
v_s	Harriaren abiadura periferikoa	m/s
γ_d	Diamante puntaren zorrotasuna	-----
r_d	Diamante puntako erradioa	mm

Punta bakarreko diamantagailuarekin lan egiten denean, diamantatze prozesuaren aldagai edo parametro horien guztien arteko garrantzitsuenak aitzinamendu abiadura, diamantatze sakonera eta diamantagailuaren puntaren geometria dira (Chen et al., 1996; Klocke et al., 2015b). Kontutan izanda U_d gainezarpen ratioa hiru aldagai horien menpe dagoela, 2.2.4.2. atalean U_d parametroaren azalpena emango da, eta aldagaiok artezketa prozesuko potentzia kontsumoan (artezketa indarrak) zein piezaren gainazal akaberan duten eragina ere aztertuko da. 2.2.4.3. atalean, berriz, diamantagailuaren puntaren geometriaren eta γ_d zorrotasunaren eraginari helduko zaio. Lehenago, ordea, 2.2.4.1. atalean, diamantagailuaren eta artezarriaren arteko higadura mekanismoak azalduko dira.

2.2.4.1. Diamantagailuaren eta harriaren arteko interakzio mekanikoa

Diamantatze prozesuan, diamantagailuaren eta harriaren arteko interakzioaren ondorioz, hiru higadura mekanismo bereizten dira harriaren bertan (Linke, 2007); horiek artezteko harriaren gainazal topografiaren egoera baldintzatuko dute (ikus 2-12. irudia). Lehenik eta behin, ale urratzaileen haustura daukagu, non aleak zati txikitan hausten diren. Oro har, haustura mota hori gertatzen da barne tentsioak, pitzadurak edo sare-egituraren poroak daudenean. Loturen haustura, berriz, loturaren materialean gertatutako hutsegitearen ondorioz sortzen da. Azkenik, alearen gainazalaren eta aglomeratzailearen arteko lotura mekanismoaren hausturaren ondorioz, alea oso-osorik kanporatzen da harri urratzailearen egituratik.

Diamantatze prozesuko higadura mekanismo bezala ale haustura gailentzen denean, ertz ebakitzaila ugari sortzen dira harriaren gainazalean. Aleen ihesa eta loturen haustura gertatzen direnean, aldiz, ertz ebakitzaila dentsitatea murriztu, eta harriaren higadura bolumena handitu egiten da.



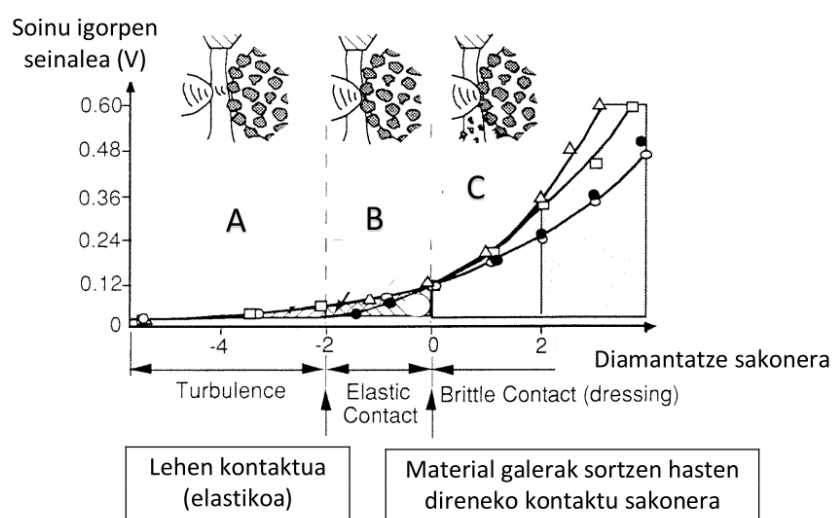
2-12. irudia: Artezketa harriaren higadura mekanismoak diamantatze prozesuan (Linke, 2007).

Mekanismo sailkapen horretaz gain, badaude bestelako sailkapenak ere; Linkek (2008), esaterako, zentzu horretan eginiko hainbat proposamen ditu. Azken finean, denek hartzen dituzte aintzat diamantatze prozesuan sortutako indar normalen eraginez gertatutako aleen pitzadura, haustura, mozketa, gainazaleko deformazio plastikoak, material bigunagoko gainazaleko geruzaren sorrera eta aleen ihesa. Hala, Linkek ondorioztatzen du diamantatze prozesuari buruzko gauzak ez daudela oso finkatuta eta ikerketa gehiago egin behar direla.

Halere, higadura mekanismo horietako edozein gertatu baino lehen, diamantagailuko eta artezarriko aleen artean irristaketa motako lehen kontaktu elastiko bat dagoela frogatu da, kontaktuak berak sortutako soinu igorpen seinaleak aztertu ondoren (Oliveira et al., 1994). Kontaktu elastiko hori (ikus 2-13. irudiko B tartea) mikra gutxiko diamantatze sakoneran

gertatzen da, eta ez du material hausturarik edo galerarik sortzen artezarriaren gainazalean.

Behin kontaktu elastikoari dagokion diamantatze sakonera gaindituta, aleen haustura gertatzen hasten da. Artezarriaren gogortasun mailak eragin handia du eremu elastikoaren tamainan: harri bigunetan, kontaktu elastikoaren sakonera handiagoa izango da harri gogorretan baino, aleen makurdura ahalmena handiagoa baita; harri gogorretan, makurdura ahalmena txikiagoa izanik (loturak zurrunagoak direlako), lehenago gertatuko da ale urratzaileen higadura edo haustura.

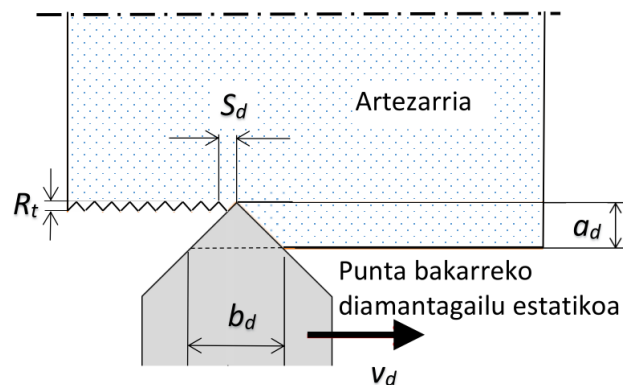


2-13. irudia: Diamantagailuaren eta harriaren interakzio mekanikoaren soinu igorpen seinalearen maila (Oliveira et al., 1994).

Aurrekoarekin lotuta, esan beharra dago diamantatze prozesuak makro eta mikro efektuak sortzen dituela artezarrian (Hassui eta Diniz, 2003). Makroefektua lotuta dago diamantagailuak harrian sortzen duen hariaren profilarrekin, non R_f hariaren sakonera den (2-14. irudia). Zenbat eta makroefektu handiagoa, orduan eta ertz ebakitzaille gutxiago ardezteko harriaren gainazalean eta ardezketan indar txikiagoak. Bestalde, ertz ebakitzaille bakoitzak piezako material kantitate handiagoa kentzen duenez, sortutako gainazalaren zimurtasuna handiagoa da. Mikroefektua, berriz, lotuta dago harriaren ale ebakitzailen eta diamantagailuaren arteko talken ondorioz gertatutako aleen haustura txikiakin.

Oro har, diamantatze indar txikiakin ale haustura txikiak gertatuko dira, eta, lan baldintzak zenbat eta gogorragoak izan, aleen ihesa eta lotura hausturak izateko arriskua handiagoa izango da. Dena dela, diamantatze parametroez gain, era bateko edo besteko higadura

motak, alearen tamainak, aleen arteko distantziak eta harriaren gogortasunak ere baldintzatuko dute prozesua (Marinescu et al., 2004).



2-14. irudia: Punta bakarreko diamantagailu konikoarekin sortutako gainazal zimurtasuna.

Diamantatze prozesua zilindraketarekin aldera daiteke, piezan lortutako gehieneko gainazal zimurtasuna erremintaren geometriaren, sakoneraren eta aitzinamendu abiaduraren menpe dagoen heinean. Arteketa prozesuan, torneaketa erremintaren ordeztan diamantagailua dago, eta piezaren ordeztan arteketa harria. Beraz diamantagailuaren geometriaren eta diamantatze baldintzen arabera harriaren sortutako hariaren R_t sakonera, eta ondorioztatu piezaren gainazaleko zimurtasuna, diamantatze baldintzen arabera izango da handiagoa ala txikiagoa.

Zimurtasuna neurtzeko, ekuazio bat baino gehiago dago (ikus 2-1. eta 2-2. ekuazioak), baina oinarrian edukia bera da.

$$R_{t_1} = \frac{S_d^2}{8 \cdot b_d} \quad \text{2-1. ekuazioa}$$

$$R_{t_2} = \frac{S_d^2}{8 \cdot r_d} \quad \text{2-2. ekuazioa}$$

Zenbat eta luzetarako aitzinamendu abiadura handiagoa, orduan eta zimurtasun balio handiagoa, eta, diamantagailuaren geometriari dagokionez, zenbat eta puntako r_d erradio (ikus 2-10. irudian) edo diamantagailuaren eta harriaren arteko b_d kontaktu luzera handiagoa, orduan eta zimurtasun balio txikiagoa (Malkin eta Guo, 2008; Tawakoli eta Rasifard, 2011).

Oso garrantzitsua da diamantatze baldintza egokiak aukeratzea, zimurtasun balio egokiak lortzeko ez ezik, artezarriaren higadura kantitatea minimizatzen ere (Klocke et al., 2015b); aurrerago 2.4.3 atalean aztertuko den bezala, ikerkuntza bat baino gehiago egin izan da diamantatze ziklo kopuru optimoa zehazteko prozesuko seinaleak aztertze aldera. Dena den, diamantatze prozesuak artezketan duen garrantzia erabatekoa izan arren, hein handi batean langilearen eskarmentuaren arabera definitzen dira diamantatze lan baldintzak, beharrezko azterketa bat egin beharrean (Aguiar et al., 2004; Prateepasen et al., 2001; Wang et al., 2005; Wehmeier eta Inasaki, 2002).

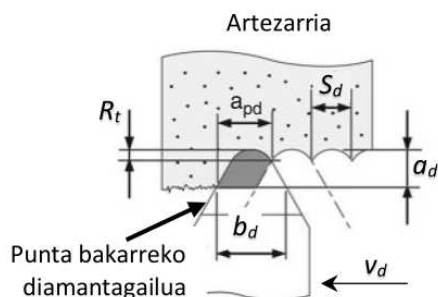
2.2.4.2. U_d gainezarpen ratioa

Artezketa prozesuaren errendimenduan gehien eragiten duten diamantatze parametroetako bat U_d gainezarpen ratioa da. Haren balioa da diamantagailuaren eta harriaren arteko kontaktu luzera b_d eta harriaren bira bakoitzeko diamantatze erremintaren S_d aitzinamendu abiaduraren arteko zatidura (2-3. ekuazioa); harriaren gainazaleko puntu batek diamantagailuarekin duen kontaktu maiztasuna neurtzen du (Tawakoli eta Rasifard, 2011).

$$U_d = \frac{b_d}{S_d}$$

2-3. ekuazioa

U_d -k izan dezakeen balio minimoa 1 da, horrek ziurtatzen baitu harriaren gainazaleko puntu guztiek eduki izana behin, gutxienez, diamantagailuarekin kontaktua (Chen eta Rowe, 1996a; Hassui eta Diniz, 2003).



2-15. irudia: Diamantatze prozesuaren eskema punta bakarreko diamantagailuarekin (Tawakoli eta Rasifard, 2011).

b_d neurria a_d diamantatze sakonerari dagokion kontaktu zabalera maximoa da; a_{pd} -k berriz, diamantearen eta harriaren arteko benetako kontaktu zabalera neurtzen du (ikus 2-15. irudia). Linkek (2008) dio diamantagailuaren eta harriaren arteko benetako kontaktu zabalera b_d baino txikiagoa dela, S_d aitzinamendu abiaduraren arabera. Hauek dira a_{pd} eta U_d -rako definitutako adierazpen matematikoak (2-4. eta 2-5. ekuazioak).

$$a_{pd} = \frac{b_d + S_d}{2} \quad \text{2-4. ekuazioa}$$

$$U_d = \frac{a_{pd}}{S_d} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{b_d}{S_d} + 1 \right) \quad \text{2-5. ekuazioa}$$

Punta bakarreko diamantagailua erabiliz eta lortu nahi den artezketa prozesuaren emaitzaren arabera, gainezarpeneratioaren balio eskala bat proposatzen da ondoko 2-2. taulan.

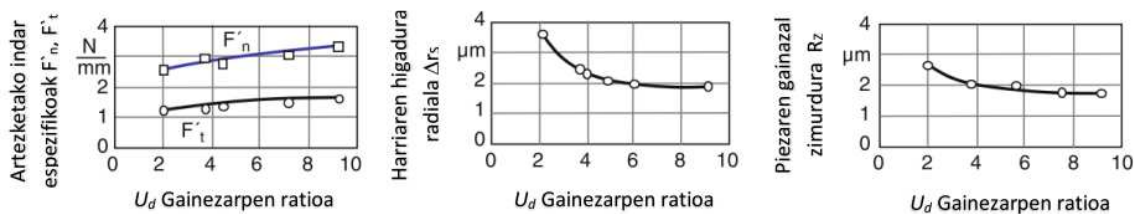
2-2. taula: U_d gainezarpeneratioaren ohiko erabilpen balioak aluminazko artezketa harrirako (Graf, 2011; Marinescu et al., 2013; Rowe, 2009).

Artezketa prozesua	U_d balioa	a_d balioa
Arbastatzea	2-3	25-30 μm
Erdi-mailako artezketa	3-4	15-20 μm
Akabera	6-8	5 μm

Diamantatze larriko prozesua osatu nahi denean, U_d balio txikiak erabiltzen dira, hau da, harriaren bira bakoitzeko diamantagailuaren luzetarako S_d aitzinamendu abiadurak balio handiak hartzen ditu; kasu horretan, a_d diamantatze sakonera balio handiekin lan egiten da, eta artezketa harriaren higadura erradiala handiagoa izaten da (ikus 2-16. irudiko erdialdean). Lan baldintza horiekin artezketa harriaren gainazalean lortutako diamantatze helizea sakona da (ikus 2-15. irudia), eta sortutako ebaketa ertz dentsitatea murrizta, aleen hausturaren eta ihesaren ondorioz, batez ere (Rowe, 2009).

Ale urratzaileen eta diamantagailuaren artean sortutako talka bortitzek aleen haustura handiagoak eta loturen haustura gehiago sorrarazten dituzte. Horren ondorioz, harriaren gainazalaren egitura zabalago geratzen da, eta artezketako indar espezifikoak txikiagoak izaten dira; zenbat eta ertz ebakitzailerioak sortu harriaren gainazalean, orduan eta txikiagoak artezketa indarrak, 2-16. irudian nabari daitezkeen bezala (Inasaki eta

Okamura, 1985). Artezarria higatu ahala, aldiz, harriaren gainazaleko ale urratzaileak kamustu, eta beste ertz ebakitzaila batzuk sortzen dira; hala, potentzia maila handitu egiten da, eta zimurtasuna murriztu (Chen et al., 1998).



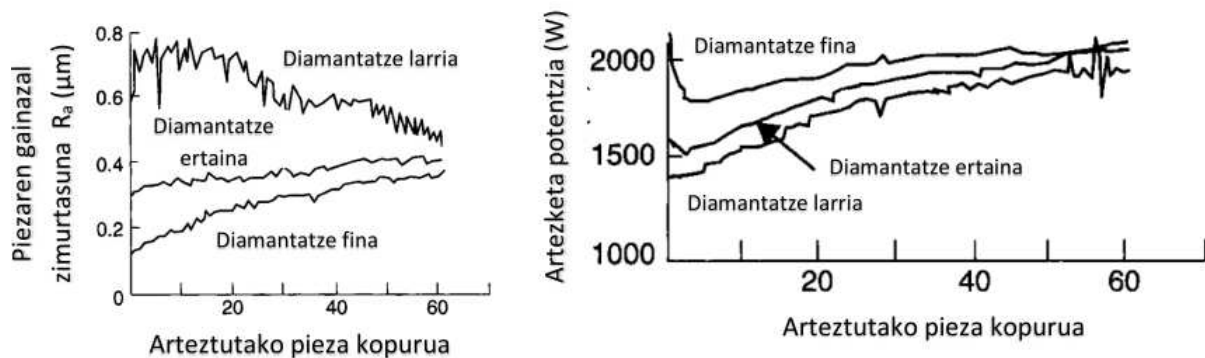
2-16. irudia: U_d gainezarpeneratioaren eragina arteketako indar espezifikoan (ezkerraldean), harriaren higadura erradialean (erdian) eta piezaren gainazal zimurtasunean (eskuinaldean) (Tawakoli eta Rasifard, 2011).

Diamantatze fineko lan baldintzekin, berriz, U_d balio handiagoeekin eta a_d balio txikiagoeekin, alegia, ale gehiago uzten dira agerian harriaren gainazalean, eta ebaketa ertz dentsitatea handiagoa izaten da. Kasu horretan, harriaren gainazalean sortutako helizearen sakonera txikiagoa da, eta txirbil askoz ere txikiagoak sortzen dira artezketa prozesuan. Artezketa indar handiagoak (2-16. irudiko ezker aldean) eta gainazal zimurtasun balio txikiagoak (2-16. irudiko eskuinaldean) lortzen dira arteztutako piezan. Artezketa prozesuak aurrera egin ahala, beste haustura batzuk sortuko dira ale-urratzaileetan, eta ertz ebakitzaila zorrotzagoak sortuko dira; ondorioz, artezketa potentzia txikiagotu, eta gainazal zimurtasuna handitu egingo da.

2-17. irudiko grafikoetan ikus daitekeen bezala, esan daiteke hasiera batean diamantatze prozesuan definitutako lan baldintzek eragin handia dutela artezketa prozesuan, baina, artezketa zikloak burutu ahala, potentziak eta zimurtasunak antzeko balioak hartzen dituzte. Kasu gehienetan, gainazal zimurtasuna nahiz artezketa prozesuan kontsumitutako potentzia handitu egiten dira, gainazal erredurak eta bibrazioak sortzeko arriskuarekin batera, eta diamantatze zikloa berriz burutzea beharrezkoa bihurtzen da.

Arteketako harriaren higadura eboluzioaren modeloak ere sortu dira hainbat diamantatze baldintzatarako, gainazal zimurtasuna eta artezketa potentziak aurreikusteko (Chen eta Rowe, 1996a). Modelo honen bitartez, harriaren ebaketa gainazala sortzen da, diamantagailuaren eta artezketa harriaren arteko interakzio edo elkarrekintza simulatuz. Baldintza berak erabilita, proba esperimentalak egin izan dira, eta jarraian lortutako bi emaitzak (simulazio bidezkoak eta proba esperimentalenak) alderatu; parekotasun handia

ikusi da bien artean, hots, diamantatze baldintza baxuetarako (akabera baldintzak) artezketa potentzia handiak eta gainazal zimurtasun balio txikiak lortzen dira. Diamantagailuaren aitzinamendu abiadura eta diamantatze sakonera handitu ahala, potentzia txikiagotu egiten da, eta zimurtasuna, oster, handitu.



2-17. irudia: Diamantatze lan-baldintzen eragina artezketa prozesuaren potentzia kontsumoan eta piezaren gainazal zimurtasunean (Rowe, 2014).

Erreferentziatzko U_d eta a_d balioak (2-2. taula) artezketa harriaren aleen tamainaren arabera handi edo murriz daitezke (Marinescu et al., 2007). Praktikan gertatzen den arazo bat izaten da diamantagailuaren luzetarako aitzinamendu abiadura oso txikiak erabiltzea, hau da, U_d balio oso handiak, akabera finak lortzeko; kasu horretan, diamantagailuaren eta harriko aleen arteko interakzio kopurua asko handitzen da eta, diamantagailuaren beraren higadura azkartzeaz gain, ale urratzaileak ere kaltetu egiten dira, gainazal erredurak izateko arriskua areagotzearekin batera. Artezketa indar oso handiak lortzen dira lan baldintza horietan (Rowe, 2009). Beraz, U_d balioa handitzeak, balio jakin batetik aurrera, ez du zentzurik, artezketa prozesuan ez baitu inolako eraginik; diamantatze prozesua burutzeko denbora luzatzea eta kostua handitzea besterik ez da lortzen (Wegener et al., 2011).

2.2.4.3. γ_d zorrozatasun ratioa

Artezarriaren gainazalaren leuntasuna diamantagailuaren γ_d zorrozatasun ratioaren baitan ere badago. Balio hori da a_d diamantatze sakoneraren eta sakonera horri dagokion b_d diamantagailuaren eta harriaren arteko kontaktu luzeraren arteko zatidura (2-6. ekuazioa).

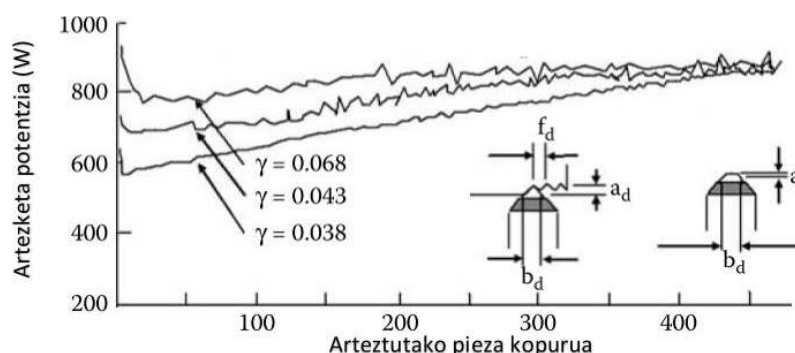
$$\gamma_d = \frac{a_d}{b_d}$$

2-6. ekuazioa

Zorroztasun ratioa diamantagailuaren puntaren geometria ratio gisa ere uler daiteke, eta aplikagarria da punta konikoa (2-14. irudia) zein erradioan bukatutakoa (2-15. irudia) duten punta bakarreko diamantagailuetarako ere. Erradioaren balioa zenbat eta handiagoa, zorroztasun ratioa orduan eta txikiagoa; hala, sortutako artezarriaren gainazal leunagoa espero daiteke.

Gainezarpen ratioarekin egin bezala, diamantagailuaren zorroztasun ratioaren aldaketak artezketa prozesuan duen eragina aztertu da, proba esperimentalak eta simulazio metodoak alderatuta (Chen et al., 1996). Artezketa prozesuko indarrei dagokienez, simulazio bidez nahiz espermentalki lortutako emaitzak oso antzekoak dira: diamantagailu zorrotzekin osaturiko diamantatze prozesuek ertz ebakitzaila zorrotzak sortzen dituzte artezarriaren gainazalean, eta artezketa indarrak txikiak dira. Bestalde, asko kamustutako erreminta erabiliz gero, aleen haustura garrantzitsuak sortzen dira harriaren gainazalean, hala nola ebaketa ertz gutxiago; kasu horretan ere, artezketa indarrak txikiak dira. Horrenbestez, esan daiteke diamantagailuaren zorroztasun ratioak ziurgabetasuna sortzen duela artezketa indarrean.

Diamantatze prozesuak eginaren eginaz, diamantagailua ere higatuz joaten da, zorroztasun ratioa poliki-poliki txikituz (Marinescu et al., 2007). Kamustutako diamantagailua erabiltzearen ondorioz, ale haustura garrantzitsuak eta ale ihesak sortzen dira artezarriaren gainazaleko aleetan, eta ale ebakitzaila dentsitatea murriztu egiten da. Aurretik azaldu bezala, horrek artezketa indarrak txikitzen ditu (2-18. irudia), eta piezaren gainazal zimurtasuna asko areago dezake. Oro har, diamantagailuaren higadurak oso ezegonkorra bilakatzen du artezketa prozesua; besteak beste, bibrazio markak edo erredurek eragiten ditu piezaren gainazalean (Rowe, 2009).



2-18. irudia: Higatutako diamantagailuaren eragina artezketa potentzian, arteztutako material kopuruaren arabera (Chen, 1995).

Ondoriozta daiteke, 2-17. eta 2-18. irudietako potentzia grafikoak alderatuz gero, artezketa prozesuan eragin bertsua duela gainezarpen ratio txikiko eta zorrotasun ratio txikiko diamantagailuak erabiltzeak, eta, era berean, gainezarpen ratio handiko eta zorrotasun ratio handiko erremintak erabiltzeak.

2.3. DIAMANTAGAILUAREN HIGADURA

Diamantatze zikloak burutu ahala, diamantagailuaren beraren punta ere higatuz eta kamustuz joaten da; ondorioz, artezarriaren gainazaleko topografia egokia lortzeko gaitasuna galdu, eta artezketa prozesuaren errendimendua murriztu egiten da (Zan et al., 2004).

Artezketa prozesuan gertatzen den bezalaxe, diamantatze prozesuan ere G_d higadura ratioa erabiltzen da diamantagailuaren higadura maila neurtzeko: diamantatutako artezarriaren gainazaleko V_{sd} bolumena eta diamantagailuaren beraren V_d higadura bolumena lotzen ditu (Jackson et al., 2007; Minke, 1988); ez da erreferentziatzko baliorik aurkitu kontsultatutako bibliografian.

$$G_d = \frac{V_{sd}}{V_d}$$

2-7. ekuazioa

Diamantagailuaren puntaren higadurak garapen edo eboluzio estandar bat dauka, ohiko diamantezko erremintarenaren oso antzekoa (Dimla, 2002; Marinescu et al., 2013). Eboluzio hori 3 ataletan banatzen da (ikus 2-19. irudia):

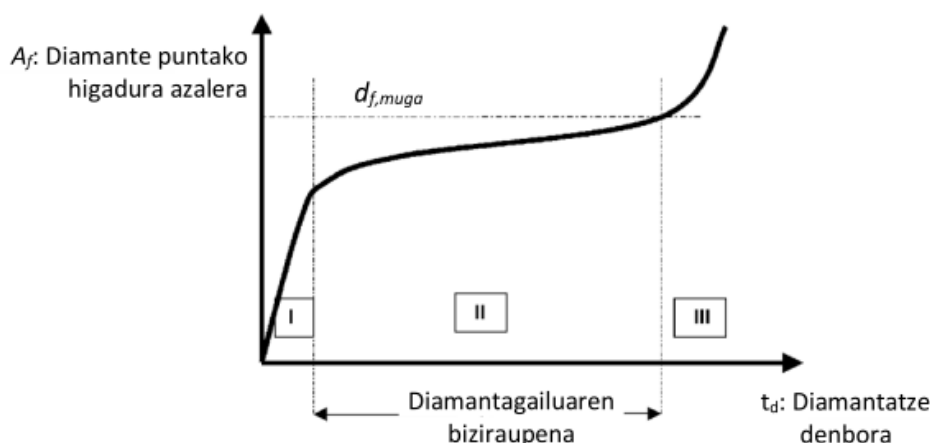
- I. *Haserako higadura*: erremintaren higadura azkarra gertatzen da, diamantagailuaren puntan higadura azalera txikia sortzen den arte. Lehen fase honek, oro har, oso gutxi irauten du.
- II. *Higadura konstantea*: bigarren fase honetan, erremintaren puntako higadura azaleraren (A_f) garapen lineala jazotzen da, eta horren iraupenak azaleraren neurriak mugatzen ditu; Marinescu et al.-ek (2007) azalera horren gehieneko diametroaren balioa ere adierazi zuten beren lanean (2-8. ekuazioa), baina haren jatorria zehaztu barik, hots, emaitza horretara iristeko eginiko diamantatze proba esperimentalen ezaugarriak, adibidez.

$$d_{f,muga} \leq 0.6 \text{ mm}$$

2-8. ekuazioa

Doktoretza tesi honetan, diamantagailuaren higaduraren garapena aztertzeko proba esperimentalak egin dira (ikus 3.3.1. atala), eta diamante puntako A_f higadura azalera eta diamante eta harriaren arteko b_d kontaktu azalera aldagaien eboluzioak neurtu dira.

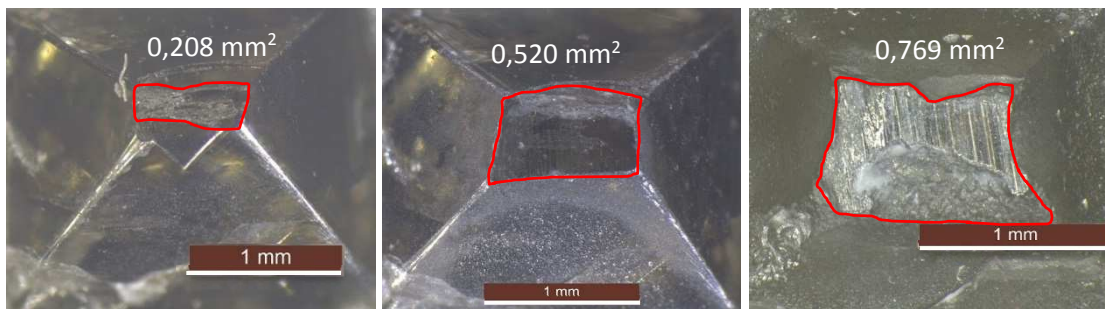
- I. *Erremintaren bizitza amaiera*: azken fase honen bereizgarria da diamantatze prozesuaren higadura ratioa nabarmen handitzen dela. Higaduraren hazkundeak joera esponontziala dauka, eta erremintak kalte larriak jasateko arriskua. Fase hau diamantearen biziraupenetik kanpo dagoela esaten da.



2-19. irudia: Diamantagailuaren higaduraren eboluzioa 3 fasetan (Marinescu et al., 2013).

Hortaz, esan daiteke diamantagailuaren eta artezarriaren arteko kontaktu ezaugarriak aldatuz joaten direla diamantatze prozesu osoan, eta horrek berak ematen dio diamantatzeari oso aldakorra eta askotan kontrolatzen zaila izatearen ezaugarria. Zentzu horretan, Martins et al.-ek (2014) teorian berdinak ziren 3 diamantagailuarekin eginiko proba esperimentalean ikusi zuten batarekin eta bestearekin lortutako higadura eboluzioen artean alde nabariak zeudela; aldeok diamantagailuaren materialaren hauskortasunari egotzi zizkion, eta ondorioztatu zuen diamantagailu bakoitzak biziraupen desberdina duela.

Ondorengo irudietan, higadura eboluzio horren kasu erreal bat erakusten da (2-20. irudia), non diamantatze iraganaldien eraginez higatutako azalera % 270 hazi daiteke (kasu konkretu honetan).



2-20. irudia: Punta bakarreko diamantagailu estatikoak jasandako higadura egoerak neurtutako azalera balioarekin: lehen fasea (ezkerraldean), bigarren fasea (erdialdean) eta hirugarren fasea (eskuinaldean).

Diamantagailuaren higadura nabarmen baldintzatzen du artezarria osatzen duten ale urratzaileen gogortasunak; CBN edo SiC motako aleen diamantatze prozesuan diamantagailuak jasango duen higadura Al_2O_3 aleekin izango duena baino handiagoa da. Era berean, diamantatze prozesuan sortutako indar normala dezente handiagoa da (hiru aldiz baino gehiago) lehen kasuan bigarreanean baino (Moritomo, 1980). Emaitza horiekin lotuta, Nakajima et al.-ek (1990) ondorioztatu zuten, proba esperimenter batzuk egin ondoren, punta bakarreko diamantagailuaren higaduraren eta diamantatze indarren arteko zuzeneko erlazioa dagoela, batetik, eta, bestetik, diamantatze indarrak eragin nabarmena duela arteztutako piezaren gainazaleko zimurtasunean.

Mochida et al.-ek (2009) beste pauso bat eman, eta baieztatu zuten diamantatze indarrak diamantagailuaren eta artezarriaren arteko talka maiztasunarekin batera hazten direla, hots, a_d diamantatze sakonera eta S_d luzetarako aitzinamendu abiadura handiekin lan egiten denean. Horrez gain, higatutako diamantagailuarekin lortutako diamantatze indarrak erreminta zorrotzarekin lortutakoak baino handiagoak dira. Oro har, eginiko proba esperimenteralen emaitzen arabera, zenbat eta diamantatze indar handiagoak, orduan eta gainazal zimurtasun handiagoa. Higatutako diamantagailu batekin lortzen den gainazal zimurtasuna, ordea, zorrotzarekin lortutakoa baino zertxobait hobea da (R_a txikiagoa).

Ale urratzaileen tamaina handiak ere diamantagailuaren biziraupena murrizten du, diamantagailuaren eta aleen arteko kontaktu azalera handitu, eta bien arteko kontaktu iraupena luzatu egiten baita (Marinescu et al., 2013).

Kontuan hartuta diamantagailuaren higadurak artezketa prozesuan duen eragin nabarmena, ezinbestekoa da higadura kontrolatzea eta, ahal den neurrian, minimizatzea. Horretarako, nahitaez ezagutu behar dira diamantatze prozesuaren baitako mekanismoak.

Diamantagailuaren higaduraren jatorriari buruzko ikerketak 80-ko hamarkadaren bukaeran izan zuen lehen ekarpena. Horren arabera, diamantagailuaren higadura bi mekanismo nagusiren eraginez gertatzen da: batetik, diamantagailuak artezariarekin duen etengabeko urraduragatik, eta, bestetik, neke termikoaren ondorioz sortutako hausturagatik (Tkhangapsoev et al., 1983; Tkhangapsoev eta Khapachev, 1987). Diamantagailuaren puntan higatutako azaleraren mikrostrukturaren eboluzioa aztertu zen mikroskopio metalografiko baten bitartez, diamantagailuaren higadura fase bakoitzean (ikus 2-19. Irudia). Emaitza izan zen mikrostrukturak aldaketa nabariak jasaten zituela, diamantagailuaren higadura areagotu ahala.

Lehen fasea hasten da erremintaren puntaren haustura hauskorrearekin eta higadura azalera txiki baten sorrerarekin. Diamantearen eta ale urratzaileen arteko etengabeko kontaktuaren ondorioz, higadura gainazal hori gero eta handiagoa egiten da, bai eta sortutako bero kantitatea ere. Metodo esperimentalak (termopareak) eta analitikoak (Fourierren konduktibitate termikoaren ekuazioa) uztartuta, 1.423 K-era bitarteko tenperaturak neurtu ahal izan zituzten, kontaktu gainazalean lan baldintza zehatz batzuetarako (hozgarri emari handiak erabiliz). Temperatura maila horietara igotzeak nabarmen murrizten du diamantearen eroankortasun termikoa (ikus 2-3. taula) eta tentsio termoelastikoak sortzen dira diamantagailuaren gainazaleko sakonera txiki batean. Ziklikoki agertzen diren tentsio termoelastiko horiek diamantearen erresistentzia tentsioaren bezainbestekoak direnean, nahikoak dira neke kalteak sortzeko.

2-3. taula: Erabilitako diamantearen eroankortasun termikoaren aldaketa tenperaturarekiko (Tkhangapsoev et al., 1983).

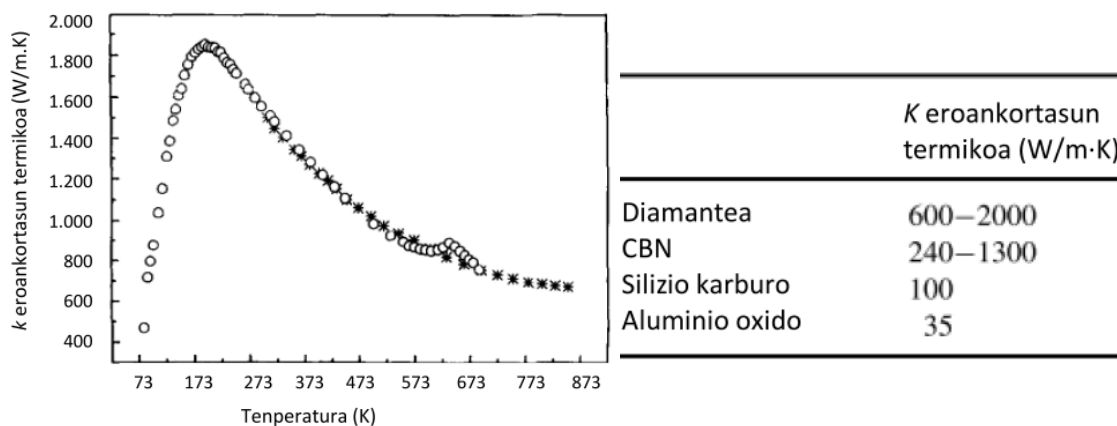
Temperatura (K)	273	373	573	773	1.073	1.273	1.773
k eroankortasun termikoa [W/m·K]	146,5	96,2	52,2	33,5	29,3	25,1	20,9

Probetan erabilitako diamante naturaletarako emandako diamantearen eroankortasun termiko balio horiek oso txikiak dira oro har bibliografian agertzen diren balioekin

alderatuta. Ondorengo irudian (2-21. irudia) balio ohikoagoak ageri dira: ezkerraldean diamante naturalerako eta eskuinaldean artezarrietan erabiltzen diren ale urratzaile motetarako.

Bestalde, diamantatze prozesuan gertatzen diren temperatura aldaketa nabariet mikroyausturak sortzen dituzte diamantagailuaren gainazalean, poliki-poliki handitzen direnak; horri tentsio ziklikoak gehituta, diamantagailuaren haustura gertatzen da.

Aurreko azalpen hori guztiori nolabait kuantifikatzeko, formula bat garatu zen ale bakarreko diamantagailuak jasaten duen higadura ratioa kalkulatzeko (cm^3/s unitatean) (Tkhangapsoev eta Khapachev, 1987): kontuan hartzen dira, besteak beste, kontaktu azalera, tenperaturagatik kaltetutako diamantagailuaren gainazal sakonera, temperatura, eroankortasun termiko balioa eta konpresioa gehieneko tentsioa. Kalkulatutako higadura ratioak $5 \cdot 10^{-8} \text{ cm}^3/\text{s}$ inguruan dabilta. Geroago egin izan dira beste saiakera batzuk higadura ratio hori kuantifikatzeko; batzuek prozesuko beste aldagai batzuk izan dituzte kontuan (materialaren HV gogortasuna, adibidez), eta beste batzuek ikuspegi estatistikotik heldu diote, diamantatze zikloa prozesu estokastikoa dela aintzat hartuta (Sheiko, 2007).

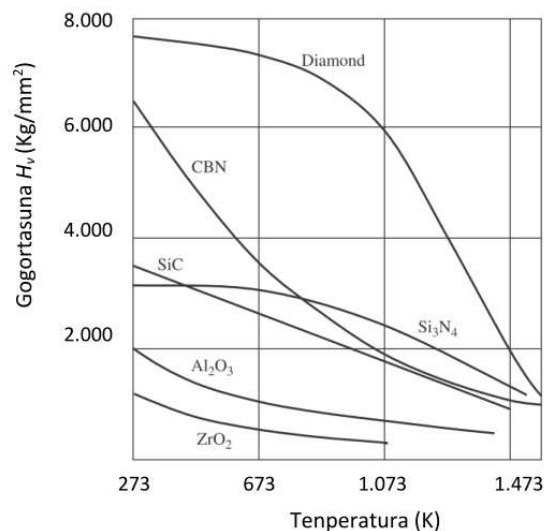


2-21. irudia: Diamantearen eroankortasun termikoa tenperaturaren menpe ezkerraldean (Wörner et al., 1996) eta ale-urratzaile motetarako eroankortasun termikoaren balioa giro-tenperaturan eskuinaldean.

Temperaturak diamantearen haustura tentsioan eta jokaera termoelastikoan duen eragina aztertzeko, dinamika molekularrean oinarritutako zenbait simulazio ere egin izan dira (Luque et al., 2008). Frogatuta dago temperatura altuekin (1.000 K) gehieneko tentsioa % 30 murriz daitekeela, 100 K-eko tenperaturaz neurtutakoarekin alderatuz; horrek berretsi egiten du aurretik esandakoa temperatura mailaren eta materialaren propietate

mekanikoen aldaketaz. Beste adibide bat ondorengo 2-22. irudian ikus daiteke; Telle-k (2015) gehien erabiltzen diren ale urratzaileek tenperatura igoyerarekin jasaten duten gogortasun mailaren murrizketa nabarmena irudikatzen du, eta ikus daiteke diamantearen kasuan gogortasunaren balioa % 75 murriztu daitekeela.

Beste ikertzaile batzuk diamantagailuan lortutako tenperatura altuen eraginez (973 K inguruan) diamantagailuan bertan grafitozko egitura molekularrak sortzeko arriskuaz mintzatzen dira (Coelho et al., 2000; Linke eta Klocke, 2010). Grafittoa, diamantearekin batera, karbonoaren agerpena izan dezakeen forma alotropiko bat baino ez da, baina haren propietate mekanikoak diamantearenak baino ahulagoak direnez, diamantatze prozesuaren errendimendua nabarmen murrizten da. Beraz, ezinbestekoa da diamantatze prozesuan sortzen den tenperatura kontrolatu ahal izatea diamantagailuaren higadura murrizteko.



2-22. irudia: Ohiko ale-urratzaileen gogortasuna tenperaturaren arabera (Telle, 2015).

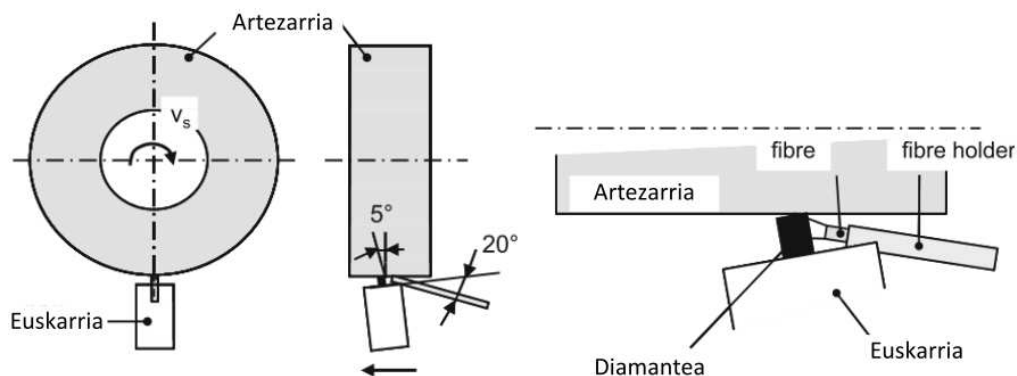
Coelho et al.-ek (2000), lauza-erako diamantagailua erabiliz, bi eredu matematiko garatu zituzten diamantatze prozesuan sortutako tenperatura kalkulatzeko; horietako bat elementu finituetan oinarrituta dago. Eredu horietan, aldagai gisa kontuan hartu zituzten, diamantagailuaren geometriaz gain, hozte sistema eta diamantagailuaren euskarriko hainbat eroankortasun termikotako materialak. Emaitza ondokoa da: euskarriko tenperatura kalkulatu da diamantagailu erremintatik oso gertuko puntuetan, termopare bidez; jarraian, kalkulatu dira, batetik, diamantagailuaren puntan artezariarekin kontaktuan dagoen azalerako tenperatura, eta, bestetik, diamantagailura bideratutako

prozesuan sortutako bero fluxua eta energiaren kontserbazioa, Fourierren konduktibitate termikoaren ekuazioa zein sistemaren muga baldintzak erabiliz. Ez da adierazten diamantagailuan zuzenean kalkulaturako tenperaturarik; emaitza horiek diamantagailuan bertan neurtutako tenperaturarekin alderatzea oso baliagarria izango litzateke, erabilitako ereduaren baliozkotasuna frogatzeko.

Azkenik, temperatura altuen eraginez sortutako higadura gutxitzeko, aipatu egileek proposatzen dute diamantagailuaren bolumena handitzea, eroankortasun termiko handiko materialak erabiltzea euskarri bezala eta bero trukagailu sistema eraginkorrez baliatzea.

Diamantagailuaren azalera bertan temperatura neurtu ahal izateko, Linke eta Klocke-k (2010) kolore biko pirometro temperatura neurgailua erabili zuten (ikus 2-23. irudia). Tenperaturak sortutako higadura mekanismoak hobeto azaltzeko, hozgarririk gabeko diamantatze probak egin zituzten. Kolore biko pirometroarekin eginiko temperatura neurketak materialaren emisibitatearekiko independenteak dira, eta esan beharra dago haren erresoluzio maila oso handia dela neurketa mota honen baliozkotasuna frogatzeko.

Aipatu egileek aluminazko artezarriaren (lotura zeramikoak) profilaketa egin zuten punta bakar eta sekzio konstanteko ($0,8 \times 0,8 \text{ mm}^2$) diamantagailu estatiko batekin (CVD motako diamante poli-kristalinoa), eta tenperaturaren neurketak egin ziren diamantean bertan kontaktu eremutik oso gertuko puntu batean (ikus 2-23. irudia).



2-23. irudia: Kolore biko pirometro bidezko temperatura neurketa diamantagailuan (Linke eta Klocke, 2010).

Proba esperimental horiek oinarritzen ziren, nagusiki, alde zuzenetik elementu finitu bidez definitutako eredu batean (Klocke eta Linke, 2008); jarraian, horren emaitzak eta ondorioak azaltzen dira.

Lehenik eta behin, oxigenozko ingurune batean lan baldintza horiekin eragindako temperatura altuen ondorioz (1.073 K ingurukoak), diamantagailuaren azalera oxidazio eta grafitizazio zantzuak agertzeko eta propietate mekanikoak ahultzeko aukera oso handia da. Bigarrenik, erakutsi nahi izan zuten eragindako temperatura maila diamantagailuaren eta artezarriko ale urratzaileen arteko talka maiztasunaren menpe dagoela, hau da: zenbat eta maiztasun handiagoa, orduan eta temperatura handiagoa. Hori frogatzeko, proba esperimentaletan erabili zituzten a_d diamantatze sakonera, harriaren biratze abiadura eta diamantagailuaren luzetarako aitzinamendu abiadura balio desberdinak; 2-4. taulan jaso dira balio horiek.

2-4. taula: Hozgarririk gabe eginiko diamantatze probetan erabilitako prozesu parametroak.

Aldagaia	Gutxienekoa	Gehienekoa
a_d : diamantatze sakonera (μm)	15	30
U_d : gainezarpen ratioa	6	15
v_s : harriaren abiadura periferikoa (m/s)	30	45

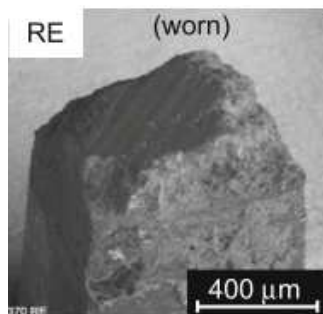
Gainezarpen ratioa handitzean, hau da, diamantagailuaren luzetarako aitzinamendu abiadura txikitzean, temperatura maximoen jaitziera bat neurtu zuten diamantagailu eta ale-urratzaileen arteko talka-frekuentziaren gutxitzearen ondorioz; zenbat eta talka gutxiago marruskadura indarra ere txikiagoa da eta beraz sortutako bero kantitatea ere jaitsi egiten da. Harriaren abiadura periferikoa handitzeak gehieneko temperatura igo zuen, aurreko kasuan azaldutako arrazoi beragatik.

Diamantatze sakonera handituta, aldiz, ez zuten lortu esperotako emaitza, alegia, temperaturaren igoera; alderantziz, temperatura zertxobait jaitzi zen. Teorian, sakonera handituta, diamantagailuak ale urratzaile gehiagorekin egingo du talka, talka maiztasuna eta, ondorioz, temperatura areagotuta. Haien ustez, horren arrazoia izan daiteke artezarriko gainazal topografiaren sorrera mekanismoaren aldaketa bat. Diamantatze sakonera handiekin, talka maiztasuna areagotu egiten denez, diamantatze indarrak ere handiagoak izaten dira, eta horrek eragiten du aglomeratzaile eta ale urratzaileen arteko loturak ahultzea edo apurtzea, hala nola ale urratzaileen ihesa (Klocke eta Linke, 2008). Diamantatze sakonera txikiekin lan egitean, aldiz, marruskadura indarrek garrantzi handiagoa hartzen dute eta, ondorioz, lortutako temperaturak handiagoak izaten dira.

Ondorio horiek guztiak industrian oso erabiliak diren lan baldintzetan eskuratutakoak badira ere (M gogortasun mailarekin, 6 porositate mailarekin eta 80-ko ale urratzaile tamainako aluminazko artezarriarekin), emaitzak oso bestelakoak izan daitezke, beste baldintza batzuetan lan eginez gero.

Bestalde, erabilitako diamantagailua CVD motakoa da; halakoek, lan baldintza egokietan, diamantagailuaren eta artezarriaren arteko kontaktu azalera berari eusten diote. Halere, lehorreko diamantatze zikloak burutu ondoren, diamantagailuak jasandako higadura nabaria izaten da (2-24. irudia) eta ez da aztertzen kontaktu azaleraren aldaketak talka maiztasunean izan dezakeen eragina; harriaren biratze abiaduraren, diamantatze sakoneraren eta aitzinamendu abiaduraren eragina besterik ez da aztertzen.

Azkenik, egiaztatu zen diamantagailuaren gainazalean ale urratzaileen hondarrak ageri zirela, eta, artezarriarekin kontaktuan jartzean, eragina zutela diamantagailuaren higaduran; ez zen egin horren gaineko azterketa sakonagorik. Azken finean, hozte sistema bat beharrezkoa da tenperatura maila kontrolatzeko eta material hondar horiek kanporatzeko.



2-24. irudia: CVD motako diamantagailuaren higadura (Linke eta Klocke, 2010).

Atal honetan esan bezala, diamantagailuaren eta artezarriko ale urratzaileen arteko talka kopuruak eta intentsitateak eragin handia dute diamantatze prozesuan. Linke-k (2008) punta bakarreko diamantagailu estatiko bat eta artezarri modelo sinplifikatu bat definitu, eta bien arteko talka kopurua segundoko kalkulatu zuen. Balio hori lortzen da artezarriaren gainazalean mekanizatutako geruzaren bolumen tasa eta harriko ale urratzaile dentsitatea biderkatuz. Diamantatze prozesuan gertatutako talka kopuruak diamantagailuak jasandako marruskadura ziklo kopurua adierazten du; beraz, zenbat eta talka kopuru handiagoa,

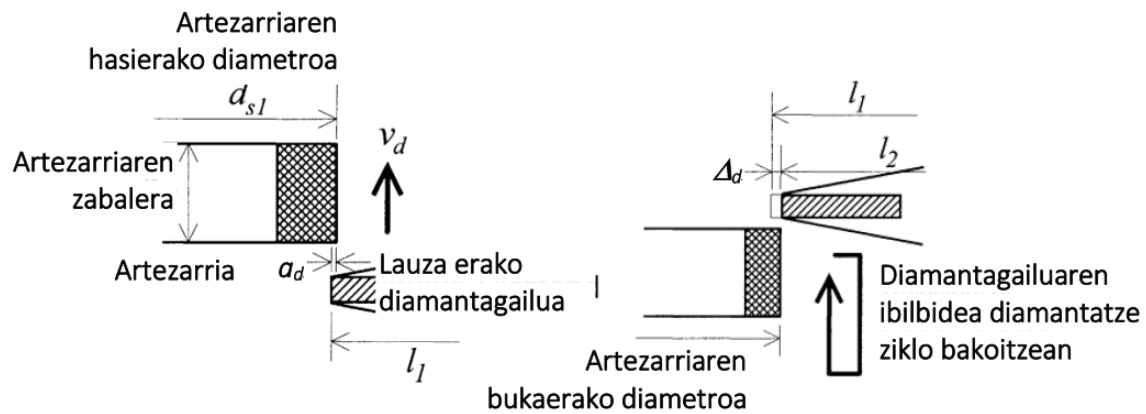
orduan eta bero kantitate handiagoa sortuko da, termikoki eragindako higadura arriskua areagotuta.

Kalkulu bera egin zen diamante punta ugariz osatutako ontzi itxurako diamantagailu birakari baterako eta CBN aleko artezarrirako (Brinksmeier eta Çinar, 1995). Talka maiztasunaren kalkulutik abiatuta, artezarriko ale bakoitzak jasandako talka kopurua ere kalkulatu, eta horrek artezketa prozesuan zuen eragina aztertu zuten, bai artezketa indarretan, baita gainazalaren zimurtasunean ere. Horrez gainera, erakutsi zuten talka kopurua U_d gainezarpen ratioaren, aitzinamendu abiaduraren eta artezarriaren ezaugarrien menpe dagoela.

Ale urratzaileek jasandako talka kopurua zenbat eta handiagoa, orduan eta artezketa indar (indar normala) handiagoak sortzen dira, eta, hala, ale urratzaileen higadura maila areagotu egiten da, ebaketa ahalmena murriztearekin batera. Une jakin batetik aurrera, talka maiztasuna gehiago handitzeak ez du neurri berean igoarazten artezketa indarra, aleek jasandako higadura lauagatik artezarriaren gainazala erabat itxia egoten baita. Harriak jasandako ebaketa ahalmen murrizketa horrek esplikatzen du talka kopuru handiekin zergatik ez diren lortzen G_d diamantatze higadura ratio handiak. Arteztutako piezaren gainazal zimurtasunari dagokionez, txikitu egiten da, talka kopurua handituz gero, gainazaleko aleen protrusio maila txikia baita.

Lauza-erako diamantagailuetan (2-5. irudia) gertatutako higaduraren garapena ere aztertu izan da beste ikerketa batzuetan (Shih eta Akemon, 2001). Aurretik esan bezala, mota horretako erremintek punta bakarrek baino higadura txikiagoa jasaten dute, diamantatze punta kopurua handiagoa delako; halere, haien higadura kontrolatu egin behar da, artezketa prozesuan emaitza fidagarriak lortzeko. Diamantatze parametroekin jokatuz, horretarako giltzarria da diamantagailuaren higaduraren eboluzio motel eta egonkorra lortzea.

Ikasketa honetan, lauza-erako diamantagailuaren higadura zehaztasun handiarekin neurtzeko metodologia bat garatu da: diamantatze prozesuaren parametroak a_d diamantatze sakonera, luzetarako v_d aitzinamendu abiadura eta burututako diamantatze zikloak dira, eta neurtutako balioak artezarriaren eta diamantagailuaren haserako eta bukaerako neurriak, diametroa eta luzera, hurrenez hurren (2-25. irudia).



2-25. irudia: Lauza-erako diamantagailuaren higaduraren neurketa (Shih eta Akemon, 2001).

Diamantagailuan higadurarik gertatzen ez den bitartean, artezarriaren diametro aldaketa buruturiko diamantatze ziklo kopuruaren eta a_d diamantatze sakoneraren menpe egongo da (bi parametro horien biderkadura); Δ_d higadura gertatzen denean (2-25. irudia) ordea, makinaren CNC bidez konpentsatu behar da alde hori, artezarriaren diamantatze zikloa neurri egokietan burutzeko. Zentzu horretan, makinaren egonkortasun termikoa ziurtatzea ezinbestekoa da, 40 μm -ko diferentzia dimentsionalak ager baitaitezke piezan, artezketa prozesua makinaren berotze zikloan burutuz gero, adibidez.

Proba esperimentaletan, SiC motako artezarria erabili zen, eta 1-10 μm tarteko diamantatze sakonerak egin ziren (akaberako artezketa egiteko balioak). Lortutako emaitzen arabera, sakonera txikiekin (1-2 μm) diamantagailuan lortutako higadura handiagoa da sakonera balio handiekin (10 μm) erdietsitakoa baino. Horren arrazoia da balio handiekin SiC aleen hausturak gertatzen direla, eta txikiekin, berriz, marruskadura indarrak handiagoak direla; marruskadurok, besteak beste tenperatura altuen eraginez, diamantagailuaren higadura handitzen dute.

Lauza-erako diamantagailuekin eginiko artezketen analisiarekin jarraituta, eta diamantatzeko indar tangentialari dagokionez, diamantatze sakonera eta aitzinamendu abiadura handiekin lortutako indar tangentialak handiagoak dira balio txikiekin eskuratutakoekin alderatuta (Shih et al., 2001). Bestalde, diamantagailua zenbat eta kamutsago egon (higadura lauko azalera), hau da, U_d gainezarpen handiko lan baldintzetan egin, artezketa indarrak orduan eta handiagoak izango dira, eta gainazal zimurtasuna txikiagoa.

Atal honi bukaera emateko, diamantagailuen azterketa termikoarekin loturarik eduki ez arren, diamantagailuaren higadura azkarra minimizatzeko garatutako diamantatze prozesu bat aipatuko da: Zhang eta Shin-ek (2003) esperimentuak egin zituzten artezarriaren gainazala CO₂ laser bidez berotzeko, diamantagailuaren eta harriaren arteko kontaktua gertatu baino lehen. Kasu zehatz horretan, zeramikazko aglutinatzailea eta boro nitruro kubikoa (CBN) ale urratzailezko artezarrien diamantatze prozesuan gertatzen den diamantagailuaren higadura azkarra ekiditeko soluzioa izan daiteke.

Proposaturiko teknika berri horren helburua da ale urratzaileen arteko zeramikazko loturak laser bitartez berotzea eta biguntzea, aleen berriztapena errazte aldera. Emaitzetan egiaztatu zen lortutako diamantatze higadura ratioa ohikoan baino handiagoa dela, hots, diamantagailuaren higadura tasa txikiagoa dela, eta ez duela haustura motako higadurarik jasaten. Prozesu horren errendimenduaren gakoa da diamantatze parametroen eta laserraren ezaugarrien (potentzia, batez ere) arteko oreka egokia aurkitzea.

2.4. DIAMANTATZE PROZESUAREN MONITORIZAZIOA

Diamantatze prozesuak, eta bereziki diamantagailuaren higadurak, artezketa prozesuan duen eragina ikusirik, ezinbestekoa da diamantagailuaren puntaren higadura neurria eta haren eboluzioa kontrolatzea (Martins et al., 2014). Artezarriaren gainazal topografia eta, ondorioz, piezaren gainazal zimurtasuna (diamantatze indarra, potentzia eta beste prozesuko parametro batzuekin batera) diamantagailuaren puntak jasandako higaduraren menpe daudenez, higadura maila ezagutzeak artezketa prozesuan lortuko diren emaitzak aurreikusteko balio beharko luke nagusiki. Higadura mailaren gaineko informazioa baliagarria gerta dakioke artezketa teknikariari ere, diamantagailu aldaketak aurreikusteko, diamantagailuen azpierzabilerak edo gainerabilerak ekiditeko eta diamantagailuaren larregiko higaduraren ondorioz sor daitezkeen makina geldiketa eta pieza errefusak saihesteko (Dimla, 2002).

Beste mekanizazio prozesu batzuetan gertatzen den bezala, artezketan ere erremintaren (diamantagailuarena) kontrola eta aldaketa makina teknikariaren eskarmentuaren esku uzten dira: azterketa bisualak eginez edo historikoki lortutako datuak erabiliz aldatzen du erreminta kasu gehienetan (Aguiar et al., 2004; Prateepasen et al., 2001; Wang et al., 2005;

Wehmeier eta Inasaki, 2002). Erremintaren higadura erabat kontrolatuta edukitzeko, ezinbestekoa da prozesuan integraturiko monitorizazio sistema autonomo eta adimendunak erabiltzea, prozesuko datuak jasotzeko eta tratatu eta erremintaren bizi-zikloaren edo lortuko den piezaren gainazal zimurtasunaren iragarpena egiteko, hain zuzen ere (Lee et al., 2006).

Erreminten higadura ezagutzeko, metodo asko daude, zein bere abantaila eta desabantailekin; Ambhore et al. (2015), Zhou et al. (2011), Martins et al. (2014) eta Dimlak (2002) metodo horien sailkapen eta azterketa egiteaz gain, diamantatze prozesuan diamantagailuaren higadura kontrolatzeko hainbat metodo proposatu zituzten (aurreragoko ataletan aztertuko dira).

Txirbil harroketa bidezko mekanizazio prozesuetan gertatzen den erremintaren higadura neurtzeko, bi metodo nagusi daude: zuzeneko eta zeharkakoa. Zuzeneko neurketa egiteko, prozesua eten egin behar da, eta metodo optikoak, ikusmen sistema aurreratuak edo gertutasuneko sentsoareak erabiliz erreminta azertu eta neurtu behar da. Makina gelditzeak eta teknikariak erremintaren azterketa egiteko behar duen denborak kostu garrantzitsuak sor ditzakete (Martins et al., 2014).

Zeharkako metodoa, aldiz, makina geratu gabe egin daiteke (online lan eginez), prozesuan izaera desberdinetako seinaleak jasoz, datu horiek prozesatuz eta lortutako emaitzak enpirikoki erlazionatuz erremintaren higaduraren eboluzioarekin (Byrne et al., 1995). Mekanizazio indarra eta potentzia (artezarriaren eragingailuaren korrante elektriko kontsumoa), bibrazioak, soinu igorpena (*Acoustic Emission - AE*) eta erremintaren tenperatura erabili izan dira gehienbat zeharkako metodo bezala erremintaren higaduraren egoera ezagutzeko. Arteketa prozesuari dagokionez, berriz, ikerketa bat baino gehiago garatu dira prozesuan langilearen partaidetzarik gabe era autonomoan erremintan gerta daitezkeen disfuntzioak monitorizatzeko, baina gehienek ez dute irteera industrialik izan, fidagarritasun eta malgutasun ezagatik (Byrne et al., 1995).

Prozesuan jasotako seinaleak oinarri erabakiak hartzeko, prozesuaren beraren atzean dauden modelo matematikoak ezagutu behar dira, sisteman gertatzen diren elkarrekintza fisikoen mende daudenak. Horrekin esan nahi da prozesua kontrolatuko duen doitasun handiko modelo bat sortzea benetan konplexua dela. Halako kasu askotan, neurona sare

artifizialak (ANN) erabiltzen dira; sareok, ikasketa eta entrenamendu saioak eginez, neurtu edo kontrolatu nahi den prozesuaren modelo bat sortzen dute, jasotako seinaleetan oinarrituta. Modelo horiek gai dira, metodo tradizionalak ez bezala, erremintaren higadura maila zehazteko, sarritan erremintaren higaduraren eta jasotako seinaleen arteko erlazio ez-lineala gertatu arren (Chen eta Jen, 2000).

Diamantatze prozesuari erreparatuta, zenbait ikerketa egin izan dira zeharkako seinaleen bidez diamantagailuaren higadura maila ezagutzeko, diamantatze zikloaren bukaera zehazteko edo zeharkako seinale horiek eta diamantatze parametroen arteko lotura aztertzeke, besteak-beste. Orokorrean erabilitako seinale motak aurrez aipatutako berak diren arren, kasu honetan soinu igorpen seinaleen erabilera azpimarratu behar da, seinale mota horiek eskaintzen dituzten abantailak direla eta.

Hurrengo atalean, lehenik, soinu igorpen teknikaren ezaugarriei buruzko sarrera dago, eta, bigarrenik, diamantatze prozesuari loturik soinu igorpen sentsoreen erabilera zehatza da hizpide, azken urteotan alor horretan eginiko ikerketen eta lanen berri emateaz batera.

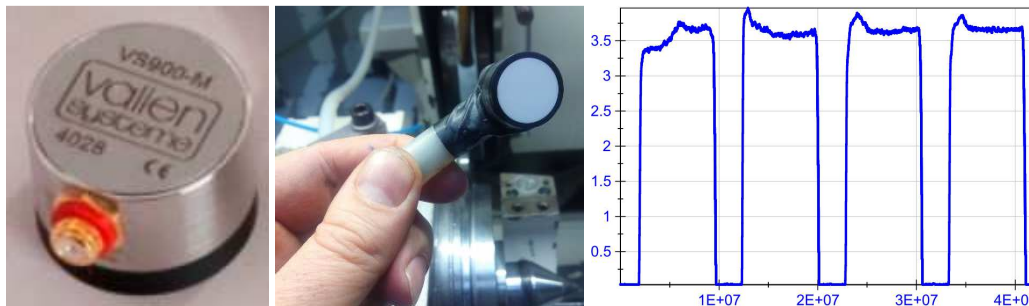
2.4.1. Soinu igorpen seinaleak

Soinu igorpen seinaleak honela defini daitezke: uhin iragankorrak, gorputz baten egituran gerta daitezkeen dislokazio mugimendu, transformazio fase, deformazio plastiko, marruskadura indar eta pitzadura edo zartatze mekanismoen ondorioz askatutako energiak sortuak (Byrne et al., 1995; Filho et al., 1999). Seinaleok sentsore bidez neurtzeko teknika ez denez suntsizailea, hainbat mekanizazio prozesutan (torneaketan, fresaketan eta artezketan bertan ere, neurri txikiago batean) erabili izan dira erremintaren hutsegitea iragartzeko (Emel eta Kanatey-Asibu, 1988).

Soinu igorpen motako seinaleak erabiltzearen abantaila nagusiak bat baino gehiago dira:

- I. Soinu igorpen seinaleen frekuentzia tartea (50-1.000 kHz) makinaren bibrazio eta kanpo-zaraten frekuentzia baino askoz ere gorago dago, beraz, zaratek ez dute interferentziarik sortzen (Zhou et al., 2011).

- II. Ohiko zelula kargekin alderatuta, ahalmena dute doitasun oso handiko prozesuetan lan egiteko, haien sentikortasun maila handiagatik; horrez gain, soinu igorpen seinaleak gai dira diamantatze sakonera txikiko prozesuetan sor daitezkeen energia aldaketa txikienak ere antzemateko.
- III. Oro har tamaina txikiko sentsoreak izaten direnez (ikus 2-26. irudia), ez dute toki asko behar instalatzeko. Gainera, indar sentsoreak baino merkeagoak dira.



2-26. irudia: Soinu-igorpen sentsorea (ezkerraldean) eta seinalea (eskuinean).

Soinu igorpen seinaleen desabantaila nagusia da sentikortasun maila handia dutela sentsorearen kokalekuaren aldaketarekiko; sentsorea jarri behar da diamantagailuaren euskarritik ahalik eta gertuen, seinalearen kalitatea ona izan dadin (Jemielniak, 2000; Wehmeier eta Inasaki, 2002; Zan et al., 2004). Bestalde, gomendatzen da ez egitea lan temperatura handiekin, hozgarri emari handiekin eta txirbil ugariko inguruneetan.

Soinu igorpen seinaleek aztertu nahi den prozesuari buruzko informazio oso zehatza eman dezakete, hainbat parametro estatistikoren bidez: ezagunena eta fabrikazio prozesuetan erabiliena batezbesteko koadratikoa da (*root mean square – RMS*), non ΔT integrazio denbora eta $v(t)$ momentuko seinalea den (2-9. ekuazioa).

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{\Delta T} \int_0^{\Delta T} v^2(t) dt}$$

2-9. ekuazioa

Ondorengo atalean, azalpen gehiago emango dira *RMS* eta beste parametro estatistiko batzuen definizioari eta erabilpenari buruz.

2.4.2. Diamantagailuaren higaduraren monitorizazioa

Oso esanguratsua da diamantagailuaren higadura maila neurtzeko edo haren bizitza bukatu ote den antzemateko ikerketa gehienak azken 3 urteotan garatu izan direla, batez ere Martins, Aguiar, Bianchi eta Moia ikerlariak osatutako lantaldearen eskutik, eta, horiez gain, ez dagoela bestelako erreferentzia askorik. Zentzu horretan, askoz ere lan gehiago egin dira artezarriaren higaduraren monitorizazioaren inguruan. Gauza bera gertatzen da artezketa prozesuan hozgarri edo lubrifikatzaile kantitate gutxiko tekniken ezarpenari dagokionez (ikus 2.5. atala): saiakera guztiak (gutxi izan arren) artezketan bertan egin izan dira, eta bakanen bat besterik ez diamantatze prozesuan.

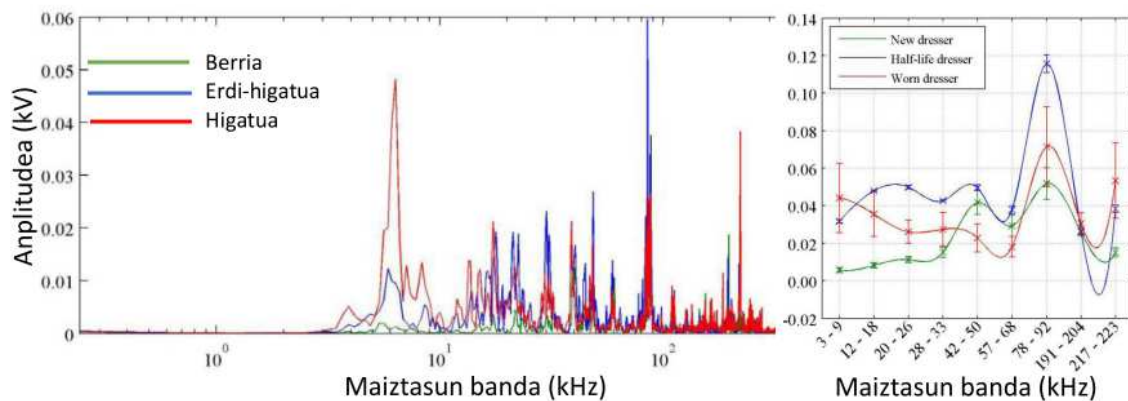
Diamantagailuaren higaduraren monitorizazio lanen berri ematen hasteko, Martins et al.-ek (2014) diamantagailuaren higadura maila ezagutzeko soinu igorpen sentsore eta neurona sare artifizialetan oinarrituta sorturiko ereduari buruzko xehetasunak emango dira. Prozesu horretan, diamantagailuaren euskarrian kokaturiko soinu igorpen sentsorea erabili zuten seinaleak jasotzeko. Seinaleok sistema informatiko baten bidez digitalki tratatuak izan ondoren, *RMS* eta *ROP* parametroak kalkulatu zituzten: *ROP*, potentziaren ratioa, soinu igorpen seinaleen beste tratamendu estatistiko bat da; jasotako seinalearen frekuentzia espektroa aztertzen du frekuentzia tarte jakin baterako.

Punta bakarreko *CVD* motako diamantagailua erabiliz, diamantatze zikloak burutu zituzten, diamantagailuaren bizitzaren azkeneraino. Bizitza ziklo horretarako, hiru egoera bereizi zituzten diamantagailuaren higadura mailaren arabera: berria, erdi higatua eta guztiz higatua. Higadura maila bakoitzerako soinu-igorpen seinaleen maiztasun edukia aztertuz (Fourierren transformatu bidez kalkulatuta) (ikus 2-27. irudia ezkerrekoa), nabaritu zuten *RMS* eta *ROP* parametroen anplitudeak maiztasun tarte jakin batzuetan aldaketa nabariak jasaten zituela higadura maila handitzearekin batera (ikus 2-27. irudiaren eskuinaldea).

Irudi horietan ikus daitekeen bezala, soinu igorpen seinaleen anplitude esanguratsuenak 250-300 kHz-ko maiztasunetik behera daude. Emaitza bertsua lortzen da artezarriaren topografiaren kalitatea ezagutzeko diamantatze prozesuko soinu igorpenak erabiltzen diren beste ikerketa batean ere (Wehmeier eta Inasaki, 2002); 100-300 kHz-ko maiztasun tartean gertatzen dira seinale anplitude guztiak. Ondorioz, esan daiteke diamantatze

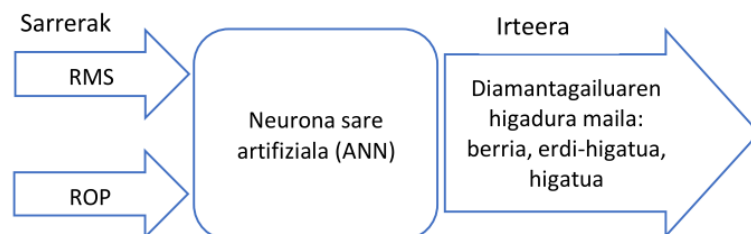
prozesuaren monitorizazioa burutzeko nahikoak direla 0-300 kHz maiztasun tartean lan egiten duten soinu-igorpen sentsoreak, maiztasun tarte handiagoetara jo behar izan gabe. Anplitude aldaketa nabarienak eragiten zituzten maiztasun tartek ondo identifikatu ondoren, egileek diamantatze prozesua hasi, eta diamantagailua hautsi arteko diamantatze ziklo guztietarako jasotako soinu igorpen seinaleen *RMS* eta *ROP* parametro estatistikoak aztertu zituzten, eta neurona sare artifiziala entrenatzeko erabili.

Bestalde, 20 diamantatze ziklo betetzen ziren bakoitzean, diamantagailuaren higadura maila aztertu, eta higadura azalera neurtzen zuten, *Leica Application Suite* eta CAD softwarearen bidez, hurrenez hurren.



2-27. irudia: Soinu-igorpen seinalearen maiztasun espektroa (goialdean) eta soinu-igorpen seinaleen *RMS* balioak maiztasun bandarekiko funtzio bezala (behealdean).

Azkenik, neurona sare artifizialaren eredu bat sortu zuten (ikus 2-28. irudia) sarrera bezala *RMS* eta *ROP* parametro estatistikoak eta irteera bezala diamantagailuaren higadura maila (berria, erdi higatua edo guztiz higatua) definituta.



2-28. irudia: Martins et al.-ek (2014) diamantagailuaren higadura kontrolatzeko proposaturiko neurona sare artifizialaren eredu.

Bateko, esan daiteke ikerketa honetan diamantagailuaren higadura maila zehazteko proposaturiko sailkapena ez dela oso zehatza, edo, beste era batean esanda, ez duela

higaduraren garapenari buruzko informaziorik ematen; baliagarria litzateke, momentu bakoitzean diamantagailuari geratzen zaion bizitzari buruzko aurreikuspena eskainiko balu. Besteko, eredu horrek ez du hartzen kontuan artezariaren gainazal topografia, ez eta piezaren gainazaleko zimurtasuna ere; hain zuzen ere, piezaren gainazal zimurtasuna da diamantatze prozesuaren etekina edo emaitza hoberen islatzen duen parametroa (Rowe et al., 1995). Eredu horrek soilik hartzen du aintzat diamantagailuak higadura egoera desberdinetan jasotako soinu igorpen seinaleen maiztasun edukiak erakusten duen joera aldakorra.

Lan horri jarraipena emateko eta hobetzeko asmoz, artezketa prozesuan diamantagailuaren higaduraren kalkulua egiteko beste eredu bat garatu zen, soinu igorpen, bibrazio seinale eta logika lausoko (*fuzzy logic*) eredu baten bitartez (Miranda et al., 2015). Kasu horretan, logika lausoko ereduaren sarrera bezala soinu igorpen eta bibrazio sentzore bidez jasotako seinaleen *RMS* eta *ROP* parametro estatistikoak jarri zituzten, eta irteera gisa, berriz, 0 eta 100 bitarteko eskala batean diamantagailuaren higadura maila erabili zuten. Gainerakoan, ez dago inolako aldaketa nabarmenik Martins et al.-ek (2014) proposatutakoari dagokionez.

Zan et al.-ek (2004) ere igorpen seinaleen *RMS* balioa erabili zuten, *Cpk* prozesuaren kapazitate indizearekin batera, diamantagailua higatuta dagoen unea detektatzeko. Hiru higadura maila desberdinetako diamantagailuak hartu (diamante berria eta zorrotza, erdi higatua eta higadura nabarmenekoa), eta, bakoitzarekin diamantatze prozesua burutu ondoren, pieza bat artezten zuten; ziklo hori 20 bider errepikatu zuten diamantagailu bakoitzarekin. Jarraian, pieza guztien diametroa neurtu eta definituriko tolerantzia tartean aurkitzen zela baieztatu ondoren, prozesuaren kapazitate indizea kalkulatu zuten diamantagailu bakoitzerako.

Hala, egiaztatu zuten diamantagailuaren higadura zenbat eta handiagoa izan, orduan eta *Cpk* indize txikiagoa lortzen zela eta, beraz, artezketa prozesuaren doitasun maila ere txikiagoa zela. Soinu igorpenen azterketarekin lortutako emaitzak, berriz, errepikakortasun maila txikia erakutsi zuen. Erdi higaturiko diamantagailuarekin lortutako seinaleen *RMS* maila handiagoa bazen ere, diamantagailu berriarekin lortutakoarekin alderatuta, erabat higaturiko diamantagailuarekin balio txikiagoak lortu zituzten. Aldaketa horien "errua"

egotzi zizkieten makina teknikariari, artezketa makinari berari, piezaren materialari, neurketari edota inguruneko beste faktore batzuei.

Kontuan hartuta proba horietan eskuraturiko emaitzak, ondoriorik garrantzitsuena da soinu igorpen seinaleen *RMS* balioaren joerari baino ez erreparatuta ezin daitekeela jakin diamantagailua benetan dagoen higituta ala ez; izan ere, arteztutako piezen *Cpk* indizea ere beharrezkoa zuten diamantagailuaren egoera zehazteko. Azkenik, esan beharra dago proba horiek behin bakarrik egin zirenez, haien balio estatistikoa zalantzarria izan daitekeela, batik bat tartean hainbeste aldagai dituen halako prozesu batean.

Bibliografian ez da topatu diamantagailuaren higidura soinu igorpen seinaleen bidez kontrolatzeko eredu gehiagorik. Seinaleok gehiago erabili izan dira, diamantatze potentziarekin batera, artezarriaren gainazal optimoa bermatzen duen gutxieneko diamantatze zikloa aurkitzeko; zenbait adibide ondorengo atalean azalduko dira.

2.4.3. Diamantatze zikloak zehazteko monitorizazio sistemak

Beharrezko diamantatze zikloak artezketako hondakin metalikoen eraginez harrian sortutako buxadura mailaren, aleen tamainaren eta ale urratzaileen higidura mailaren mende egon arren, baldintza normaletan 3 edo 4 diamantatze ziklo nahikoak izan beharko lirateke artezarriaren ebaketa ahalmena guztiz berriztatzeko (Xue et al., 2002). Dena dela, diamantagailuak berak izan ditzakeen dimentsio eta higidura akatsen eta beste faktore batzuen eraginez, benetako diamantatze ziklo kopurua aldakorra bihurtzen da, eta hori monitorizazio erremintak erabiliz zaindu beharra dago.

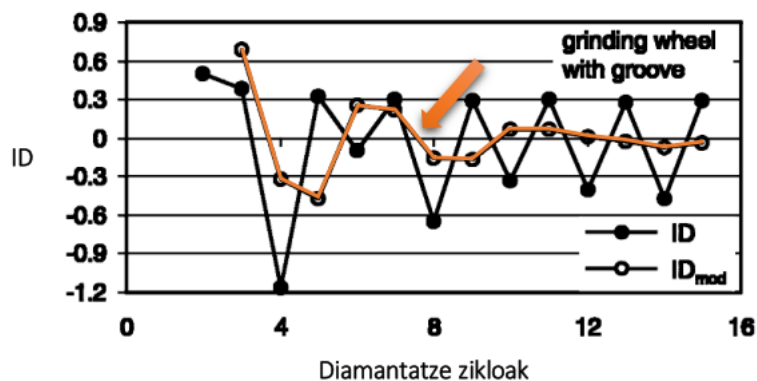
Diamantatze ziklo kopuru zehatza burutzea oso garrantzitsua da, baina baita artezarria diamantatzeko momentu egokia aurkitzea ere, artezarria ez dadin alferrik higa; harriaren higiduraren % 10 baino ez da gertatzen artezketa prozesuaren ondorioz, beste % 90a diamantatze prozesuagatik izaten da (Jackson et al., 2007).

Kronologikoki ordenatuta, esan daiteke bide horretatik eginiko lehen lana Wehmeier eta Inasaki-rena (2002) dela: lan baldintza zehatz batzuetarako kaltetutako artezarri bat diamantatu zuten diamantagailu birakari batekin, eta soinu igorpen seinaleak jaso zituzten haien bilakaera aztertzeke. Soinu igorpen seinaletik abiatuta, diamantatze ziklo

bakoitzero normalizatutako integral diferentzia (*Integral difference - ID*) parametroa definitu zuten (2-10. ekuazioa). Parametro horrekin, jarraian burututako bi diamantatze zikloren arteko soinu-igorpen seinalearen anplitude aldaketa neurtzen zuten, eta, aldaketaren balioa mugarri bat baino txikiagoa zenean, diamantatze prozesua gauzatzat jotzen zuten.

$$ID = \frac{\int_{T_{0,x}}^{T_{1,x}} AE_x(t)dt - \int_{T_{0,x-1}}^{T_{1,x-1}} AE_{x-1}(t)dt}{\int_{T_{0,x}}^{T_{1,x}} AE_x(t)dt} \quad \text{2-10. ekuazioa}$$

Probetan erabili zituzten diamantatze lan baldintza zehatzei begira, ondorioztatu zuten *ID* balioa $\pm 0,1$ V balio tartean egonkortzen zela artezarria behar bezala zorrotzuta zegoenean, eta, beraz, balio hori bera erabil zitekeela atariko balio gisa. Horrez gainera, ohartu ziren ezkerretara edo eskuinetara burututako diamantatze zikloek igorpen soinu anplitude desberdina zutela eta, ondorioz, beti diamantatu behar zela alde berera monitorizazio metodologia hau erabiltzeko.



2-29. irudia: Normalizatutako Integral Diferentziaren eboluzioa diamantatze zikloen arabera (kolore horiz beti alde berera diamantatuz lortutako kurba) (Wehmeier eta Inasaki, 2002).

Beranduago, Aguiar et al.-ek (2009) soinu igorpen seinaleak eta diamantatze prozesuaren potentzia kontsumoa erabili zituzten aurrekoaren helburu bera lortzeko. Proiektuaren fase esperimentalean, lehenik eta behin, artezketa prozesu bat burutzen zen, hozgarririk gabe, ale urratzaileak erabat higituta eta kamustuta, piezaren gainazalean erredurak sortu eta artezarriaren gainazaleko aleen eta loturen arteko hutsuneak txirbidez bete arte. Jarraian, $5 \mu\text{m}$ -ko 21 diamantatze iraganaldi burutzen ziren ($105 \mu\text{m}$, guztira) soinu igorpen eta harriaren buruaren potentzia elektrikoa neurtzeko.

Ekuazio matematiko batzuk sortu zituzten soinu igorpen eta potentzia balioak uztartuz: proba esperimentaletan burututako 21 diamantatze ziklo bakoitzerako kalkulatu, eta haien eboluzio grafikoa irudikatu zuten. Ekuazio horietako bi, *DPO* eta *DPKS* (Dotto et al., 2006) parametroak, diamantaketa ziklo kopuru optimoa aurkitzeko oso eraginkorrak zirela frogatu zuten. Jarraian, parametro horien deskribapen laburra dago.

- ***DPO*** parametroa: frogatu zen parametro hau oso erabilgarria zela aurretik artezketa prozesuan gertatzen den piezaren gainazal erredura detektatzeko (Aguiar et al., 2002; Aguiar eta Bianchi, 2012); piezaren gainazala erredura puntura heltzear zegoenean, soinu igorpena eta artezketa potentzia balio maximoetara iristen ziren, materialaren momentuko propietate mekanikoak murriztu egiten zirelako (ondorio hori oso nabaria zen igorpen soinuaren seinalean, baina ez hainbeste potentzia seinalean). Beraz, erabaki zuten bi balio horiek konbinatzea eta *DPO* parametroa definitzea (ikus 2-11 ekuazioa), hots soinu igorpen seinalearen *RMS* balioaren desbideraketa tipikoaren eta diamantatze potentziaren gehieneko balioaren biderketa. Emaitza onak lortu zituzten piezaren erredura puntua ezagutzeko. Aguiar et al.-ek (2009) parametro bera erabili zuten diamantatze prozesua bukatutzat jotzeko.

$$DPO = \sigma(AE_{RMS}) \cdot pot_{max}$$

2-11. ekuazioa

Lortutako emaitzek erakutsi zuten diamantatze prozesua bukatutzat eman daitekeen unean *DPO* parametroak, kasu honetan ere, gehieneko balioa erakutsi, eta jarraian egonkortasun maila batera heltzen zela (2-30 irudia). Proba guztietan (guztira 4), diamantatze ziklo kopuru desberdina lortzen da *DPO* parametroak gehieneko balioa erdiesten duenean; hori haserako artezarriaren egoera desberdinari egozten zaio.

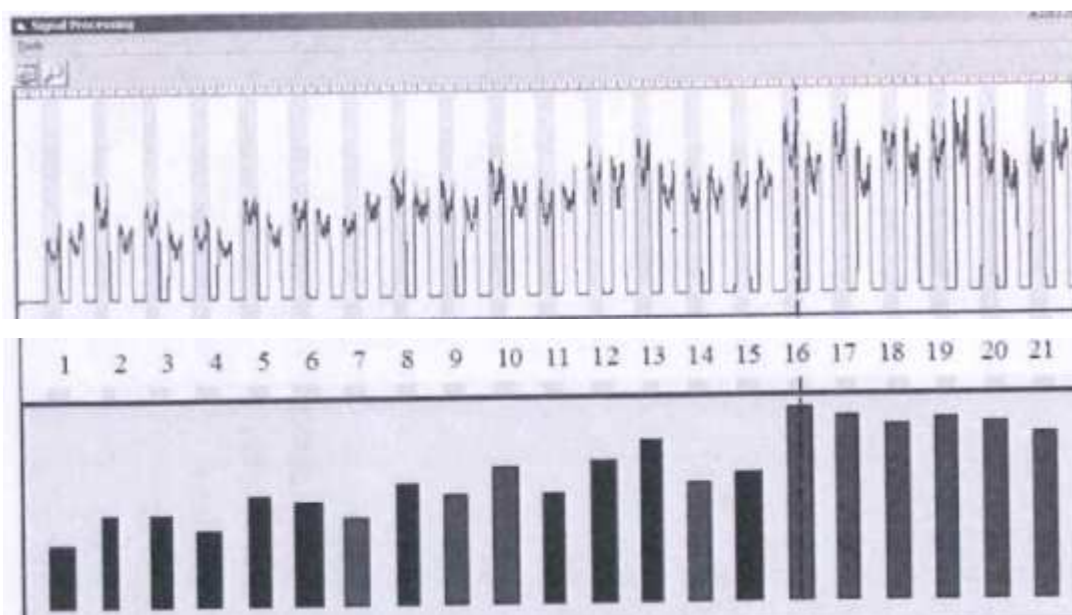
Ikerketa honek erakusten duen hutsune nagusia da diamantatze prozesuaren kasuan ez zaiola *DPO* parametroaren joerari zentzu fisiko bat ematen esplikatzeko zergatik lortzen den maximo bat (soinu-igorpen eta potentziaren maximoak) artezarria ondo diamantatuta edo zorrotzuta dagoen unean.

- ***DPKS*** parametroa: *DPO*-rekin alderatuta, prozesuarekiko sentikortasun handiagoa aurkitu nahian, ziklo bakoitzeko potentzia neurri bat baino gehiago (*m* puntu) hartzen ditu kontutan (2-12. ekuazioa).

$$DPKS = \left(\sum_{i=1}^{i=m} (pot(i) - \sigma(pot))^4 \right) \cdot \sigma(AE_{RMS}) \quad \text{2-12. ekuazioa}$$

Kasu honetan ere, *DPKS* parametroak gehienekoa lortzen du diamantatze prozesua teorikoki ongi burututa dagoenean, baina, jarraian, nahiko joera aleatorioa hartzen du.

DPO eta *DPKS* parametroen gehieneko balioak dira 21 diamantatze ziklok osatzen duten grafikoa ikusi ondoren zehaztutakoak (ikusi 2-30 irudia), azken ziklora heldu arte ez baitakigu zein ziklotan lortu den gehieneko *DPO* balioa. Bestalde, ikerketa hau lau aldiz eginiko probetan dago oinarrituta eta lortutako emaitza, hots, gehieneko *DPO* edo *DPKS* balioetara iristeko beharrezko diamantatze ziklo kopurua, desberdina da batetik bestera. Hori gerta daiteke, egileek dioten bezala, kasu bakoitzean artezariaren haserako higadura maila desberdina delako. Horrek guztiak kolokan jar dezake metodoaren errepikakortasuna.



2-30. irudia: *DPO* (goian) eta *DPKS* (behean) parametro estatistikoaren garapena 21 diamantatze ziklotan (Aguiar et al., 2009).

Beste aurrerapauso bat eginda, ikerketa bertsua garatu zuten Moia et al.-ek (2014) (Aguiar bera ere ikerketa taldean zelarrik): diamantatze zikloetan jasotako soinu igorpen seinale gordinetik ateratako *RMS* eta beste 2 parametro estatistiko (frekuentzia domeinuan kalkulatuak) batez besteko balio desbideraketa *-MDV-* eta soinu igorpen seinalearen

energia -*MARSE*) erabili zituzten neurona sare zehatz batekin konbinatuz artezarriaren gainazalaren egoera (zorrotza edo kamutsa) zehazteko.

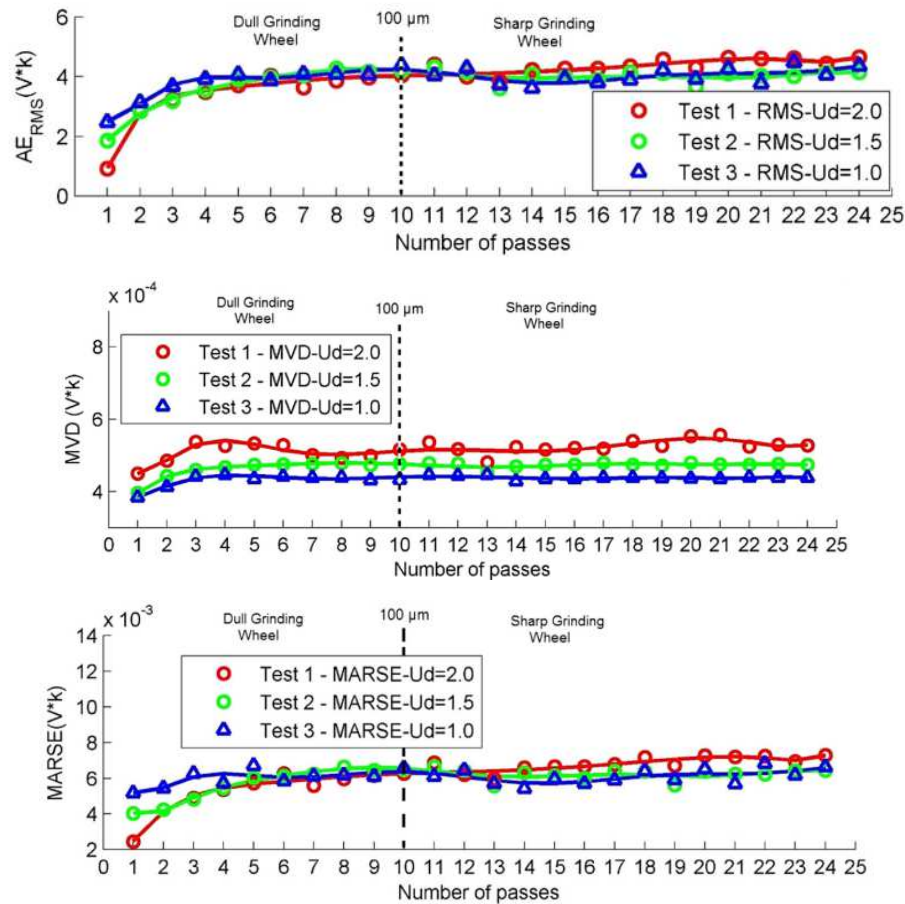
Fase esperimentalean, aluminazko artezarria eta punta bakarreko diamantagailu estatikoa erabiliz, lehenik eta behin artezarria higatu arteko artezketa prozesua burutzen zen hozgarria erabili gabe, eta, jarraian, diamantatze zikloak (% 4-ko kontzentrazio emultsioarekin) guztirako diamantatze sakonera 240 μm -koa izan arte ($a_d=10-20 \mu\text{m}$ eta $U_d=1-1,5-2$ balioentzat). Soinu igorpen seinaleak jasotzearekin batera, diamantatze prozesuko hiru une zehatzetarako (hasieran, erdialdean eta bukaeran) soinu igorpen seinaleen frekuentzia aztertzen zen, eta artezarriaren gainazaleko aleen zorrotzasun maila ere neurtzen zen, Coelho-k (1991) proposaturiko arteztutako diskoaren metodoa erabiliz. Frekuentziaren azterketan ikusten da seinalearen anplitude guztiak 0-250 KHz frekuentzia tartean daudela (2.4.2. atalean aztertutako ikerketetan lortutako frekuentzia tarte bera), eta diamantatze iraganaldiak gehitu ahala anplitudea ere handitu egiten dela.

Nahiz eta emaitza horiek Aguiar et al.-ek (2009) lortutakoen oso antzekoak izan, esan daiteke kasu honetan errepikakortasun handiagoa lortzen dela (ikus 2-31. irudia); proba guztietan (guztira 6), 100 μm -ko diamantatze sakonera finkatzen dute diamantatze zikloa bukatzeko beharrezko sakonera atari gisa, adierazita *RMS*, *MDV* zein *MARSE* egonkortasun maila batera iristen direla puntu horretan, hasieran balio txikiagoak erakusten baitituzte bukaeran baino. Irudiei begiratuta, kasu batzuetan mugarrira diamantatze ziklo batzuk lehenago ere jar zitekeen, seinaleak jada egonkortuta agertzen baitira.

Harriaren gainazala erabat zorrotzuta dagoenean izaten du uniformetasun maila handia. Hala, marruskadura indarrak handiagoak izaten dira, eta, ondorioz, diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talka kopurua ere handiagoa izaten da; horrek esplikatzen du *RMS* balioaren bilakaera balio txikietatik handiagoetara. Bestalde, artezarriaren gainazaleko hondakin metalikoek soinu-igorpen seinaleen nolabaiteko moteltze funtzioa betetzen dutela eta, beste arrazoi bat izan daiteke *RMS*, *MVD* eta *MARSE* seinaleen bilakaera azaltzeko.

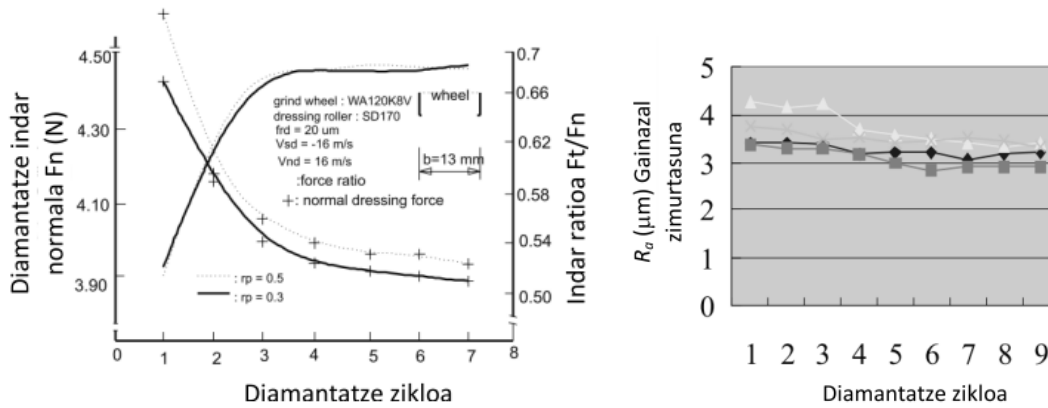
Laburbilduta, esan daiteke diamantatze prozesuan jasotako soinu igorpen eta potentzia seinaleak oinarri sortutako *RMS*, *MARSE*, *MVD*, *DPO* eta *DPKS* parametro estatistikoak baliagarriak direla diamantatze prozesua kontrolatzeko eta artezarriaren gainazaleko ale

urratzaileen zorroztasuna neurtzeko, kontuan hartuta kasu bakoitzean aurreko lerroetan aipatutako iruzkin edo oharrak.



2-31. irudia: Diamantatze prozesuan jasotako soinu-igorpenen *RMS*, *MVD* eta *MARSE* parametro estatistikoaren bilakaera (Moia et al., 2014).

Atal honi bukaera emateko, esan beharra dago helburu bera lortzeko diamantatze indarren bilakaeraren azterketa egin duenik ere badagoela (Young eta Chen, 2005); haren iritziz, diamantatze indar normala da parametrarik garrantzitsuena diamantatze ziklo optimoa kalkulatzeko. Lortutako emaitzen arabera, higitutako artezarriaren lehen diamantatze zikloetan, indar normalaren balioak behera egiten du, eta laugarren ziklotik aurrera balio egonkorrera iritsi, eta mantendu egiten da (2-32. irudiko ezkerrekoa); horrek esan nahi du diamantatze prozesua bukatutzat eman daitekeela eta artezarriaren gainazaleko aleek badutela berriro ebaketa ahalmena.



2-32. irudia: Gehieneko diamantatze zikloa zehazteko diamantatze indarren bilakaera (ezkerraldean) eta piezaren gainazal zimurtasunaren bilakaera (eskuinaldean) diamantatze zikloen menpe (Young eta Chen, 2005).

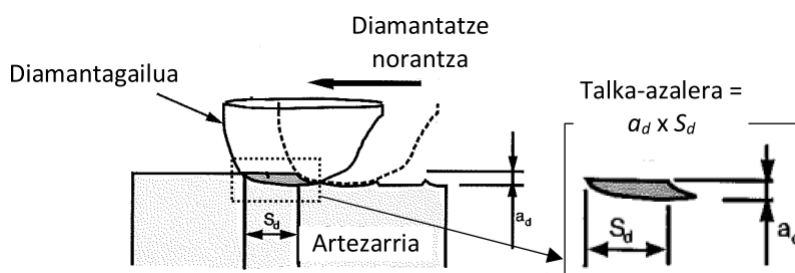
Gainera, lehen diamantatze ziklo horietan, piezaren gainazal zimurtasuna ere jaitsiz joaten da (2-32. irudiko eskuinaldea). Diamantatzeko indar tangentialaren eta normalaren arteko ratioa aztertuz gero, haren joera alderantzizkoa da, hau da, lehen zikloetan gora egiten du, baina laugarren zikloa eta gero egonkor mantentzen da. Beraz, diamantatze indarra adierazle ona da diamantatze prozesua bukatutzat jotzeko. Emaiza horiek proba esperimentalak egiteko erabilitako diamantatze parametroek baldintzatuta daude.

2.4.4. Beste sentsoire batzuen erabilera diamantatze prozesuetan

Atal honetan, diamantagailuaren higadura eta diamantatze ziklo optimoa aurkitzeko helburuetatik aparte eginiko beste ikerketa batzuen berri ematen da: diamantatze eta artezketa prozesuak monitorizatzeko, igorpen-soinu eta beste sentsoire batzuen erabilpena aztertzen dute.

Oro har, bibrazio sentsoreak edo azelerometroek ere izan dute erabilgarritasuna artezketa prozesuen monitorizazioan. Hassui et al.-ek (1998) adibidez, bibrazio sentsorea erabili zuren artezarriaren eta piezaren arteko kontaktua detektatuz piezaren gainazaleko zimurtasun aldaketak hautemateko eta diamantatu beharreko unea erabakitzeke. Proba esperimentalekin ondorioztatu zuten, batetik, bibrazio seinalearen, piezaren gainazalaren eta artezarriaren gainazal topografiaren arteko korrelazioa oso ona zela, eta, bestetik, sentsoreon sentikortasun maila soinu igorpen sentsoeenaren parekoa zela.

Ildo beretik, Filho et al.-ek (1999) aztertu zuten, igorpen seinaleen bitartez eta punta bakarreko diamantagailu estatikoa erabiliz, batetik, U_d eta a_d diamantatze parametroak, eta, bestetik, diamantagailuaren eta artezarriaren arteko talka kontaktu azalera artezarian lortutako gainazal topografiarekin zuten erlazioa (Ikus 2-33. irudia). Ondorengo prozedura esperimentalak burutu zuten: lehenik eta behin, artezarria higatzen zuten zenbait artezketa ziklo burutuz, nahikoa ale urratzailek ebaketa ahalmena galtzen zuten arte; ondoren, diamantatze prozesua burutzen zuten, hiru gainezarpen ratio balio eta lau diamantatze sakonera balio erabiliz eta igorpen-soinua erregistratuz sentsore baten bitartez, saiakera bakoitzean diamantagailu berri bat erabilia; azkenik, artezarriaren gainazaleko aleen zorrotasuna neurtzen zuten metodologia zehatz bat erabiliz (Coelho, 1991).



2-33. irudia: Diamantagailuaren eta artezarriaren arteko talka azalera (Filho et al., 1999).

Lehenik eta behin, 2.2.4.2. atalean azaldutakoarekin bat datorren emaitza lortu zuten: artezarriaren zorrotasuna handiagoa da diamantatze sakonera balio handietarako eta gainezarpen balio txikietarako (luzetarako aitzinamendu handiak). Bestalde, soinu igorpen maila handiagoa lortzen da diamantatze sakonera handitu ahala; zenbat eta diamantatze sakonera handiagoa, orduan eta diamantagailuaren eta artezarriaren arteko kontaktu azalera handiagoa eta talka bortitzagoak, prozesuan askatutako energia handituta. Beraz, eta laburbilduz, esan daiteke bai artezarriaren zorrotasuna, baita igorpen soinu maila ere, zuzenean proportzionalak direla diamantagailuaren eta artezarriaren arteko talka azalerekin neurriarekiko.

Mochida et al.-ek (2009) lana ere ildo horretatik zioan. Neurri txikiko zeramikazko CBN artezarria indar txikiekin diamantatzeko baldintza optimoak aurkitzea zuen helburu, zehaztasun handiko artezketa prozesua burutzeko. Proba esperimentalak egiteko, punta bakarreko diamantagailu zorrotz bat ($a_d=5 \mu\text{m}$ eta $b_d=90 \mu\text{m}$) eta higatutako beste bat ($a_d=5$

μm eta $b_d=90\ \mu\text{m}$) erabili zituzten, α_d eta U_d parametroen balio tartean. Diamantatze indarrak neurtzeko, KISTLER markako norabide bakarreko dinamometro bat erabili zuten, eta diamantagailuaren eta artezarriaren arteko kontaktua detektatzeko, berriz, azelerazio sentsore bat. Azkenik, artezketa prozesuaren errendimendua neurtzeko, artezketako indar normala eta piezaren gainazal zimurtasuna neurtu zituzten. Lortutako emaitzen artean nabarmen daiteke α_d eta U_d balio handiekin lortutako diamantatze indarrak handiagoak direla balio txikiekin lortutakoak baino. Emaitza hori bat dator aurretik aipaturiko Filho et al.-en (1999) lanaren ondorioekin; zenbat eta diamantatze sakonera handiagoa, orduan eta kontaktu edo talka azalera handiagoa diamantagailuaren eta artezarriaren artean, eta, ondorioz, indar handiagoa beharko da ale urratzaile kopuru handiagoa zorrozteko.

Azkenik, sentsoreekin loturarik izan ez arren, diamantagailuaren puntaren higadura neurtzeko zuzeneko metodo baten berri emango da. 2.2.4. atalaren hasieran adierazi bezala, artezarriaren gainazaleko topografian eragina duen diamantatze parametro garrantzitsuenetako bat diamantagailuaren puntaren geometria da. Oro har, diamantagailuaren puntaren higadura zuzeneko neurketa metodoen bidez egin behar da, aparailu optikoekin, eta, horretarako, prozesua gelditu eta erreminta makinatik atera beharra dago. Habrat et al.-ek (2005) metodologia bat garatu zuten diamantagailuaren puntaren erradioa makinan bertan denbora errealean kalkulatzeko: makinan jarritako kamera analogiko batek jasotako irudia 200 aldiz handitzeko lente optiko batekin, ordenagailu bat irudiaren prozesaketa egiteko eta irudian bertan puntako erradioa kalkulatzeko beraiek garatutako programa batez osatuta zegoen sistema.

Proposaturiko sistema horren arazo nagusia da diamantagailuaren higadura gauzatzen dela kontaktu puntuan azalera laua sortuta eta erradioa kasik lehen talken ondorioz desagertzen dela. Dena dela, zuzeneko neurketa horrek ahalbidetzen du diamantagailuaren puntaren higaduraren garapena denbora errealean ezagutzea eta, informazio hori potentziarekin, soinu igorpen seinaleekin edo beste zeharkako balio batekin erlazionatuta, diamantagailua higatu deneko unea zehaztea sistema autonomo baten bidez.

2.5. SISTEMA HOZGARRIAK ARTEZKETA ETA DIAMANTATZE PROZESUETAN

Artezarrien diamantatze prozesuan diamantagailuan gertatzen diren higadura mekanismoak aztertzeko eginiko ikerketa gehienak (ikus 2.2.4.1. atala) hozgarririk gabe egin izan dira, diamantearen higadura bizkortzeko helburuarekin. Horietan lortutako emaitzen ondorio garrantzitsuenetakoa da derrigorrezkoa dela diamantagailu prozesua hozgarri fluxu batez laguntzea: alde batetik, artezarriko ale urratzaile eta lotura materialak prozesutik kanporatzeko, eta, bestetik, tenperaturak ez daitezen igo maila jakin batetik gora; izan ere, aurrerago esan den bezala, 973 K-etik gora diamanteak egonkortasun termikoa galtzen duenez, diamantea hondatzeko arrisku oso handia dago (Wegener et al., 2011).

Diamantagailuaren higadura tasa txikiagoak lortzeko xedez hozgarririk gabe eginiko diamantatze saiakerarik ez da ezagutzen, 1988. urtean eginiko ikerketa bat salbu (Sagarda et al., 1988). Diamantatze sakonera txikiko kasuetarako (5-20 μm) eta gogortasun maila desberdineko bi artezarri erabiliz (bata erdi mailako elektroaluminazko harria eta bestea gogortasun maila txikiagoko SiC harria), lubrifikatze moten (emultsioak, solido eta aerosol erako lubrifikatzaileak eta hozgarri osagairik gabe lehorrean eginiko diamantaketa) eragina aztertu zuten punta bakarreko eta ale urratzaile anitzeko diamantagailuen higaduran.

Kasu bakoitzerako, diamantagailuaren puntaren higadura eredu analitiko baten bidez kalkulatu, eta diamantatze indarrak neurtu zituzten. Proba esperimentalen ostean, ondorioztatu zuten harriaren gogortasun maila batetatik behera bakarrik (SiC harria kasu honetan) izan zitekeela gomendagarria hozgarririk gabe diamantatzea higadura maila txikiagoak lortzeko. Hozgarriak erabiliz sortzen diren ebaketa indarrak txikiagoak dira lehorrean lortutakoekin alderatuta, eta diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko marruskaduraren eraginez, diamantagailuaren higadura handiagoa da. Lehorrean diamantatuz gero, aldiz, ebaketa indarrak handiagoak dira, eta, artezarriko aleen arteko loturak ahulak badira, loturok errazago hautsiko dira eta harriaren higadura diamantagailuarena baino handiagoa izango da. Ikerketa honetan, ez dira aztertzen lan baldintza batekin eta bestearekin lortuko liratekeen piezaren gainazal zimurtasunak, batez ere hozgarririk gabeko diamantatze irtenbidearen baliagarritasuna ebaluatzeko.

Aitzitik, kapitulu honetan azaldu bezala, artezketa prozesuaren inguruan bai egin izan da ikerketa bat baino gehiago hozgarri edota lubrifikatzaile osagaien erabilpena mugatzeko edo kentzeko, aurrerago azalduko diren arrazoiengatik.

Artezketa prozesuak energia kontsumo handia eskatzen du arteztutako material bolumen unitate bakoitzeko. Ia energia hori guztia beroa bezala xahutzen da artezarriak eta piezak bat egiten duten eremuan, eta horrek ahalbidetzen du piezaren gainazalean tenperatura altuak lortzea, hainbat kalte eragitearekin batera (Malkin eta Guo, 2007): erredurak, metalurgia fase eraldaketak, gainazalaren tenplaketa (biguntze eta berriro ere gogortze zikloarekin), trakziozko hondar tentsio kaltegarrien sorrera, materia hausketak eta nekearekiko erresistentzia murrizketa, besteak beste (Snoeys et al., 1978). Horrez gainera, tenperatura aldaketak eragindako dilatazio termikoei eragin nabarmena izan dezakete azken produktuaren kalitatean (gainazal itxura eta neurri dimentsionalak) (Malkin eta Guo, 2008).

Hondar tentsioei dagokienez, ale urratzaileen eta piezaren arteko interakzio mekanikoen eraginez, piezaren erresistentzia mekanikorako onuragarriak diren konpresiozko hondar tentsioak sortzen dira piezaren gainazalean. Termikoki eragindako tentsioak eta gainazaletik piezaren barrualdera sortutako tenperatura gradientearen ondorioz gertatutako deformazioek, aldiz, trakziozko hondar tentsioak sortzen dituzte, oso eragin kaltegarriak dituztenak piezaren propietate mekanikoetan.

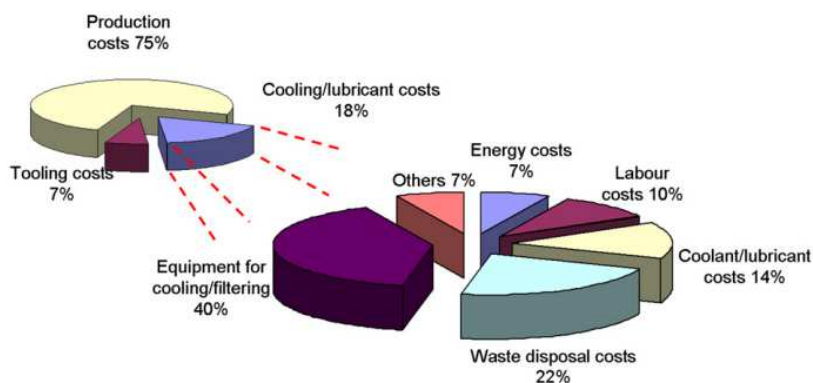
Oro har, piezak kalte termikoak jasaten dituenean, trakziozko tentsioak konpresiokoak baino handiagoak izaten dira (Santa-Aho et al., 2012). Hondar tentsio horiek neurtzeko edo aldaketarik gertatu den ikusi ahal izateko, badira teknika bereziak, eta horietako bat, proiektu honen atal esperimentalean erabilitakoa, *Barkhausen* deituriko igorpen magnetikoaren neurketa da. Materialen mikroegitura beratu suntsitu gabe aztertzeko oso erabilgarria den arren, industria arloan teknika horien erabilera oso mugatua da, neurri handi batean erantzun magnetikoaren, erantzun mekanikoaren eta mikroegituraren arteko erlazioa oso konplexua baita (Gurrutxaga et al., 2012).

Ohituragatik, hozgarri likidoak erabili izan dira artezketa prozesuetan piezaren gainazaleko tenperatura jaisteko eta sor daitezkeen kalte termikoak ekiditeko baliabide gisa. Horrez gainera, produktu horien lubrifikatzaile gaitasuna dela eta, artezketa prozesuaren

errendimendua areagotzeko balio dute (García et al., 2013; Irani et al., 2005). Halere, hozgarrien erabilerak ingurunearekin, pertsonen osasunarekin eta kostuarekin lotutako oztopo edo desabantaila oso garrantzitsuak ditu, eta, ondorioz, haien erabilpena gutxitzeko edo murrizteko eskaerak ugartzen ari dira hainbat estamentutan (politika, industria, ingurumen agentziak, etab.). Osasun kontuak aintzat hartuz gero, ebaketa fluidoak erabiltzeak (hozgarriak eta lubrifikatzaileak) lanbroz, kez eta beste partikula osasungaitz batzuek betetzen du lantegiko lan-ingurunea (Hadad et al., 2012).

Horrez gainera, jakina da artezketa prozesuan kontsumitzen den hozgarri likido kantitate guztia ez dela erabiltzen pieza, artezarri eta diamantagailu osagaien arteko kontaktuaren ondorioz sortutako beroa garraiatzeko; izan ere % 5-20 bitartean baino ez ditu bustitzen kontaktu eremu horiek (Morgan et al., 2008). Kostuari dagokionez, hozgarriaren erosketak, erabilerak eta kudeaketak mekanizazio prozesuaren guztirako kostuaren % 15 baino gehiago eragin dezakete; 2-34. irudian automobilgintzaren industriarako produkzioaren kostu banaketan ikus daitekeen bezala, hozgarri eta lubrifikatze osagaien kostua ebaketa erreminten kostua baino handiagoa da, eta kostuaren ehuneko handia hozgarriaren mantentzeak eta hondakinen kudeaketak osatzen dute (% 62). Gainera, hozgarriaren mantentze prozesuetarako beharrezkoak diren ponpak, deposituak, hozkailu sistemak eta bestelako osagai periferikoek artezketa makinak berak baino zoru azalera handiagoa betetzen dute.

Beraz, kontuan hartuta artezketa prozesuan hozgarri eta lubrifikatzaileen erabilpenak sortzen dituen kostuak, osasun kalteak eta zoru okupazioa, ezinbestekoa da beste aukera batzuk aztertzea, prozesuaren kalitatean eragin gabe, ingurunearekiko eta pertsonetikiko lan-baldintzak hobetzeko eta produkzio kostuak txikiagotzeko.



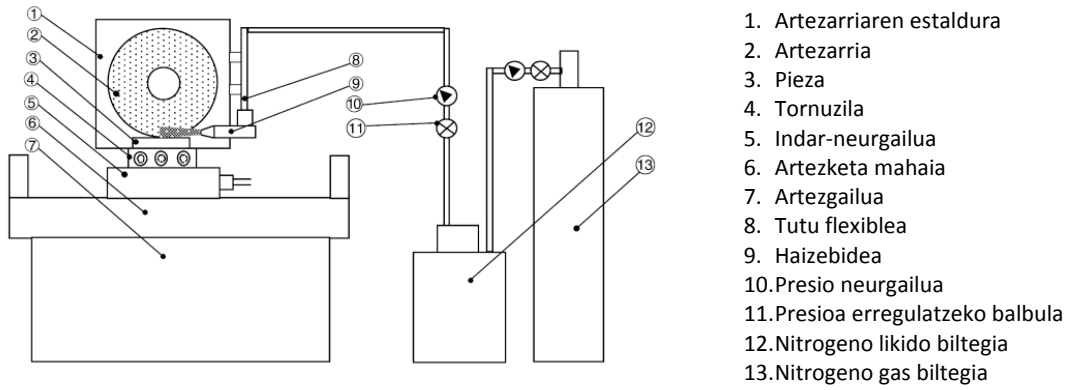
2-34. irudia: Automobilgintzaren industriako produkzio kostuen banaketa (Sanchez et al., 2010).

Jarraian, zentzu horretan eginiko ikerketa batzuen berri emango da, nahiz eta, lehen esan bezala, argitaratutako lan gehientsuenak, denak ez esatearren, artezketa prozesuarekin loturik egon. Halere, atal honen garapena oso garrantzitsua da, proiektuaren helburuarekin bat egiten baitu, hots: diamantatze prozesua hozgarririk gabe burutzea.

Ohiko mekanizazioa artezketa prozesuarekin alderatuta, pauso bat aurrerago dago, eta ohikoak dira, baita ikerketa eta industria arloetan ere, hozgarri eta lubrifikatzaile kantitate urriagoko teknologiak (*Minimum Quantity Lubrication - MQL*), lehorreko mekanizazioa eta *MQL* kriogenizatutako airearekin konbinatutako teknologia. Horien adibide ugari aurki daitezke literaturan, bai eta torneaketa, fresaketa eta zulaketa prozesuetarako ere (Fratila, 2009; Klocke eta Eisenblatter, 1997; Zhang et al., 2012). Baina artezketa prozesuan lortzen diren tenperaturak eta sortutako bero kantitatea askoz ere handiagoak dira, eta erabili beharreko teknologiek beste aurrerapauso bat eskatzen dute bero kantitate hori guztia artezarriaren eta piezaren kontaktu ingurunetik kanpora barreiatzeko, piezan kalte termikoak, deformazio geometrikoak eta harriaren higadura ekiditeko. Horrek azaltzen du, neurri handian, behintzat, industriaren arloan mugatuago egotea hozgarri eta lubrifikatzaile kantitate urriagoko teknologien erabilpena artezketa prozesuan.

Halere, ikerketa dezente egin dira ohiko hozgarri likidorik gabe edo kantitate txikiekin lan egiteko aukerak aztertzeko, batez ere laborategi mailan. Izan ere, artezketa prozesua lehorrean eginda, errazago neur daiteke zuzenean piezaren gainazaleko tenperatura, eta hobetu zaindu prozesuaren egoera termikoa. Zentzu horretan, lehorreko artezketaren ordez, artezarriaren eta piezaren arteko kontaktu eremua nitrogeno likidoz hozten duen artezketa kriogenikoa proposatu zuten Ben Fredj et al.-ek (2006) (ikus 2-35. irudia).

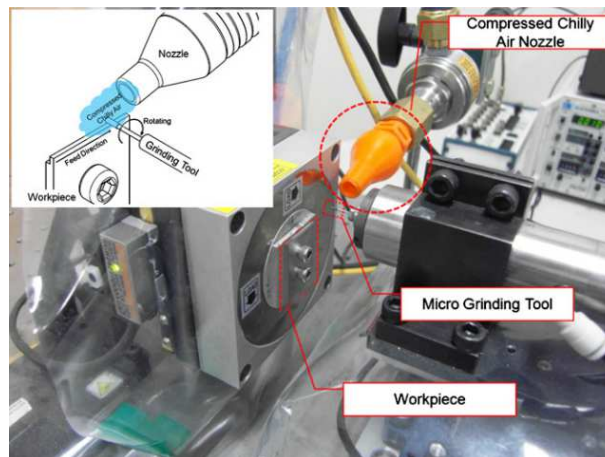
Teknologia horrekin lortutako emaitzak oso onak izan ziren, eta hobekuntza nabariak egiaztatu ziren sistema hozgarri tradizionalen erabilerarekin alderatuta: piezaren gainazaleko tenperatura nabarmen jaistea (473 K ohiko hozgarri sistemarekin konparatuta eta 673 K lehorrekoari dagokionez), piezaren gainazaleko zimurtasuna murriztea eta trakziozko hondar tentsio txikiagoak, besteak beste. Horrez gainera, 77 K-etara (-196 °C) likido eginiko nitrogeno gasa behin prozesutik iragan eta gero lurrundu egiten da, eta berriro ere atmosferara bueltatzen da inongo hondakinik utzi gabe (Pusavec et al., 2010a).



2-35. irudia: Nitrogeno likidoa hozgarri bezala erabiliz artezketa prozesuaren eskema

Ohiko mekanizazioaren ordezkari honelako mekanismo iraunkorra ezartzeak ahalegin zein hasierako kostu handia eskatzen baditu ere, artezketa prozesuaren errendimenduan eragiten dituen abantailez gain (aurrez aipatuak), hozgarri sistema tradizionalarekin alderatuta produkzio kostua % 30 baino gehiago murriztu daiteke (Pusavec et al., 2010b).

Nitrogeno likidoa baino irtenbide merkeagoa proposatu zuten Lee eta Lee-k (2011) mikroartezketa prozesu batetan *Vortex* tutu bat eta puntako haizebide baten bidez 253K-tan dagoen aire hotza igorriaz mekanizazio gainazalera (2-36. irudia).



2-36. irudia: Haize hotza (253 K) hozgarri bezala erabiliz mikroartezketa prozesuaren eskema

Kasu honetan, lortutako emaitzak ere oso onak dira: artezketa indarrak, ale urratzaileen higadura eta piezaren gainazaleko zimurtasuna nabarmen murriztu dira. Baina kasu honetan eginiko konparaketa ez da alderatu hozgarri likidoa erabiliz baldintza beretan lortuko liritekeen emaitzekin, giro tenperaturako airearekin (298 K) igorri lortutakoekin baizik. Beraz, ikerketa honetatik ondoriozta daiteke airea hozgarri sistema bezala erabiliz

gero, temperatura baxuetan lan egiteak abantailak dituela artezketa prozesuaren errendimenduan.

Aurreko bi kasuetan, haize hotza edo nitrogeno likidoa erabilia, lubrifikatzaile osagaia falta zela-eta konprimatutako aire hotza langar bidezko koipeztaketarekin konbinatuz, bestelako proposamen bat egin zuten Nguyen eta Zhang-ek (2003); ohartu ziren lubrifikatzailearekin oro har emaitza hobekak lortzen zirela (potentzia txikiagoak, gainazaleko zimurtasun hobekak eta higadura txikiagoak), batez ere sakonera handiagoko artezketa prozesuan. Halere, teknika horrek bazuen arazo bat: aire hotza ez zen behar bezala iristen kontaktu eremura, horren lurruntze tasa handiagatik, batetik, eta, bestetik, artezarria beraren biratze mugimenduak sortutako haize zurrunbiloaren eraginez. Ondorioz, bero xahutzea kontaktu eremuaren ingurunean baino ez zen gertatzen.

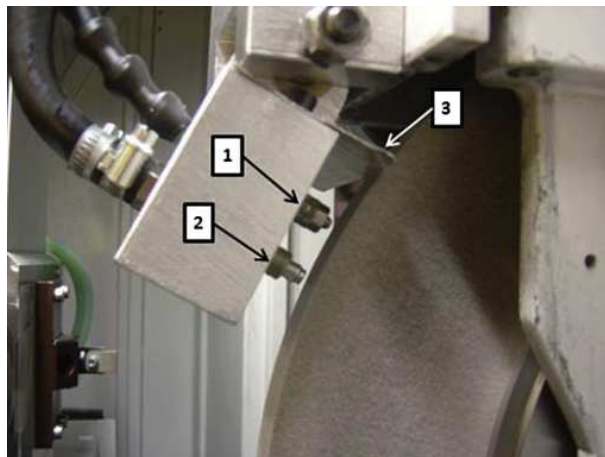
Gainontzeko ikerketa gehientsuenak saiatu dira mekanizazio konbentzionaletan ohikoagoa den *MQL* teknika artezketa prozesura egokitzen. Lehen saiakerak 90-eko hamarkadan egin baziren ere (Brinksmeier et al., 1997), azken urteotan nabarmen hasi da arlo horretan eginiko ikerketen kopurua. Kasu gehienetan, ohiko hozgarri sistemarekin konparatuta, hobekuntzak lortu dira, artezketa prozesuan olio kontsumoa eta prozesuaren kostua murriztea lortuta (Barczak et al., 2010; Tawakoli et al., 2009).

Ondorengo ikerketek aurrerapauso bat eman, eta saiakera egin dute garrantzitsu baino garrantzitsuagoa den lubrifikatzailea era batera edo bestera *MQL* teknikarekin konbinatzeko: ur eta olio nahasketa (Barczak et al., 2010; Tawakoli et al., 2009), mikrografito partikulak (Tsai eta Jian, 2012), molibdeno disulfuroa (MoS_2), karbonozko nanotutua (CNT) eta zenbait oxidozko nanopartikulak (Al_2O_3 , SiO_2 eta CuO) (Mao et al., 2012; Shen et al., 2008; D. Zhang et al., 2015; Y. Zhang et al., 2015a, 2015b), besteak beste. Nanopartikula horien higaduraren eta urraduraren aurreko erresistentzia eta zama astunak jasateko gaitasun handiari esker, artezketa prozesua lan baldintza askoz hobean gauza daiteke (artezketa indar eta higadura maila txikiagoak eta beroa kanporatzeko ahalmen handiagoa). Aukera horiek guztiak artezketa prozesuaren ikuspuntutik eraginkorrak diren arren, industrializatzeko konplexu samarrak dira, eta haien kostua ohiko hozgarri sistemarenaren antzekoa edo handiagoa.

Oztopo horiek gainditu nahian, hozgarri gutxiko artezketa deritzon teknika (*Minimum Coolant Grinding – MCG*) aurkeztu zuten lehendabizi Sanchez et al.-ek (2010), MQL teknologia erabiliz mikrotanta formatuan igorritako lubrifikatzailea tenperatura oso baxuko (-173 K / 223 K) CO₂ gas fluxuarekin batera (ikus 2-37. irudia). Gas fluxuaren tenperaturak lubrifikatzaile tantak izozteko bezain baxua behar zuen izan, artezarriaren gainean lubrifikatzaile geruza bat sortuta. Teknika horren bidez, bermatuta geratzen zen lubrifikatzailea artezketako kontaktu eremura iristea.

Prozesu horren kostua eta ingurunearen gaineko eragina kontsumitutako lubrifikatzaile eta CO₂ kantitatearen araberakoak izanik, aurrekoaren hobekuntza bat proposatu zen, izozte tenperatura altuagoko olio lubrifikatzaile familiekin probak eginez eta artezarriaren olioztatze puntu eta modu egokiak aztertuz, lubrifikatzaile eta CO₂ kontsumoa murriztea helburu (García et al., 2013).

Teknika honekin lortutako emaitzak ohiko hozgarri sistemarekin lortutakoak bezain onak dira, baina olio lubrifikatzaile kontsumo askoz ere txikiagoarekin. Horrez gainera, industrializatzeko erraza da, eta aztertutako benetako kasu baterako pieza bakoitzaren mekanizazio kostua % 10 merkeagoa.



2-37. irudia: MQL eta tenperatura baxuko CO₂ aire hotza artezarriaren gainazalean aplikatzeko sistema: 1) MQL haizebidea, 2) CO₂ haizebidea eta 3) errasketa artezarriak sortutako aire korronea gelditzeko

Doktoretza tesi honen helburua ez da artezketa prozesuko hozgarri eta lubrifikazio sistemak eta horien gaineko hobekuntzak aztertzea; halere, teknika horien egungo egoera ezagutu beharra dago, diamantatze prozesua artezketa prozesuren zati oso garrantzitsua baita, aurretik esan bezala. Hortaz, ez du inolako zentzurik artezketa ziklorako teknologia

horiek erabiltzeak, baldin eta diamantatze zikloan ohiko hozte sistemak erabiltzen badira: hozgarri eta lubrifikatzaileko tratamendu sistemek beharrezkoak izaten jarraituko lukete, eta ingurunerako zein pertsonentzako kalteek beren horretan iraungo lukete.

Atal honetan artezketaren baitan eginiko hozte sistemen azterketan, ez da erreferentzia bat bera ere aurkitu diamantatze zikloarekin erlazionaturiko ikasketarik; kasu batzuk badira, 2.3. atalean aztertuak, diamantatze prozesua lehorrean burutu dutenak diamantagailuaren higadura bizkortzeko helburuarekin, eta azkenean esaten da diamantatze prozesuan ezinbestekoa edo oso gomendagarria dela hozgarri sistemaren bat erabiltzea, artezketaren gainean egindakoaren moduko bestelako azterketarik egin gabe.

Horren guztiaren ondorioz, doktoretza tesi honetan lehen saiakera bat egiten da hozgarririk gabeko diamantatze prozesua definitzeko, 4.3. atalean azaltzen den bezala. Emaitzetan ikus daitekeenez, proposaturiko aire hotzaren proiektioarekin hozgarri sistema tradizionalarekin lortzen den beroaren ebakuazio oso antzekoa lortzen da neurtutako diamantagailuaren puntako desplazamendu termikoa erreferentziazat hartuta.

3. Kapituluia

Diamantagailuaren higadura eta monitorizazioa

3. DIAMANTAGAILUAREN HIGADURA ETA MONITORIZAZIOA

2. kapituluuan diamantagailuari buruz eginiko azterketa sakonaren ostean, esan behar da diamantagailuaren beraren higadura egoera kontrolatuta eduki beharreko aldagai oso garrantzitsua dela artezketa prozesua egoki burutzeko. Egin izan dira saiakera batzuk, ez asko, batez ere soinu igorpen eta potentzia seinaleak erabiliz, diamantagailua bere bizitza-zikloaren bukaerara iritsi den jakiteko eta diamantatze prozesua behar bezala burutu den zehazteko. Diamantatze proba esperimentaletan ikusi da diamantagailuen higadura maila oso desberdina izan daitekeela diamantagailu batetik bestera, eta horrek eragin ezberdina izan dezakeela artezketa prozesuan. Izan ere, artezketa prozesuko aldagai garrantzitsuenetako bat U_d gainezarpen ratioa da, diamantagailuaren puntaren geometriaren mende dagoena. Kapitulu honetan aztertuko da, lehenik eta behin, zer nolako eragina izan lezakeen erreferentzia bereko punta bakarreko diamantagailuaren muturreko geometriak artezketa prozesuan. Jarraian, diamantatze eta artezketarako lan baldintza zehatz batzuk definitzeaz batera, proba esperimentalak egin dira soinu igorpen eta potentzia seinaleak jasoz, batetik, eta arteztutako piezaren eta diamantagailuaren egoerari erreparatuz, bestetik. Helburua da datu horiekin guztiekin adierazle bat aurkitzea diamantagailuaren higadura mailaren berri eman dezan.

3.1. SARRERA

2.2.4. kapituluuan diamantatze prozesuko aldagaiak aztertu direnean, ondorioztatu da diamantatze eta artezketa prozesuetako lan baldintzek ez ezik, diamantagailuaren puntaren geometriak ere eragin handia duela artezketa prozesuaren errendimenduan eta emaitzetan. Horrez gainera, egiaztatu da diamantagailuaren higadurak ere baduela eragina artezketa prozesuan, eta eman da diamantagailua higatuta dagoen ala ez antzemateko egindako zenbait proba esperimentalen berri, non batez ere aztertu diren diamantatze eta artezketa prozesuetako potentzia eta soinu igorpen seinaleak (*AE – Acoustic Emission*) eta horien frekuentzia edukia (ikus 2.4.1. atala).

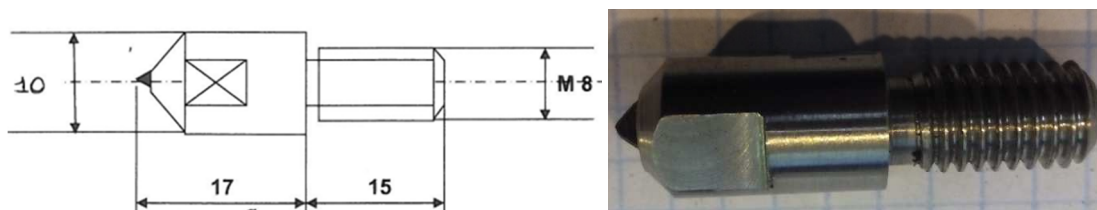
Halere, proba-esperimental horietan, ez da diamantagailuaren higaduraren eboluzio osoa aztertzen, ez eta diamantagailuaren higadurak, diamantatze prozesuko beste aldagai bat gehiago bezala, artezketa prozesuaren emaitzetan izan dezakeen eragina ere. Kapitulu

honetan, aurrena, punta bakarreko diamantagailu mota baten higaduraren eboluzioa aztertuko da, eta, ondoren, higadura horrek artezketa prozesuan izandako eragina azalduko da, bereziki erreparatuta piezaren propietateetan izandakoari.

Horretarako lehen pausoa izan da erabilitako diamantagailuen haserako azterketa orokorra egitea, ondokoak kalkulatuta: puntaren erradioaren balioa, gainazaleko pitzadura, gainazalaren akabera eta haserako diamantagailuaren eta harriaren arteko b_d kontaktu luzera. Lan horren xede nagusia izan da diamantagailu bakoitzaren haserako ezaugarriek artezketa prozesuan izan dezaketen eragina aurreikustea, erreferentziatzat hartuta diamantatze prozesuaren egungo egoeraren azterketari buruz bigarren kapituluan esandakoak.

3.2. DIAMANTAGAILUEN GEOMETRIAREN AZTERKETA

Aipatu proba esperimentaletan, COMEGUI enpresak merkaturatzen duen KAISER etxeko punta bakarreko eta diamante naturaleko diamantagailua erabili da artezarria zorrozteko; haren ezaugarri geometriko nagusiak 3-1. irudian ageri dira.



3-1. irudia: KAISER etxeko punta bakarreko diamantagailu estatikoa.

Lehen proba esperimental horietan, halako lau diamantagailu erabili dira, lan baldintza berdinetan (ikus 90 orrialdeko 3.3.2. atalean) diamantagailu bakoitzaren puntaren geometriaren eragina aztertzeko. Proben helburua izanik diamantagailua bere bizitzaren bukaerara eramatea, eta kontuan hartuta proba bakoitza burutzeko denbora asko behar izan dela, lau entsegu ziklo nahikotzat jo dira azterketa burutzeko; beraz, erabilgarri zeuden 10 diamantagailuetatik 4 aukeratu dira ausaz proba esperimentalak egiteko.

Diamantagailu horien puntako diamantearen zenbait ezaugarri neurtu eta deskribatu dira, ezaugarriok diamantagailuaren higaduraren eboluzioan eragina izango dutelako hipotesia eginda:

- I. **Diamantagailuaren puntaren r_d erradioa:** diamantagailuaren puntaren erradioaren balioak arteztutako piezaren gainazalaren zimurtasun balioan eragin beharko luke, horrek diamantagailuaren zorrotasun ratioan eragiten baitu. Zenbat eta erradio txikiagoa izan, orduan eta punta zorrotzagoa eta zimurtasun handiagoa utziko lituzke piezan, batetik, eta, bestetik, diamantatze potentziak txikiagoa izan beharko luke diamantagailuaren eta artezarriko ale urratzaileen arteko kontaktu azalera txikiagoagatik. Dena dela, diamantagailuaren hasierako zorrotasun ratioak hasierako diamantatze zikloetan baino ez du izango benetako eragina, higaduraren ondorioz gainazal laua sortuko baita diamantagailu guztietan, batzuetan besteetan baino azalera handiagoarekin.

- II. **Diamantagailuaren eta artezarriaren arteko b_d kontaktu luzera:** diamantatze prozesuko parametro edo aldagai garrantzitsuena U_d gainezarpen ratioa dela esan daiteke (Chen et al., 1996; Klocke et al., 2015) (2-3. ekuazioa), neurri handi batean artezarriaren gainazalean sortzen den topografia mota zehazten baitu. Diamantagailu bakoitzaren hasierako (estreinatu gabe dagoenean) puntaren geometriaren arabera, gainezarpen ratio bat definitu ahal da, α_d diamantatze sakonera balio bati dagokion b_d kontaktu luzera (ikusi 3-7., 3-8., 3-9. eta 3-10. irudiak) eta harriaren bira bakoitzeko diamantagailuaren luzetarako S_d aitzinamendu abiadura zehatz batzuetarako. Diamantagailuaren punta higatzearekin batera (2-18. irudia), b_d -ren balioa handituz joango da, eta horrekin batera U_d gainezarpen ratioarena ere bai; ondorioz, diamantatze baldintzak aldatu egingo dira. Gainera, b_d parametroaren eboluzioa oso lotuta dago diamantagailuaren geometria edo formarekin: batzuk oso piramidalak dira, beste batzuk biribilduak eta beste zenbait irregularrak.

- III. **Diamantagailuaren gainazal akabera:** artezarrien diamantagailu gisa kristal bakarreko diamanteak erabiltzen direnean, diamanteon gainazal akaberak asko alda daitezke batetik bestera. Diamantagailu batzuek gainazal akabera oso leuna izan dezakete, pitzadura edo irregulartasun oso gutxirekin (3-7. irudia); horien kasuan, aurreikusi daiteke bizitzaren bukaerara iritsi bitartean higadura oso konstantea edo erregularra izango dutela. Beste batzuk, aldiz, pitzaduraz josita egon daitezke, edozein momentutan hausturak gertatzeko arriskuan daudela (3-8. irudia).

Parametro horiek guztiak aintzat hartuta, probetan erabilitako lau diamanteen hainbat sailkapen egin dira parametro bakoitzak artezketa prozesuan izan dezakeen eraginaren arabera. Sailkapen horiek eta diamantatze eta artezketa prozesuei buruz 2. kapituluaren esandakoak kontuan hartuta, diamantagailu bakoitzaren errendimenduaren iragarpenak egingo dira jarraian; proba esperimentalen emaitzak aztertzen direnean ikusiko da iragarpenok zuzenak diren ala ez, bai eta emaitzen zergatia ere.

Hauek dira diamantagailu bakoitzerako neurtutako balio geometrikoak:

- I. Diamantagailuaren puntako hasierako r_d erradioa.
- II. 30 μm -ko a_d diamantatze sakonerari dagokion hasierako b_d kontaktu luzera (b_{d_0} balioa). Horixe izan da, hain zuzen, proba esperimentalak egiteko erabilitako a_d parametroaren balioa (ikus 3.3.2.1. atala).
- III. Higadura maila zehatz baterako (0,3 mm-ko sakonera) diamantagailuak lortuko lukeen b_d kontaktu luzera (b_{d_1} balioa). Aurrez, proba esperimentalen konfigurazioa zehazteko, diamantatze proba batzuk egin dira (beste diamantagailu batekin), eta erakutsi dute diamantagailuaren puntaren higadura luzera 0,25-0,35 mm-ra irits daitekeela; beraz, b_d -k 0,3 mm-ko luzerako higadura hipotetiko baterako izango lukeen balioa kalkulatu da. Horren helburua da b_d balioaren bidez U_d gainezarpen ratioak izan dezakeen eboluzioa irudikatzea.
- IV. Artezarriko ale urratzaileen diametroa. Nahiz eta parametro hori ez dagokion diamantagailuari, garrantzizkoa da ezagutzea diamantagailuaren eta artezarriaren arteko talkaren gaineko datuen bat edukitzeko. Diamantagailuaren geometriaren, diamantatze sakoneraren, ale urratzaileen tamainaren eta artezarriaren gogortasun mailaren arabera, aleen edo loturen hausturak gertatzeko probabilitatea bestelakoa izango da (Chen eta Rowe, 1996b; Rowe et al., 1995).
- V. Aldagai geometriko horiek guztiak neurtzeko, diamantagailuen goitiko irudiak atera dira LEICA Z6APO mikroskopia bidez (ikusi 3-2. irudia), eta jarraian NX9.0 CAD programa erabili da. Neurketetan eginiko akatsa +/- 0,05 mm-koa izan da gehienez.



3-2. irudia: Diamantagailuaren jarrera irudiak egiteko.

3.2.1. Diamantagailuen gainazal akabera

Proba esperimentaletan erabilitako diamantagailu guztiak forma oktaedrikoko diamantagailu naturalak dira, guztiak erreferentzia berekoak (*Diamante Monopunta 1,00 Crts*). Dena dela, diamantagailu bakoitza handipen handiko lupa batez aztertuz gero, erraz asko egiazta daiteke guztiak ez direla berdinak. Aurreko ataletan ikusi den bezala, diamantagailuaren puntaren geometria eta, ondorioz, diamantatze baldintzak (hasierakoak, diamantagailua oraindik higatu gabe dagoenean) desberdinak dira batetik bestera. Gainazal akaberari erreparaturaz gero, batzuek oso ona izaten dute, baina beste batzuek pitzadura ugari izaten dituzte gainazalean.

Hori guztia aintzat hartuta, hona hemen hipotesi bat: *“Diamantagailu guztien artean, gainazal akabera txarrenekoak izango du biziraupen txikiena, ale urratzaileekin izandako talken ondorioz errazago hautsiko baita pitzadurak ageri diren tokietatik”*. Baina zer da akabera txarra eta nola baloratu?

Jarraian, diamantagailuen kalitatearen sailkapen kualitatibo bat egiteko, hautatutako lau diamantagailuak indize batez balioztatu dira gainazaleko akabera kontutan hartzen dituzten hiru kriterio hauen erabiliz:

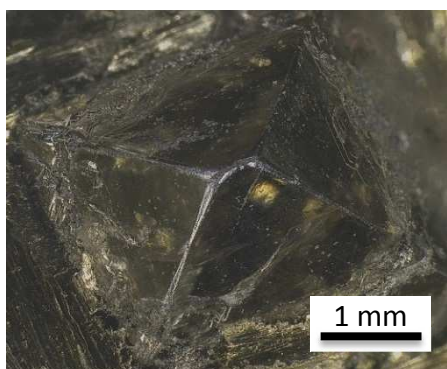
- I. Geometriaren uniformetasuna, forma piramidala perfektutzat jota.
- II. Gainazalean pitzadurarik dagoen: ez baldin badago, 1 eta baldin badago, 5.
- III. Gainazal akabera: pitzadurak gorabehera, gainazalaren akabera erabat leuna edo zimurra izan daiteke.

Irizpide bakoitzari 1, 3 eta 5 bitarteko balioak eman zaizkio, 1 oso ona eta 5 oso txarra izanik.

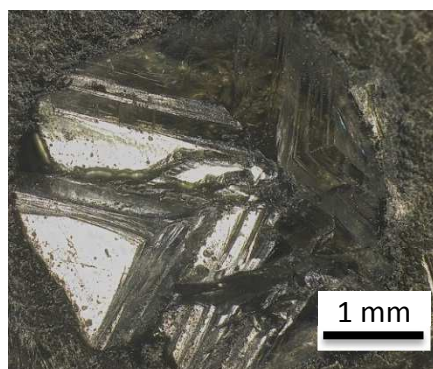
3-1. taula: Diamantagailuen gainazal akabera.

Diamantagailua	D1	D2	D3	D4
Geometriaren uniformetasuna	1	5	1	3
Gainazaleko pitzadurak	1	5	1	5
Gainazal akabera	1	5	5	5
GUZTIRA	1	125	5	75

Sailkapen horren arabera, D2 eta D4 diamantagailuen haustura lehenago gertatu beharko litzateke D1 eta D3 diamantagailuena baino. Diamanteei aurretik egindako argazkietan (3-3., 3-4., 3-5. eta 3-6. irudiak) eta goitik egindakoetan (3-7., 3-8., 3-9. eta 3-10. irudiak) ikus daiteke 4 diamantagailuen gainazal akaberen arteko desberdintasuna.



3-3. irudia: D1 diamantagailuaren gainazal akabera.



3-4. irudia: D2 diamantagailuaren gainazal akabera.



3-5. irudia: D3 diamantagailuaren gainazal akabera.



3-6. irudia: D4 diamantagailuaren gainazal akabera.

Esan beharra dago diamantagailuen jarrera eta orientazio horiek diamantagailuak berek euskarrian lotzean hartzen dituztenak direla; askatu eta lotzen diren bakoitzean, jarrera bera hartzen dute.

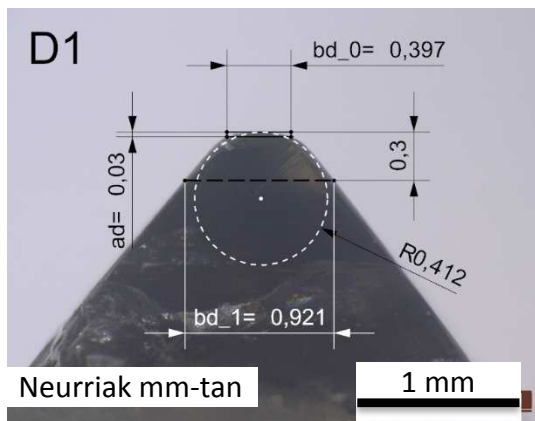
3.2.2. Diamantagailuaren puntaren r_d erradioa

Diamantagailuaren puntaren erradioak eragina du artezarriaren gainazaleko topografian eta piezaren gainazal zimurtasunean, aurreko ataleko 2-2. ekuazioak adierazten duen bezala (22. orrialdea). 3-2. taulan, probetan erabilitako lau diamantagailuen haserako erradioa ageri da, balio handienetik txikienera. Horrez gainera, luzetarako S_d aitzinamendu abiadura berdinentzat (birako 0,134 mm-ko balio konstantea erabili da proba esperimental guztietan) artezarriaren gainazal profilararen R_{t_2} zimurtasun balioa kalkulatu da.

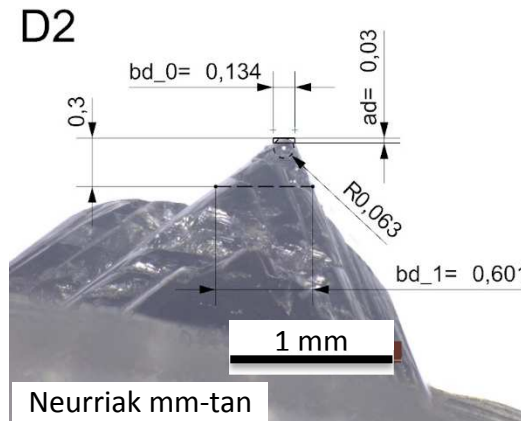
3-2. taula: D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuen puntaren haserako r_d erradioa eta piezaren gainazal zimurtasun teorikoa.

Diamantagailua	D1	D4	D3	D2
Diamantagailuaren puntaren r_d erradioa (mm)	0,412	0,291	0,124	0,063
Artezarriko gainazal zimurtasuna (R_{t_2}) (mm)	0,005	0,008	0,018	0,035
Diamantatze potentzia teorikoa (kW)	↑↑	↑	↓	↓↓

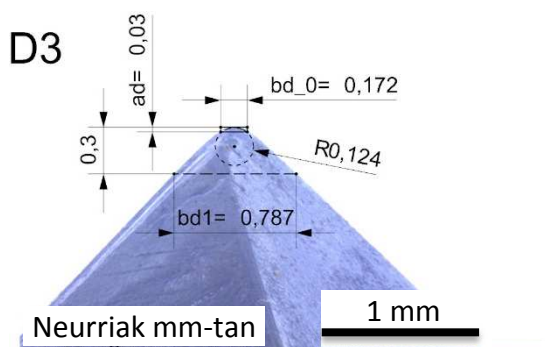
D1 diamantagailuan neurtu da diamantagailuaren puntaren r_d erradio balio handiena (3-7. irudia), jarraian D4-n (3-10. irudia), D3-n (3-9. irudia) eta azkenik D2-n (3-8. irudia). Erradioaren balioa handitzeak ale urratzailean sortutako diamantatze indarra handitzea eragiten du, batetik, eta lokalizatutako tentsioen balioa txikitzea, bestetik. Horrez gainera, aleen arteko loturen haustura gertatzeko aukera handiagoa da, aleen hausturari dagokionez (Chen eta Rowe, 1996a).



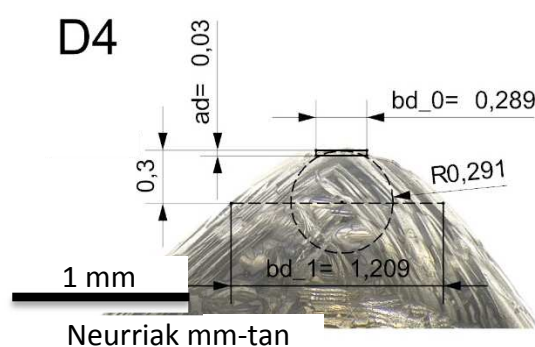
3-7. irudia: D1 diamantagailuaren goitiko ikuspegi mugatua



3-8. irudia: D2 diamantagailuaren goitiko ikuspegi mugatua



3-9. irudia: D3 diamantagailuaren goitiko ikuspegi mugatua



3-10. irudia: D4 diamantagailuaren goitiko ikuspegi mugatua

Beraz, esan daiteke, r_d parametroaren eragina besterik ez kontuan hartuta, lehen diamantatze zikloetan D1 diamantagailuarekin neurtutako diamantatze potentzia maila handiena izan beharko lukeela, eta D2-rekin lortutakoa, berriz, txikiena (ikusi 3-2. taula); D3 eta D4 diamantagailuekin, tarteko balioak lortuko lirateke.

3.2.3. Diamantagailuaren eta harriaren arteko b_d kontaktu luzera

Luzetarako S_d aitzinamendu abiadura jakin baterako U_d gainezarpen ratioan eragiten duen parametro bakarra da b_d kontaktu luzera (2-3. ekuazioa), eta balioa a_d diamantatze sakoneraren menpe du. Erabilitako punta bakarreko diamantagailuen kasuan (ikusi 3-7., 3-8., 3-9. eta 3-10. irudietako diamantagailuen formak) a_d diamantatze sakonera handitzen den neurrian, b_d ere handitu egiten da. Sekzio konstanteko diamantagailuetan, aldiz, b_d balioa bere horretan egoten da beti.

Ondorengo taulan, 30 μm -ko diamantatze sakonerarako neurtutako b_d kontaktu luzeraz gain, horrek eragiten dituen beste diamantatze prozesuko parametroen balio teorikoak ere azaltzen dira: artezarriaren R_{t_1} gainazal zimurtasuna (ikus 2-1. ekuazioa), U_d gainezarpen ratioa eta diamantagailuaren puntaren zorrozatasuna.

3-3. taula: D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuen haserako b_d kontaktu luzera, piezaren gainazal zimurtasun teorikoa, U_d gainezarpen ratioa eta diamantagailuaren γ_d zorrozatasuna.

Diamantagailua	D1	D4	D3	D2
b_d kontaktu luzera (mm)	0,397	0,289	0,172	0,134
Artezarriaren gainazaleko (R_{t_1}) zimurtasuna (mm)	0,006	0,008	0,013	0,016
U_d gainezarpen ratioa ($S_d=0,134$ mm/bira)	3	2,18	1,30	1,01
γ_d zorrozatasuna ($a_d=30$ μm)	0,076	0,104	0,174	0,224

Emitza horiek ikusita, lehenik eta behin esan behar da artezarriaren gainazalaren zimurtasun neurriak nahiko antzekoak direla; R_{t_1} eta R_{t_2} balioei dagozkien ekuazioak erabiliz gero (ikusi 3-2. eta 3-3. tauletan hurrenez-hurren) alde nabarmenena D2 diamantagailuak erakusten du. Kasu horretan, diamantagailuaren geometria oso irregularra da, eta puntaren r_d erradioa eta b_d kontaktu luzera oso txikiak, eta litekeena da CAD bidezko neurketak egitean akatsa ohikoa ($\pm 0,05$ mm) baino handiagoa izatea.

Zorrozatasun balio handieneko diamantagailua D2; txikieneko, aldiz, D1. Diamantagailu zorrotzak ebaketa ertz zorrotzak sortzen ditu artezarriaren gainazalean, eta ondorioz gertatzen diren artezketa indarrak txikiak izaten dira. Zorrozatasun gutxiko erreminta erabiliz gero, edo asko kamustua, aleen haustura garrantzitsuak sortarazten dira harriaren gainazalean, eta ebaketa ertz gutxiago, kasu horretan ere artezketa indarrak txikiak izanik; 2.2.4.3. atalean esan bezala, diamantagailuaren zorrozatasun ratioak ziurgabetasunak sortzen ditu artezketa indarrean. Bestalde, kamustutako edo higatutako diamantagailuekin neurtutako diamantatze indarrak handiagoak dira zorrozutako diamantagailuarekin lortutakoak baino (Mochida et al., 2009).

Gainezarpen ratioari dagokionez, nabarmendu beharra dago lortutako balio txikiena 1 dela, hau da, diamantatze zikloak eskatzen duen gutxieneko balioa diamantagailuak artezarriko ale urratzaileekin gutxienez behin talka egiteko (Chen eta Rowe, 1996a; Hassui eta Diniz,

2003); Ez da kasualitatea $U_d=1$ balioa lortu izana D2 diamantagailurako. Izan ere, diamantatze prozesuko lan baldintzak definitzeko orduan, diamantagailu guztien datu geometrikoak aztertu dira, eta b_d gutxienerako balioa duen diamantagailuarekin (D2, kasu honetan, 0,134 mm-ko balioarekin) $U_d=1$ baldintza betetzeko S_d luzetarako aitzinamendu abiadura kalkulatu da, hots: $S_d=0,134$ mm/bira. D1 diamantagailuaren kasuan, U_d parametroa 3-koa da, puntaren r_d erradioa eta b_d parametroak dezente handiagoak baitauzka.

3.2.4. Diamantagailuaren 0,3 mm-ko higadurarako b_d kontaktu luzera

Diamantagailuaren punta poliki-poliki higatzen da ale urratzaileen kontra jasandako talka ugarien ondorioz, baina higadura hori, 3.3.3.1. ataleko emaitzetan ikusten den bezala, ez da berdin gertatzen diamantagailu guztietan. Atal honetan, higadura maila berdin baterako (0,3 mm-ko sakonerako higadura – ikusi 3-7., 3-8., 3-9. eta 3-10. irudiak) diamantagailuaren geometriak eta hauek eragiten dituzten diamantatze parametroen balio hipotetikoak zein liratekeen aurreikusten da 3-4. taulan.

b_d kontaktu luzera balioak asko handitzen dira haserako balioei dagokienez, % 132 D1, % 319 D4, % 358 D3 eta 349 % D2 diamantagailuen kasuan; dudarik gabe 3-7., 3-8., 3-9. eta 3-10. irudiak ikusiz gero, diamantagailuen geometriak erabateko eragina dauka b_d balioaren garapenean. Gainezarpen ratioa ere nabarmen handitzen da, b_d -ren proportzio berean (luzetarako S_d aitzinamendu abiadura konstanteari eutsita). Teorikoki neurtutako gutxienerako balioa (D2 diamantagailuarekin $U_d=4,5$) kontuan hartuta, artezarriko ale urratzaile guztiek gutxienez 4 aldiz egiten dute talka diamantagailuarekin; D4 diamantagailuaren kasuan, 9 aldiz. Halako balio handiekin lan egitearen ondorioz, diamantagailuaren eta harriko aleen arteko elkarreragin kopurua handitu egiten da, eta, diamantagailuaren beraren higadura azkartzeaz gain, gainazalean erredurak gertatzeko arriskua ere handitu egiten da; lan baldintza horietan, artezketa indar oso handiak lor daitezke (Rowe, 2009).

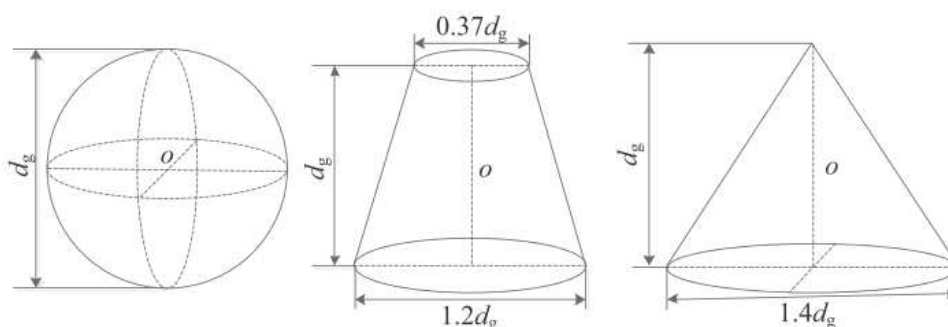
3-4. taula: D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuen b_d kontaktu luzera eta U_d gainezarpen ratioa, 0,3mm-ko sakonerako higadura jasan eta gero.

Diamantagailua	D4	D1	D3	D2
b_d kontaktu luzera (mm)	1,21	0,921	0,787	0,601
U_d gainezarpen ratioa ($S_d=0,134$ mm/bira)	9,13	6,95	5,94	4,54
γ_d zorrozatasuna ($a_d=30$ μ m)	0,025	0,033	0,038	0,050

Diamantagailuaren puntaren zorroztasunari dagokionez, balioak oso txikiak eta antzekoak dira kasu guztietan; % 57-78 bitarteko murrizketak kalkulatu dira diamantagailu guztietarako (3-3. taulako balioekin konparatuz). Kamustutako diamantagailua erabiltzearen ondorioz, artezarriaren gainazaleko aleetan haustura garrantzitsuak eta ihesak sortzeko aukera handiagoa da, ale ebakitzailerako dentsitatea txikiagotzen duena; horrek artezketa indarrak txikiagotzen ditu.

3.2.5. Artezarriko ale urratzaileen diametroa

Artezarria ausazko forma, orientazioa eta jarrera dituzten ale urratzailez osatuta dago (Klocke et al., 2016; Koshy et al., 1999; Liu et al., 2013). Aleok osatzen dute piezaren gainazaletik materiala kendu eta gainazal akabera definitzen duten ertz ebakitzailerako multzoa, ertzok diamantatze prozesuan aldaketak jasaten dituztelarik. Lan baldintza zehatz batzuetan burututako diamantatze prozesuaren ondoren artezarriaren gainazalaren topografia aztertzeko ikerketa bat baino gehiago egin izan da, artezarriko aleen hainbat modelo geometriko garatuta; aleen forma geometrikoari dagokionez, esfera, kono eta moztutako kono forma bidezko hurbilketak egin izan dira (3-11. irudia).

**3-11. irudia: Ale-urratzailearen geometria modelizatzen erabiltzeko 3 forma geometrikoak (esfera, moztutako konoa eta konoa) (Liu et al., 2013).**

Liu et al.-ek (2013) ikusi zuten, piezaren gainazal akabera aurreikusteko ordenagailu bidez garatutako simulazio zinematikoaren bidez, diamantagailuaren puntaren geometriak eta diamantatze baldintzek eragin askoz ere handiagoa dutela piezaren gainazalean ale urratzaileen geometriak (esfera, konoa eta moztutako konoa) baino. Doktoretza tesi honetan Malkin eta Guo (2008) eta Chen eta Rowe-k (1996) beren ikerketetan eginiko esfera bidezko hurbilketa hartu da kontuan.

Malkin eta Guo-k (2008) esfera formako ale urratzailearen batez besteko d_g diametroa eta aleek artezarian osatzen duten V_g bolumen ehunekoaren balioak eman zituzten, 3-1. eta 3-2. ekuazioen bidez, eta Liu et al.-ek (2013) berriz, ale urratzaileen zentroen arteko L_r distantzia, distantzia hori gainazal osoan uniformetzat jota.

$$d_g = 15.2m^{-1} \quad \text{3-1. ekuazioa}$$

$$V_g = 2(32 - S) \quad \text{3-2. ekuazioa}$$

$$L_r = d_g \left(\sqrt{\frac{\pi}{4V_g}} - 1 \right) \quad \text{3-3. ekuazioa}$$

Non m -k alearen tamaina eta S -k artezarriaren egitura zenbakia zehazten duten.

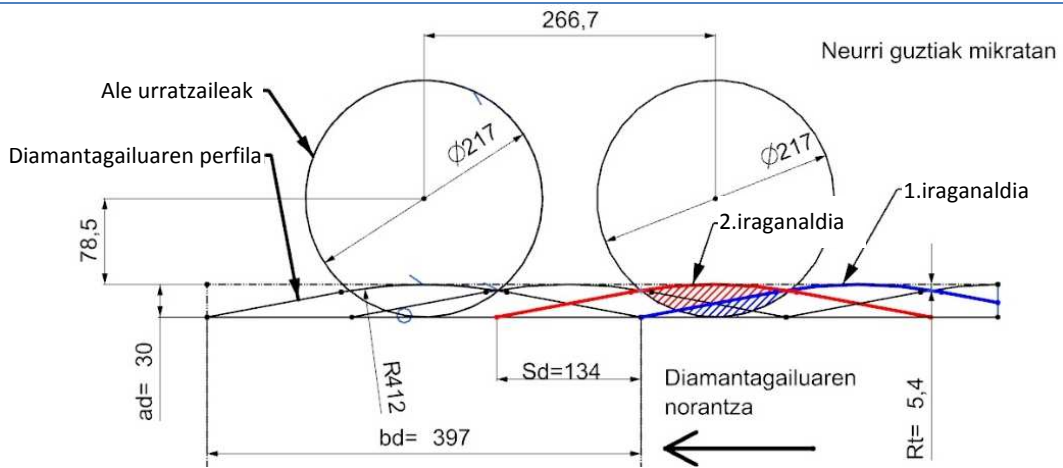
Proba esperimentaletan, aluminazko 82AA70-9J6VW erreferentziadun artezarria erabili da: alearen m tamaina 70 zenbakiaren bidez zehazten da, 180-250 mikra bitarteko dimetro nominalarekin (tamaina ertainekoa bezala sailkatua), eta harriaren S egitura 6 zenbakiaren bidez (egitura itxi samarra, doitasun eta akabera prozesuetarako egokia).

Balio horiekin, d_g , V_g eta L_r balioak zehatz daitezke:

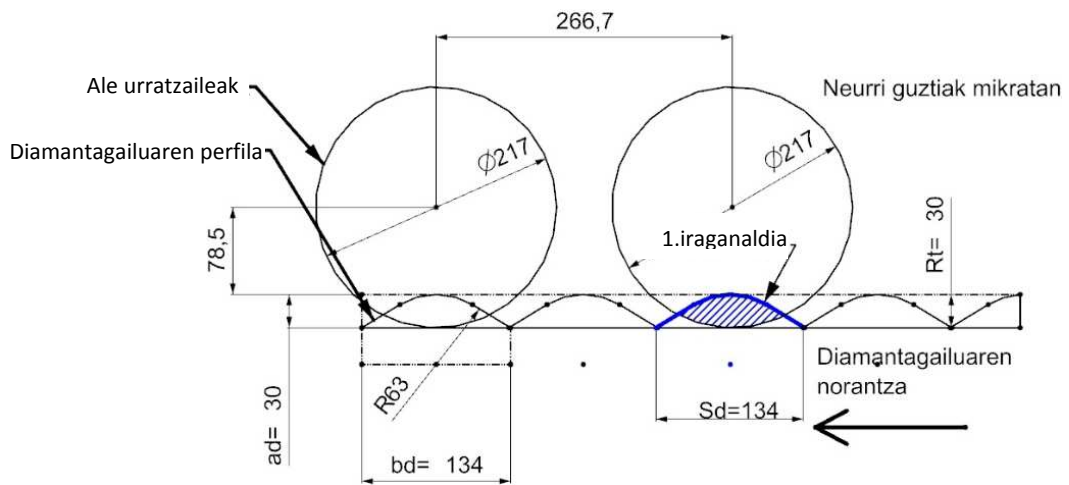
$d_g = 217 \mu m$	$V_g = \%52$	$L_r = 49,7 \mu m$ (Zentroen artean: $217+49,7=266,7 \mu m$)
-------------------	--------------	--

Ondorengo irudietan (3-12., 3-13., 3-14. eta 3-15. irudiak) D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuek 82AA70-9J6VW erreferentziadun artezarriko ale urratzaileekin teorikoki izango luketen talkaren 2D modeloak azaltzen dira: diamantagailuko aleen geometriaz gain, a_d diamantatze sakonera eta S_d luzetarako aitzinamendu abiadura diamantatze baldintzak ere ezagutu behar dira.

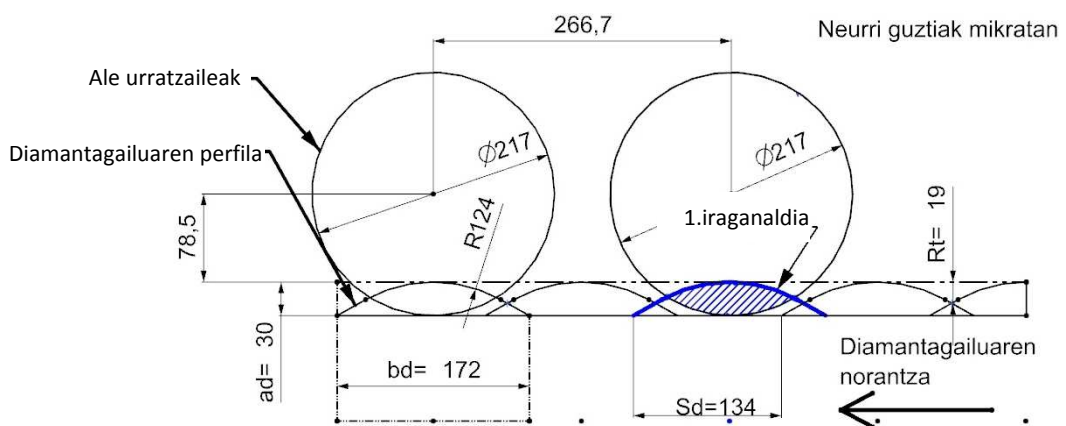
$$\alpha_d = 30 \mu m ; S_d = 0,134 \text{ mm/bira}$$



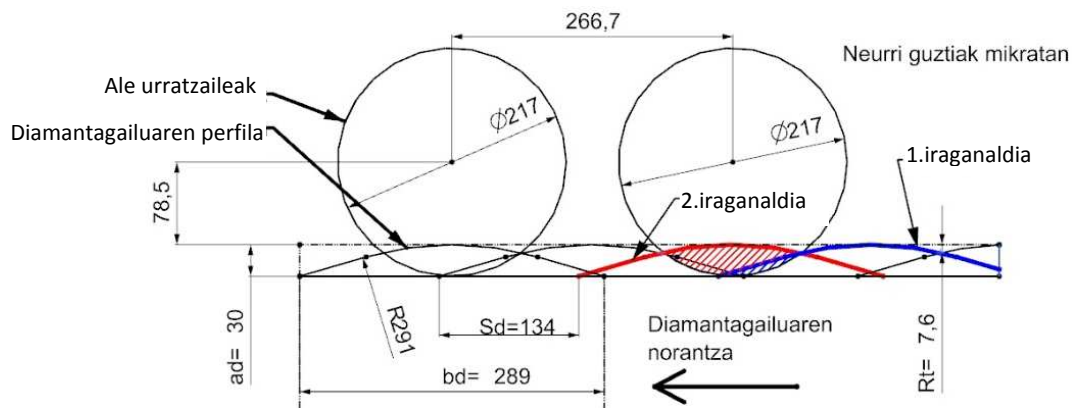
3-12. irudia: D1 diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talkaren modelizazio geometrikoa.



3-13. irudia: D2 diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talkaren modelizazio geometrikoa.



3-14. irudia: D3 diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talkaren modelizazio geometrikoa.



3-15. irudia: D4 diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talkaren modelizazio geometrikoa.

Irudi horiei erreparatuta, honako hauek ondoriozta daitezke:

- I. Artezarriaren eta diamantagailuaren puntaren arteko talkaren modelizazio teoriko horietan ikusten da (printzipioz, behintzat) diamantagailuaren puntaren geometriak ez duela eragin handirik diamantatze prozesuan, talka azalera oso antzekoa baita kasu guztietan (3-5. taula). Esan daiteke, halaber, eta ale urratzaile osoa kontutan hartuta, talka horien ondorioz aleen haustura gertatzeko probabilitatea handiagoa dela loturena gertatzekoa baino, betiere artezarriaren gogortasun mailaren arabera (Linke eta Klocke, 2010).
- II. Diamantatze potentzia azalera horren mende dagoenez, esan daiteke potentzian ez litzatekeela aldaketa handirik nabaritu behar batetik bestera. Ondorengo 3-5. taulan ikus daitezkeen bezala, ale urratzailearen azalera osoa erreferentziatzen hartuta, talkari dagokion azalaren ehunekoa oso txikia da (% 4,7 eta % 6,2 bitartekoa). D1 eta D4 diamantagailuen kasuan, b_d balioa S_d balioarekin konparatuta oso handia izanik (U_d balio handia), benetako talka azalera bi iraganaldiren arteko azalera aldea izango da, 3-12. eta 3-15. irudietan azaltzen den bezala.

3-5. taula: Diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talka azalerak.

Diamantagailua	D1	D2	D3	D4
Ale-urratzailearen azalera ($\times 10^{-3} \text{ mm}^2$)	$36,9 \times 10^{-3}$			
Talka-azalera ($\times 10^{-3} \text{ mm}^2$)	1,74	1,91	2,3	2,24
Talka-azalera (%)	4,7	5,2	6,2	6,1

Era berean, esan beharra dago datu eta emaitza horiek guztiak diamantagailu berriei dagozkiela; diamantagailua higatzen hasten denean, diamantatze baldintzak aldatu egiten dira, batez ere b_d aldagaiaren hazkundeagatik.

- III. Diamantatze baldintza horietan artezarriaren gainazalean sortuko litzatekeen gainazal zimurtasun teorikoa kalkulatu egin daiteke, 2D irudi horiek oinarri.

3-6. taula: Artezarriaren gainazaleko hariaren sakonera diamantatu ondoren.

Diamantagailua	D1	D4	D3	D2
R_{t_1} (mm)	0,006	0,008	0,013	0,016
R_{t_2} (mm)	0,005	0,008	0,018	0,035
2D modeloa (mm)	0,005	0,007	0,019	0,030

2.2.4.1. ataletan 2-1. eta 2-2. ekuazio bidez kalkulaturakoekin alderatuta (3-6. taula) neurtutako balioak oso antzekoak dira.

3.3. DIAMANTAGAILUAREN HIGADURAREN EBOLUZIOAREN AZTERKETA

Diamantagailuen hasierako azterketa egin ondoren, eta diamantagailuen higaduraren eboluzioari heltzeko asmoarekin, diamantatze lan baldintza konkretu bat definitu eta diamantatze zikloak burutu dira diamantagailu guztiekin, tarteka artezketa zikloak gauzatu, diamantagailuen biziraupena bukatu artean.

Baina zein da diamantagailuen biziraupena? Nola jakin haien biziraupenaren bukaerara iritsi direla? Horixe da, hain zuzen ere, proba esperimental hauen helburua, hots, artezketa eta diamantatze prozesuetan jasotako informazioarekin (dela potentzia edo soinu igorpen seinaleak, dela piezaren gainazalaren zimurtasuna edo beste informazioen bat erabiliz) diamantagailuaren higaduraren ondorioz piezaren kalitatea (gainazalaren zimurtasuna, gainazalaren propietateak, geometria, etab.) kaltetua izan ote den egiaztatzea.

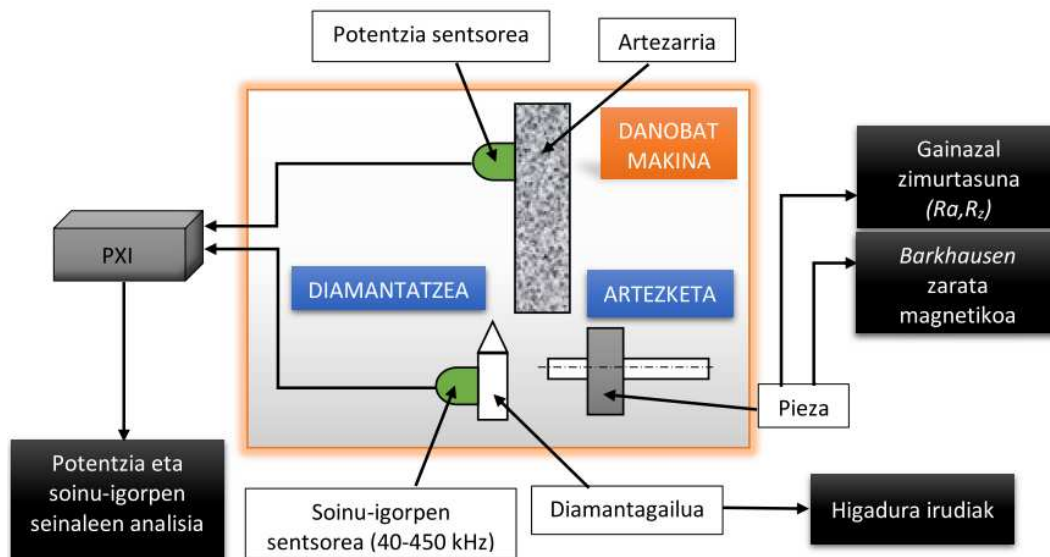
Lehenik eta behin, egindako proba esperimentalen deskribapena egingo da: zein lan baldintzatan egin diren, erabilitako saiakuntzen diseinua, jasotako datuak, tresneria eta

materiala, etab. Jarraian, lortutako seinale eta datuak azalduko dira, eta diamantagailuaren higadura eta piezaren kalitate aldaketarekin izan dezaketen loturaren lehen azterketaren berri emango da. Horrekin batera, aurreko atalean diamantagailuaren geometria edo formak diamantagailuaren higaduran izan dezakeen eraginari buruzko hipotesia bete den ala ez aztertuko da. Azkenik, diamantatze eta artezte prozesuetan jasotako seinale eta datuak prozesatuz diamantagailuaren higadura kontrolatuko lukeen adierazlea lortzeko jarraitutako prozedura azalduko da.

3.3.1. Entseguen deskribapena eta jarraitutako prozedura

Atal honetan, proba esperimentaletan erabilitako tresneriaren eta konfigurazioaren deskribapena dago; 3-16. irudian, eskema bidez azaltzen da.

- **Artezketa makina:** aurreko lerroetan azalduko helburuak lortzeko egindako artezketa eta diamantatze ziklo guztiak UPV/EHUko makina erreminta laborategiko DANOBAT FG-600-S artezketa zilindrorako makinan egin dira (3-17. irudia).
- **Artezarria:** proba guztietan erabilitako artezarria DRAGAO etxeko aluminazko 82AA70-9J6VW erreferentziadun harria izan da (3-18. irudia). Harriaren hasierako neurriak hauek dira: 450 mm-ko kanpo diametroa, 203,2 mm-ko barne diametroa eta 20 mm-ko zabalera. Diamantatze zikloak gauzatzearekin batera, harriaren kanpo diametroa txikituz joan da, eta kanpo diametroa 350 mm-ra iristerakoan harria aldatu behar izan da. Harriaren hornitzaileak 32 m/s-ko kanpo abiadura gomendatzen du. Artezarri honi buruzko informazio gehiago 3.2.5. atalean ikus daiteke.
- **Artezteko pieza:** diamantagailuaren higadurak arteztutako piezan izan dezakeen eragina aztertzeko, AISI 52100 materiala eta 54 HRC gogortasuneko pieza zilindrikoak erabili dira (3-19. irudia), 80 mm-ko kanpo diametrokoak eta 19,5 mm-ko zabalera-koak. Harriaren eta piezaren zabalera oso antzekoak izanik, kasik berdinak, *plongee* operazioa burutu da artezketa prozesuan. Pieza puntu artean eutsita arteztu da.



3-16. irudia: Proba esperimentaletan erabilgarriko tresneria eta konfigurazioa.



3-17. irudia: DANOBAT FG-600-S makinaren kanpo itxura.



3-18. irudia: DRAGAO etxeko 82AA70-9J6VW harria.

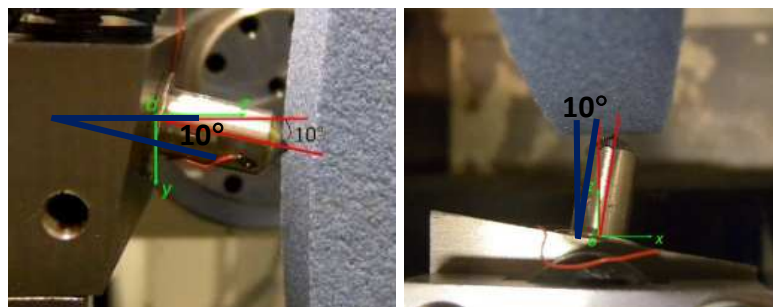
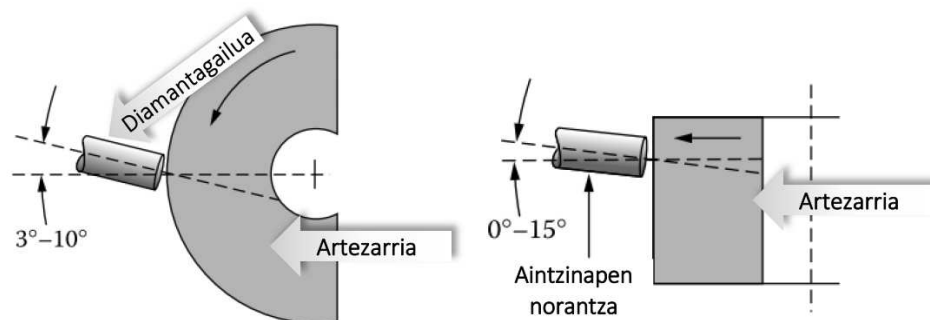


3-19. irudia: Artezteko pieza.

- **Diamantagailua:** diamantagailuen deskribapena 2.2.2. atalean jaso bada ere, esan beharra dago diamantagailu ekoizle gehienek gomendatzen dutela punta bakarreko diamantagailuak 0-15°-ko inklinazioa edukitzea harriarekiko, 3-20. irudian ikus daitekeen moduan.

Jarrera aldaketa horrek, diamantagailuaren puntaren higadura neurri jakin batera iristen denean, diamantagailua berrerabil ahal izatea ahalbidetzen du, besteak beste, diamantagailuaren beraren jarrera euskarriarekiko 90° biratuz gero. Eragiketa hori industria mailan egiten bada ere, ikerketa honetako proba esperimentaletan ez da egin; diamantagailu bat bere bizitzaren azkenera iritsi izan denean, kendu eta beste bat jarri da.

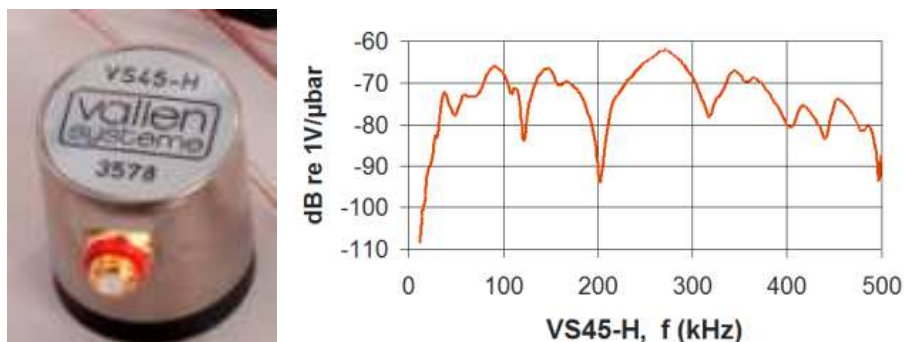
Esan beharra dago, era berean, diamantagailuen higaduraren eboluzioa kontrolatzeko, euskarritik askatu eta LEICA Z6APO mikroskopiaarekin irudiak atera zaizkiela aurretik zein goitik (ikus 3-2. irudia). Euskarrian berriro aurreko jarrera berean kokatzeko, erreferentzia markak egin dira bai diamantagailuaren gorputzean, baita euskarrian bertan ere; horrela, diamantatze proba guztietan diamantagailua jarrera berean izatea lortu da.



3-20. irudia: Diamantagailuaren jarrera harriarekiko.

- **Soinu igorpen sentsorea:** soinu igorpen seinaleak jaso eta ordenagailuan gordetzeko, VALLEN SYSTEME etxeko VS45V erreferentziako soinu igorpen sentsorea erabili da. Sentsorea aukeratzen da gailu horiek eskaintzen duten lan erregimeneko maiztasun bandaren arabera. Kasu honetan, 2.4.1. atalean artezketa eta diamantatze prozesuen monitorizazioaren inguruan eginiko azterketan ikusi den bezala, diamantagailuaren

eta artezariaren arteko talken ondorioz sortutako uhinak 0-300 kHz-eko maiztasun bandan igortzen dira (Wehmeier eta Inasaki, 2002). Beraz, 20-450 kHz-eko maiztasun banda tartean lan egiten duen soinu sentsorea hautatu da (3-21. irudia).



3-21. irudia: Soinu igorpen sentsorea (ezkerraldean) eta aukeratutako VS45H sentsorearen laneko maiztasun banda.

Bestalde, soinu igorpen sentsoreen errendimendua soinu igorpena gertatzen den sorgunetik sentsorearen posizioa dagoen distantziaren arabera da (Jemielniak, 2000; Wehmeier eta Inasaki, 2002; Zan et al., 2004); zenbat eta urrunago egon, orduan eta zarata soinu gehiago jasotzeko aukera. Aipatu proba esperimentalak egiteko, diamantagailuetarako euskarri berezi bat fabrikatu da, soinu sentsorea diamantagailutik ahalik eta gertuen jarri ahal izateko (3-22. irudia). Euskarriaren gainaldean, sentsorearen oinarriaren diametroko ahokaleku bat mekanizatu da, sentsorea bertan jartzeko. Oratu, berriz, brida baten bidez egin zaio sentsorearen goialdetik.



3-22. irudia: VS45H sentsorea diamantagailuaren euskarriaren gainean jarrita eta eutsita.



3-23. irudia: Potentzia kontsumo neurgailua (Load Control Inc.)

- **Potentzia kontsumo neurgailua:** artezketa nahiz diamantatze zikloetan, artezarriaren buruaren kontsumo elektrikoa neurtu da, *Load Control Incorporated* etxeko UPC-FR potentzia neurgailuarekin (3-23. irudia). Produktuaren ezaugarrien artean aipatzekoa da % 5-eko doitasuna duela neurketa eskala osoan.

Lan honetan aditzera ematen diren potentzia balio guztiak (artezketa eta diamantatzea) prozesuari soilik dagozkie, artezarri buruan egindako potentzia kontsumo neurketari hutsean kontsumitzen duen potentzia kendu baitzaio; beraz, benetako potentzia da. Bestalde, potentzia neurgailu bidez jasotako seinalea prozesatzeko eta balioak irakurtzeko, seinale tratamenduak egiteko erabiltzen den National Instruments (NI) etxeko DIAdem programa erabili da; irakurketa horietan egindako akatsa % 3-tik beherakoa da.

Energiaren ikuspuntutik, artezketa prozesua definitzeko artezketako energia espezifikoa (e_c) erabiltzen da: piezaren unitate bolumetrikoko bat kentzeko edo mekanizatzeke erabili beharreko energia da. Halaber, esan daiteke e_c artezketa prozesuaren efizientziaren alderantzizko balioa dela, azken hori potentzia kontsumo unitateko mekanizatutako material kantitatetzat jota. Matematikoki, 3-4. eta 3-5. ekuazioen bidez kalkula daiteke.

$$e_c = \frac{P}{Q_w} \quad \text{3-4. ekuazioa}$$

$$Q_w = b_s \cdot v_f \cdot d_w \cdot \pi \quad \text{3-5. ekuazioa}$$

Non:

- P (W) artezarriaren buruan neurtutako potentzia, potentzia kontsumo neurgailuarekin neurtua,
- Q_w (mm³/s) artezketa prozesuan mekanizatutako piezaren material emaria,
- b_s (mm) artezarriaren zabalera,
- v_f (mm/min) artezarriaren aitzinamendu abiadura,
- eta d_w (mm) piezaren diametroa diren.

Artezketa zilindrikoaren kasuan mekanizatutako piezaren material emaria 3-5 ekuazioaren bidez kalkulatzen da.

- **Soinu igorpen eta potentzia seinaleak eskuratzeko PXI ekipoa:** PXI ekipoa ordenagailuetan oinarritutako plataforma bat da, mota desberdinetako seinaleak jasotzeko erabiltzen dena. Izena *PCI (Peripheral Component Interconnect) eXtensions for Instruments* testuari dagokio. Probetan, 3-24. irudiko National Instruments (NI) etxeko NI PXI-1042 ekipoa erabili da (NI PXI-5105 markako osziloskopio eta digitalizatzaileaz hornituta).

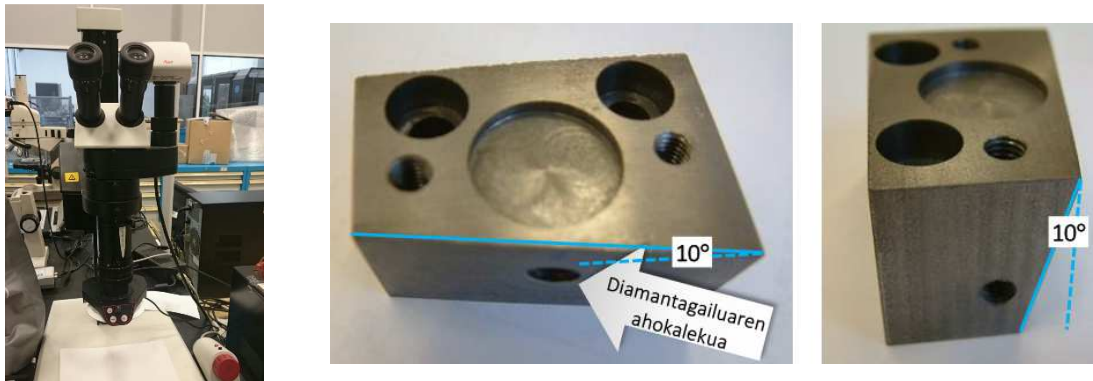


3-24. irudia: Soinu igorpen eta potentzia seinalea eskuratzeko instrumentu elektronikoak.

Bai soinu igorpen eta potentzia seinaleen kableak PXI-era konektatu eta honek frekuentzia desberdinetara jasotzen ditu seinaleak, soinu-igorpenaren kasuan 1,25 MHz-era eta potentziaren kasuan 100 kHz-era. Soinu igorpen sentsoreak 20-450 kHz-eko maiztasun banda tartean lan egiten duela esan da lehenago, eta, *Nyquist-Shannon* delakoaren laginketa teorema dioena aintzat hartuta, maiztasun bandako balio maximoa bikoiztu, eta zertxobait handiagoa den laginketa maiztasuna definitu da, 1,25 MHz, hain zuzen ere.

Jarraian, soinu igorpen seinaleak Lab-View etxeko DIAdem programarekin prozesatu dira, *RMS* eta beste balio estatistiko batzuk lortzeko, eta potentzia seinaleak, berriz, Excel programarekin.

- **Mikroskopia:** diamantatze ziklo bakoitzaren ondoren, diamantagailua euskarritik askatu eta puntaren higaduraren argazkiak egin dira, LEICA Z6APO mikroskopia bidez (3-25. irudiaren ezkerrekoa). Diamantagailua mikroskopiaan makinako jarrera berean jarri ahal izateko, makinakoaren pareko beste euskarri bat mekanizatu da (3-25. irudiaren eskuinaldea).



3-25. irudia: LEICA etxeko Z6APO mikroskopia (ezkerraldean) eta diamantagailuaren argazkiak egiteko euskarria (erdian eta eskuinaldean).

Irudiok higaduraren tamaina neurtzeko ere erabili dira, NX CAD diseinu programaren bidez inportatuz; b_d kontaktu luzera eta diamantagailuaren eta artezarriaren arteko aurretiko A_f azalera aldagaiak neurtu dira. Horrez gainera, diamantagailuaren puntan sortutako hausturen eboluzioa aztertzeko ere erabili dira irudiok. NX CAD bidez eginiko neurketen doitasuna +/- 0,05 mm-koa da.

- **Rugosimetroa:** arteztutako piezaren gainazal akabera ezagutzeko, rugosimetro eramangarri bat erabili da (Taylor-Hobson etxekoa) (3-26. irudia). Horrekin, gainazalaren R_z balioa neurtu da artezketa ziklo bakoitzaren ondoren piezaren kanpo zirkunferentziako 5 puntutan, batez besteko balioa hartuta kontuan. Aparailu honen neurketa erresoluzioa 0,0016 μm -takoa da.



3-26. irudia: Taylor-Hobson etxeko rugosimetro eramangarria piezaren gainazalaren R_z zimurtasuna neurtzeko.

- **Barkhausen zarata magnetikoa:** diamantagailuaren gehiegizko higaduren ondorioz, diamantagailuaren eta harriaren arteko b_d kontaktu luzera asko handi daiteke, eta, horrekin batera, U_d gainezarpeneratioa ere bai. Ondorioz, diamantagailuaren eta harriko aleen arteko elkarreragin kopurua hazi egiten da eta, diamantagailuaren

beraren higadura azkartzeaz gain, ale urratzaileak ere kaltetuak izaten dira, piezaren gainazalean erredurak gertatzeko arriskua ere handitu egiten da (Rowe, 2009). Piezak kalte termikoak jasaten dituenean, batetik, trakziozko tentsioak konpresiokoak baino handiagoak izan daitezke (Santa-Aho et al., 2012) eta, bestetik, metalografia fase aldaketak ere gerta daitezke. Gertakari hauen aurrean gorputzaren gainazalean sortutako eremu magnetikoaren aldaketen berri ematen duen metodo ez suntsikorra da *Barkhausen* metodoa. Badira beste metodo batzuk ere piezak jasandako tentsio hondar eta metalografia faseak aztertzeko, hala nola, X izpi bidezko difrakzio teknika, ekorketako mikroskopia elektronikoa (*SEM*) eta abar, baina garestiak ez ezik, suntsikorrak ere badira, eta denbora asko behar izaten da azterketa egiteko; gainera, horretarako beharrezko tresneria ez dago eskuragarri entseguak egin diren tokian.



3-27. irudia: *Barkhausen* metodoaren bidez piezaren gainazaleko tentsio aldaketak neurtzen.

Azterketa honen baitako proba esperimentaletan, STRESSTECH etxeko Rollscan-300 gailua erabili da (3-27. irudia) piezaren gainazaleko igorpen magnetikoak neurtzeko eta gainazalean erredura zantzurik dagoen ikusteko. Esan beharra dago *Barkhausen* metodoa oso sentikorra dela edozein eremu magnetikorekiko, eta neurketak kualitatibotzat jo behar direla, kuantitatibotzat baino.

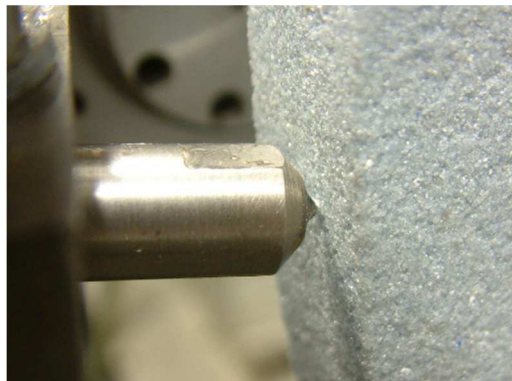
Gailuaren neurketa parametroak behar bezala definitu dira, emaitzen irakurketa egokia egiteko (haserako balio txikiak eta bukaerako balio handiak) eta neurketa piezaren gainazaleko mikra gutxi batzuetako sakonerako tentsioak neurtu ahal izateko (70-200 kHz-eko iragazkia).

3.3.2. Lan baldintzak

Diamantagailuaren higadura sortu, eta arteztutako piezan duen eragina aztertu ahal izateko, diamantatze eta artezketa ziklo zehatz batzuk definitu dira.

3.3.2.1. Diamantatze baldintzak

Lehenik eta behin, esan beharra dago diamantatze zikloak lehorrean burutu direla, diamantagailuaren higadura azkartzeko asmoz. Dударik gabe, oso baldintza kaltegarria da diamantagailurako, baina erabat onargarria, aurretik egindako beste ikerketa batzuk erreferentzia gisa hartuz gero (Linke eta Klocke, 2010).



3-28. irudia: Diamantagailua artezarriarekin kontaktuan.

Lan baldintzei dagokienez, ondorengo taulan (3-7. taula) ikus daitezke proba esperimentalak egiteko definitutakoak. Probak lau aldiz errepikatu dira, lau diamantagailurekin, horietako bakoitzerako artezarri berri bat erabilia.

3-7. taula: Diamantatze zikloetako lan baldintzak.

Prozesu aldagaiak	v_s (m/s)	n_s (bira/min)	d_{s_0} (mm)	S_d (mm/bira)	v_d (mm/min)	U_d	a_d (μm)
Balioa	32	1.358	450	0,134	180	1 - 3	30

Hauek dira aldagaien deskribapenak:

- v_s (m/s) artezarriaren abiadura periferikoa (konstantea).

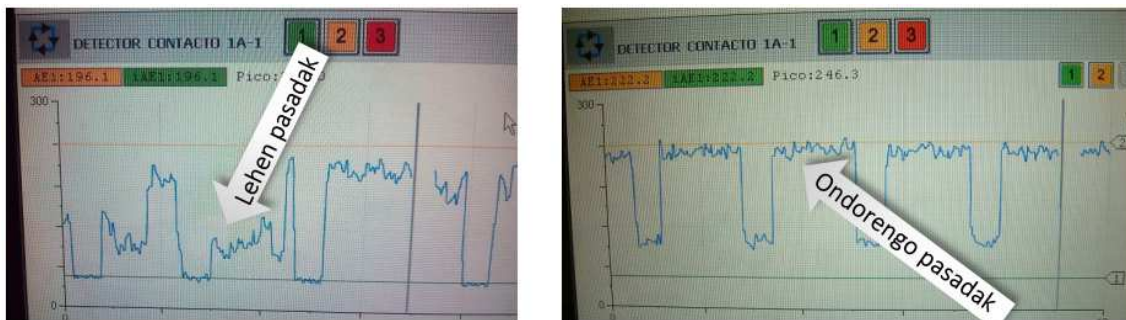
- n_s (bira/min) artezarriaren haserako biratze abiadura; diamantatze zikloak burutzearekin batera, artezarriaren kanpo diametroa txikituz doa, eta, beraz, kanpo abiadura konstanteari eusteko, n_s biratze abiadura gero eta handiagoa da.
- d_{s_0} (mm) artezarriaren haserako kanpo diametroa.
- S_d (mm/bira) diamantagailuaren luzetarako aitzinamendu abiadura harriaren bira bakoitzeko. Balio hori diamantagailuen hasierako b_d kontaktu luzeraren arabera definitu da; izan ere, diamantatze prozesuko baldintza zinematikoak definitu dira diamantagailu guztiekin $U_d=1$ balio minimoa bermatzeko (ikus 3-3 taula 75. orrialdean). Aldagai hau konstante mantendu da diamantatze prozesu osoan; U_d -ren ekuazioa b_d eta S_d -ren menpe egonda, b_d -k U_d -n duen eragina aztertzeko S_d konstante mantendu behar da.
- v_d (mm/min) diamantagailuaren luzetarako aitzinamendu abiadura (S_d eta n_s -ren baitan dago). S_d konstantea da, baina n_s ez; beraz, v_d -ren balioa ere eguneratu beharra dago diamantatze ziklo batetik bestera.
- U_d gainezarpen ratioa. Balio hau ere aldatuz doa diamantagailuaren puntaren higadura handitzearekin batera. U_d -ren kurba diamantagailuaren puntan neurtutako b_d neurriarekin kalkulatu da.
- a_d (μm) diamantatze sakoneraren balioa.

U_d (1-3) eta a_d -ren ($30 \mu\text{m}$) balioak kontuan hartuta, esan daiteke diamantatze larriko lan baldintzak direla hauek (ikus 24 orrialdean diamantatze prozesuetako ohiko lan baldintzen 2-2. taula).

Bestalde, esan behar da diamantatze ziklo berri bat hastean artezarriaren eta diamantagailuaren puntaren arteko zero erreferentzia hartu beharra dagoela. Hasierako prozesuaren doikuntza fasean, nabaritu da diamantatze ziklo berri bat hasten den bakoitzean, lehen 2-3 iraganaldiak egiterakoan, diamantatze sakonera erreal txikiagoa dela makinaren kontrolak bistaritzen duen diamantagailuaren eta artezarriaren arteko kontaktu intentsitate kurbaren arabera (ikus 3-29. irudia). Esan daiteke aldaketa horren jatorria dagoela diamantatze prozesua lehorrean egitean sortutako karga termiko

handietan; hozgarri sistemarik ezean, diamantatze zikloan sortzen den beroa ezin da ebaketa eremutik kanpora barreiatu, eta beroaren zati handi bat diamantetik (eroankortasun termiko handiko materiala da) zehar barreiatzen da, euskarrira iritsi arte. Euskarriak, ordea, eroankortasun termiko txikiagoa duenez, beroa hortxe metatu eta dilatatu egiten da.

Ziklo bateko diamantatze iraganaldiak gauzatu ahala (ziklo bakoitzean 25 diamantatze iraganaldi egiten dira), diamantagailua dilatatu da, egonkortasun termiko jakina lortu arte (ikus 2.3 atala); hortxe, gehieneko dilatazioa lortzen du. Hurrengo zikloa burutzerako, baina, diamantagailua hoztu egiten da (ingurugiro tenperaturara egokitzen da) eta hasierako luzerara bueltatzen da.



3-29. irudia: Artezketa makinako kontaktu sentsorearen kurba diamantatze iraganaldietan.

Horrenbestez, diamantagailuaren eta artezarriaren arteko zero erreferentzia hartu ezean, ziklo berria hasten denean diamantagailuak ez du kontakturik egingo artezarriarekin, eta lehenengo diamantatze iraganaldietan behar baino gutxiago igurtziko du artezarria (3-29. irudiaren ezkerreko argazkia). Berrito ere dilatatu eta egonkortasun termikoa lortzen duenean (lehen 4-5 iraganaldiak egin ostean), prozesua errepikakorra izango da.

3.3.2.2. Artezketa baldintzak

Diamantatze ziklo bakoitzaren ondoren artezketako *plongee* operazio bakarra burutu da hozgarri sistemarekin, erabilitako lan-baldintzak erdi-akaberakoak izan direlarik, artezarriaren topografia piezan hobeto islatzeko helburuarekin (3-8. taula). Kasu honetan ere artezketa operazio bakoitzaren aurretik pieza eta artezarriaren arteko zero-erreferentzia egin da.

3-8. taula: Artezketa prozesuko lan-baldintzak.

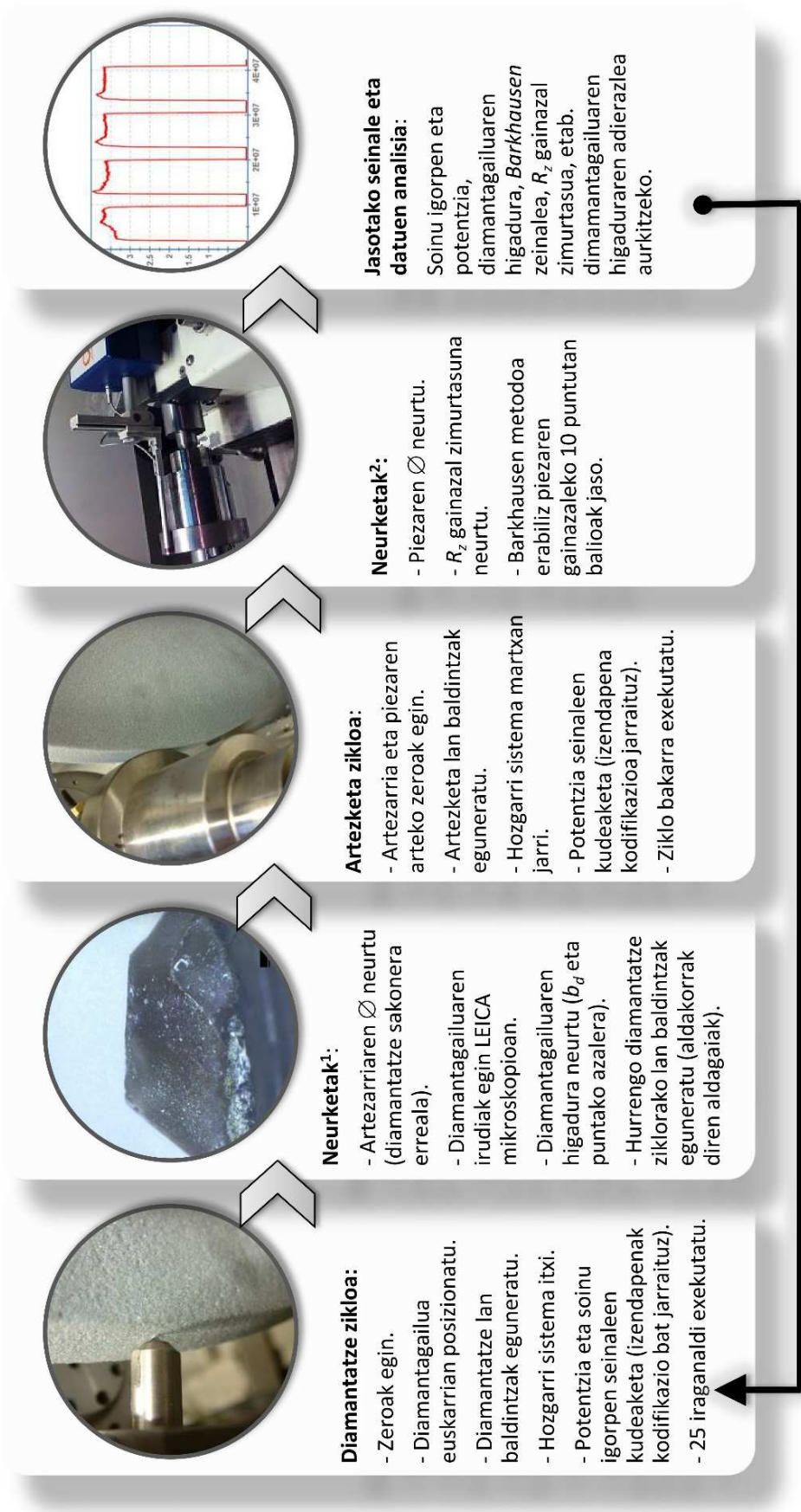
Prozesu aldagaiak	v_s (m/s)	v_w (m/min)	n_w (bira/min)	v_f (mm/min)	$q_s(v_s/v_w)$	Q' (mm ³ /mm.s)	a_e (μ m)
Balioa	32	22,6	90,9	0,360	84,9	1,51	150

Hauek dira aldagaien deskribapenak:

- v_w (m/min) piezaren abiadura periferikoa
- n_w (bira/min) piezaren haserako biratze abiadura. Artezketa zikloak burutzearekin batera, piezaren kanpo diametroa txikituz doa, eta, beraz, kanpo abiadura konstanteari eusteko, n_w biratze abiadura gero eta handiagoa da
- v_f (mm/min) artezketako aitzinamendu abiadura.
- q_s abiadura ratioa. Akaberako artezketa prozesuek 80-120 bitarteko balioa izaten dute (Graf, 2011).
- Q' (mm³/mm·s) txirbil emari espezifikoa. Ohiko artezketan, 0,1-10 bitarteko balioak erabiltzen dira, balio txikiak akabera oso oneko prozesuetarako eta handiak arbastatze eragiketarako,
- a_e (μ m) artezketako guztirako sakonera.

**3-30. irudia: Artezketa prozesua (artezarriaren eta piezaren arteko kontaktua).**

Proba esperimentaletan lortutako emaitza guztiak aztertu baino lehen, probak eurak garatzeko definituriko diseinuaren berri ematen da ondorengo grafikoan. Prozesu hau guztia lau aldiz errepikatu da D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuekin.



3-31. irudia: Diamantagailuen higadura eboluzioa aztertzeko erabilitako saiakuntza esperimentalen diseinua.

3.3.3. Proba esperimentalak – emaitzen lehen azterketa

Aurreko ataletan, proba esperimentaletan erabilitako diamantagailuen eta tresneriaren deskribapena egiteaz gain, probak burutzeko artezketa eta diamantatze lan baldintzak ere zehaztu dira. Atal honetan, erabilitako lau diamantagailuekin lortutako emaitzen lehen azterketaren berri emango da.

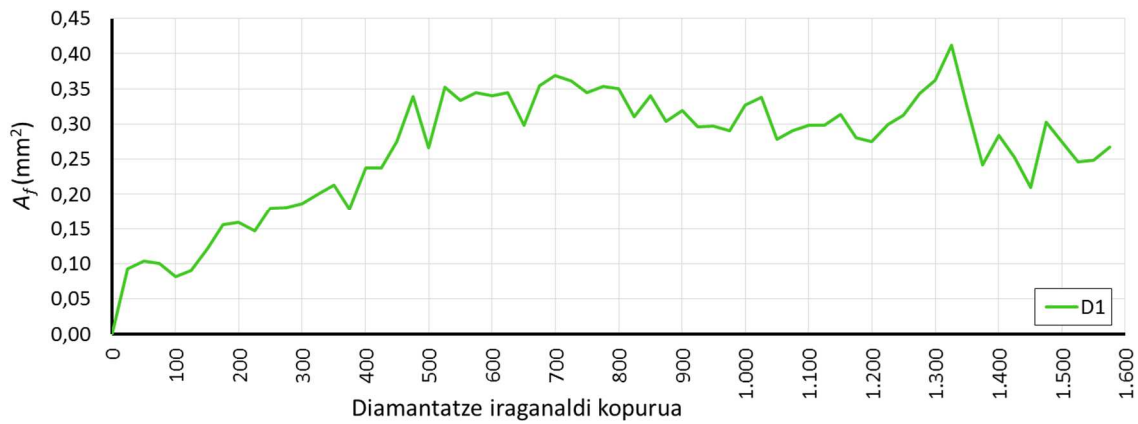
Lehenik eta behin, diamantagailuaren higaduraren garapena aztertzea izanik atal honen helburu nagusia, diamantagailuaren eta artezarriaren arteko aurretiko A_f kontaktu azalera, diamantagailuaren eta harriaren arteko b_d kontaktu luzera eta, azken horrekin lotuta, U_d gainezarpen ratioaren eboluzioak erakutsiko dira diamantagailu bakoitzarekin burututako diamantatze zikloetan.

3.3.3.1. A_f kontaktu azalera

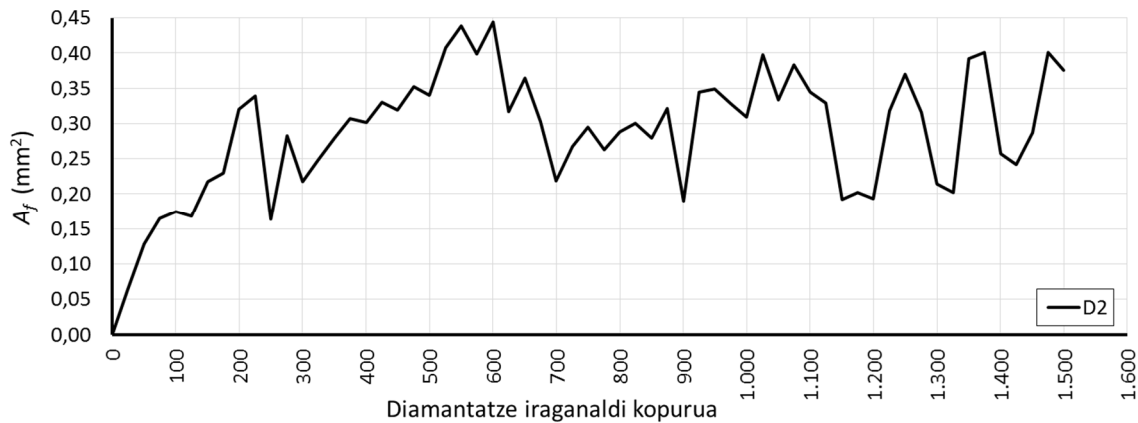
Diamantagailuak jasandako higadura maila neurtzeko aldagai bat diamantagailuaren eta artezarriaren arteko aurretiko kontaktu azalera da (ikus 3-2. Irudia); diamantagailua higatzen den neurrian, azalera hori gero eta handiagoa da. Marinescu et.-ek (2007) (ikus 2-19. irudia 29. orrialdean) azalera horren eboluzioaren gerturaketa bat egin zuten azaleraren beraren luzera grafiko batean irudikatuz, eta esan zuten diamantagailuaren bizitzaren bukaerako fasean (hirugarren fase gisa bereizia) higadura maila esponentzialki handitzen dela, diamantagailuak behin betiko huts egin arte. Esan beharra dago neurketa horrek kontuan hartzen zituela, halaber, kontaktu azaleraren ingurunean gertatzen ziren material haustura ugariak.

Atal honetan burututako proben ondorioz lortutako emaitzak aztertuta (ikus 3-32., 3-33., 3-34. eta 3-35. irudiak), nahiko erraz nabari daitezke diamantagailuaren higaduraren lehen eta bigarren faseak. Hirugarren fasearen joerak, ordea, ez du inongo antzik Marinescu et al.-ek (2007) adierazitakoarekin; lau diamantagailuen puntaren A_f azalera neurtzeko, azalera laua baino ez da kontuan hartu, hau da, diamantagailuaren eta artezarriaren artean kontaktu egiten duen benetako azalera. Egia da azalera horren inguruan sortzen diren material hausturek higaduraren arrastoa areagotzen dutela, baina kasu honetan erabaki da soilik kontaktu azalera neurtzea, uste baita azalera izan dezakeela loturaren bat

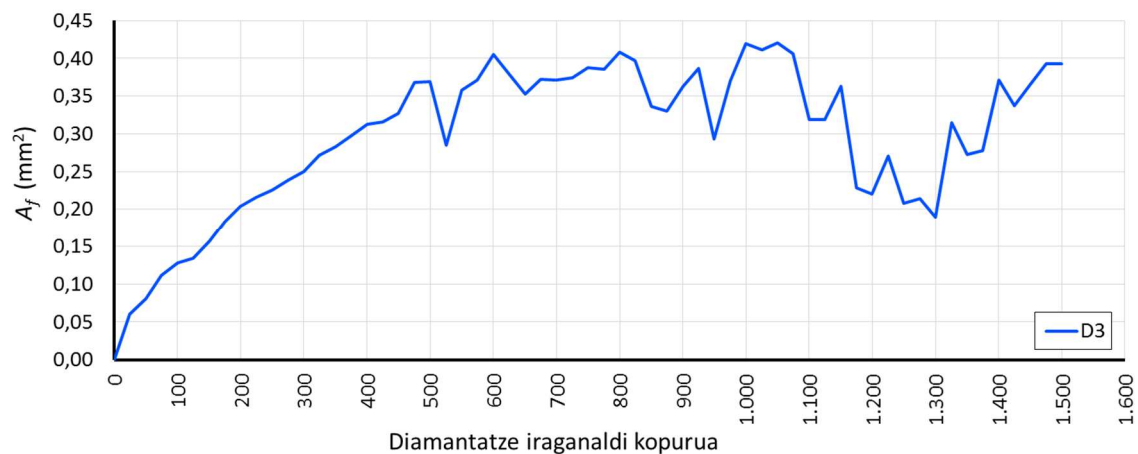
diamantatze edo artezketa potentziarekin; Filho et al.-ek (1999) aurreratu zuten azalerak ez duela eragiten soinu igorpen seinalean.



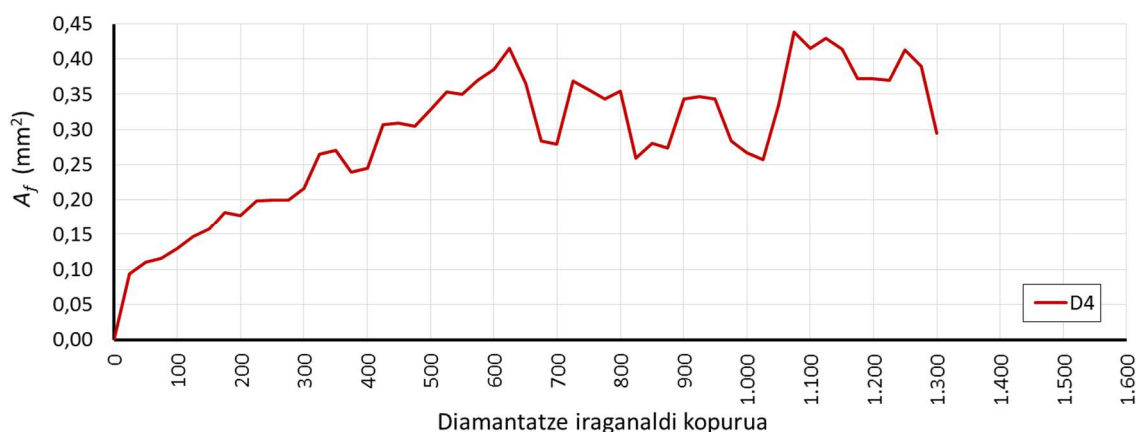
3-32. irudia: D1 diamantagailuaren puntaren higadura azaleraren eboluzioa.



3-33. irudia: D2 diamantagailuaren puntaren higadura azaleraren eboluzioa.



3-34. irudia: D3 diamantagailuaren puntaren higadura azaleraren eboluzioa.

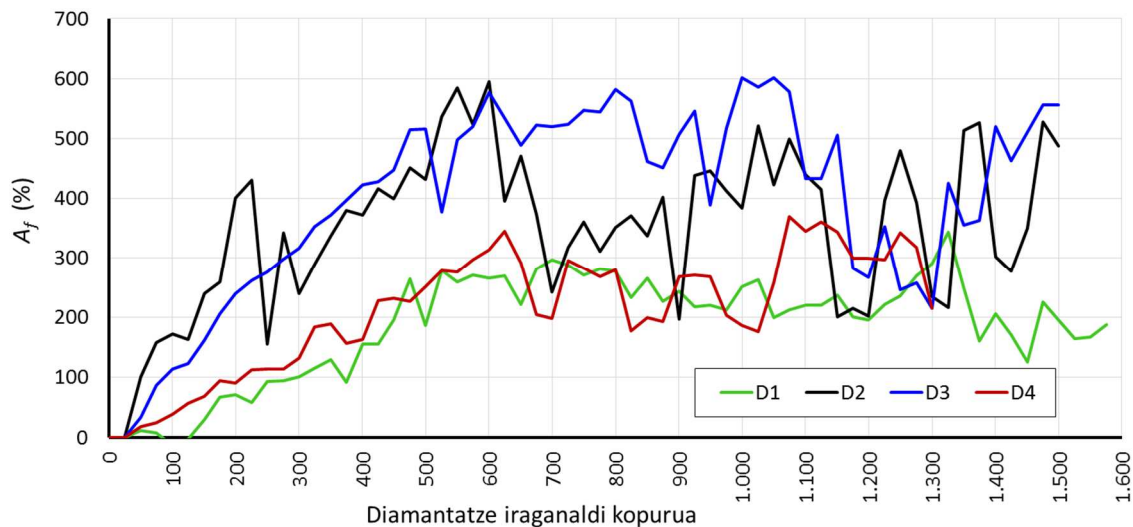


3-35. irudia: D4 diamantagailuaren puntaren higadura azaleraren eboluzioa.

Irudietan ikusten den bezala, diamantagailu guztietan higaduraren eboluzioaren joera bertsua mantentzen da: hasieran, lehen 25 diamantatze iraganaldien ondoren, higadura nabarmen handitzen da, eta, higadura baino, diamantagailuaren puntaren haustura gertatzen da (ikus D1 diamantagailurako eginiko 3-38. irudia). Haustura hori garbi ikusten da D1, D3 eta D4 diamantagailuetan lehen 25 iraganaldien ostean; D2 diamantagailuan, berriz, 75 diamantatze iraganaldiren ondoren areagotzen da nabarmen higadura azalera, seguruena diamantagailuaren geometria eta gainazal akabera eskasak eraginda (ikus 3-1. taula). Geometria oso berezia du diamantagailu horrek, hasieran punta bakarra baitu (nahiko zorrotza), baina, 125-150 iraganalditik aurrera, bata bestearen ondoan jarritako bi puntako diamantagailu gisa ageri da (ikus aurrerago 3-40. irudia).

Mota horretako punta bakarreko diamantagailu berrieekin lan egitean, diamantagailuaren eta harriaren arteko b_d kontaktu luzerak eskuarki balio txikia hartzen du (diamantatze prozesuko txikiena), eta, diamantatze indarrak jasaten dituen azalera ere txikia izanik, haustura gertatzeko aukera handia da (doktoretza tesi honetan, ez da azterketarik egin ez diamantatze indarrak kalkulatzeko, ez eta diamantearen erresistentzia mekanikoa kalkulatzeko ere).

Higadura azaleraren eboluzioa 3-36. irudian ageri da ehunekotan irudikatuta: D1 eta D4 diamantagailuen garapena, batetik, eta D2 eta D3 diamantagailuena, bestetik, oso antzekoak dira beraien artean. 74. orrialdeko lau diamantagailuen hasierako egoeraren goitiko irudiei erreparatuta (3-7., 3-8., 3-9. eta 3-10. irudiak), D1 eta D4 diamantagailuen geometriak ere oso antzerakoak dira, eta, ondorioz, esan daiteke badela loturarik diamantagailuen hasierako geometriaren eta haien higadura eboluzioaren artean.

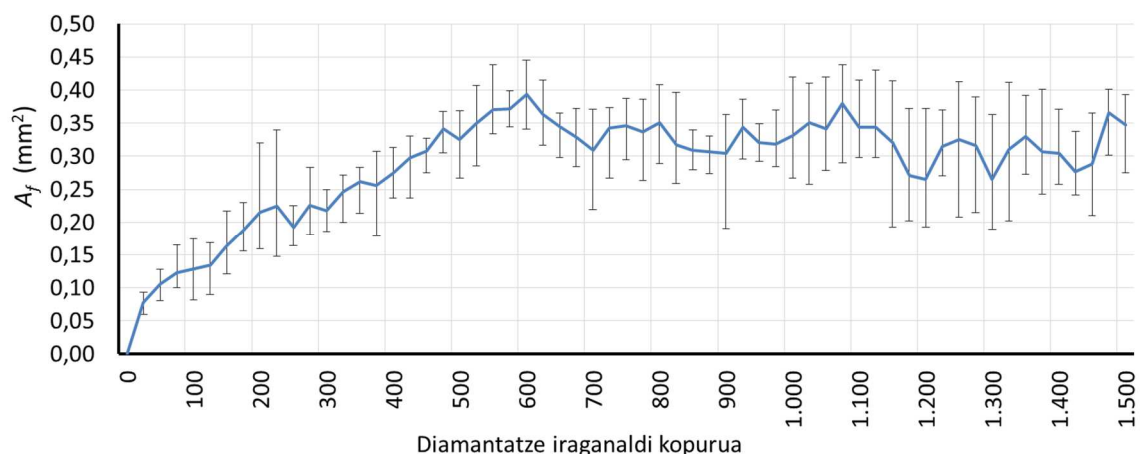


3-36. irudia: D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuen higadura azaleraren portzentajezko handitzea.

D2 eta D3 diamantagailuen portzentajezko higadura areagotzea handiagoa da D1 eta D4 diamantagailuena baino. Bestalde, D2 diamantagailuak, eta neurri txikiagoan D3 diamantagailuak, jasaten dituen higadura azaleraren gorabeherak oso nabariak dira hirugarren fasean zehar, geometriaren uniformetasun ezak, pitzadurak eta gainazal akabera txarrak eraginda; horrek guztiak diamantearen haustura errazten du, eta, ondorioz, kontaktu azalera txikiagotu egiten da.

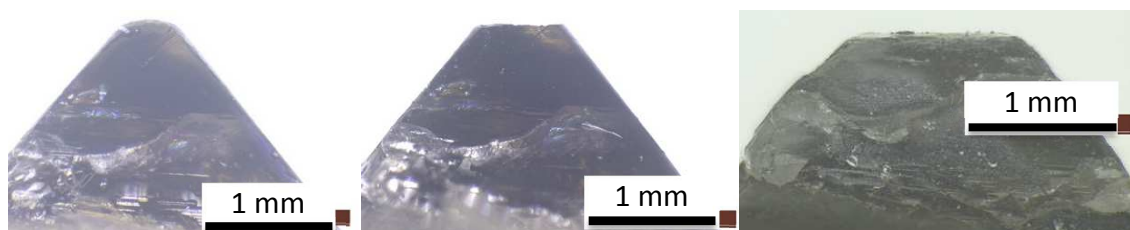
Laburbilduz, ondorengo 3-37. irudian ikus daiteke diamantagailuen batez besteko higadura azaleraren hazkundera ia lineala dela 0 eta 600 diamantatze iraganaldi tartean; D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuekin lortutakoen oso antzekoa (ikus 3-32., 3-33., 3-34. eta 3-35. irudiak). Lehen 600 iraganaldi hauetan, lau diamantagailuen puntan neurtutako higadura azalaren balio maximo eta maximoen arteko batezbesteko diferentzia $0,08 \text{ mm}^2$ da, eta hortik aurrera $0,13 \text{ mm}^2$, haustura mekanismoa nagusi denean eta diamantearen gainazaleko azalera erabat kontroletik kanpo dagoenean.

Lortutako balioen batez besteko aldakortasun koefizientea % 18-koa da (1.500 diamantatze iraganaldiak kontutan hartuta); balio nahiko txikia da, aintzat hartuta diamante bakoitzaren higadura hasierako propietate geometrikoen eta gainazal propietateen arabera garatzen dela. Horrek esan nahi du diamantagailu guztien portaera mekanikoa nahiko antzekoa dela.



3-37. irudia: D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuen batez besteko A_f higadura azaleraren eboluzioa.

Diamantagailu bakoitzak jasandako higaduraren deskribapen laburra eginda, eta D1 diamantagailuari dagokionez, esan daiteke higadura kurba oso uniforme dela prozesu osoan; 500 diamantatze iraganaldi egin ondoren, higadura azalera $0,32 \text{ mm}^2$ -ko balioan mantentzen da, gorabehera batzuekin ($0,27$ eta $0,37 \text{ mm}^2$ tartean 1.200 iraganaldira arte). Ondorengo diamantagailuaren goitiko argazki hauetan (3-38. irudia) ikus daiteke zein izan den diamantagailuaren benetako higadura hasieran, lehen 25 iraganaldiak egin eta gero, eta bukaeran, 1.575 iraganaldiren ostean, hau da, D1 diamantagailuarekin probak egiteari utzitakoan (azken egoera).

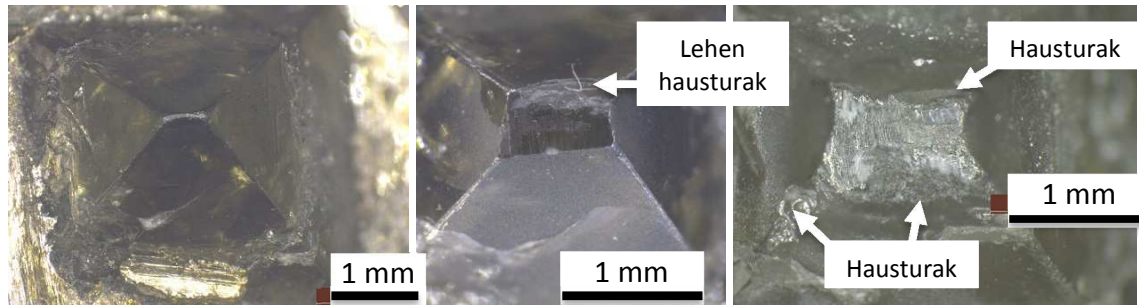


3-38. irudia: D1 diamantagailuaren goitiko irudia hasieran, 25 eta 1.575 diamantatze iraganaldi egin ondoren.

Irudiotan, irudikatuta ez dagoen arren, garbi antzeman daiteke diamantatze sakonera jakin baterako ($a_d=30 \mu\text{m}$) diamantagailuaren eta artezarriaren arteko b_d kontaktu luzera ere handituz doala (aurrerago aztertuko da aldagai horren eboluzioa).

Diamantagailuaren aurretiko irudia aztertuta, hasieran punta nahiko zorrotza izatetik (3-39. irudiaren ezkerreko argazkia) higadura azalera gero eta handiagoa edukitzera pasatzen da; 500 diamantatze iraganaldi burututakoan, azalera nahiko uniformea erakusten du, baina irudiaren goiko aldean (3-39. irudiaren erdiko argazkia) diamante

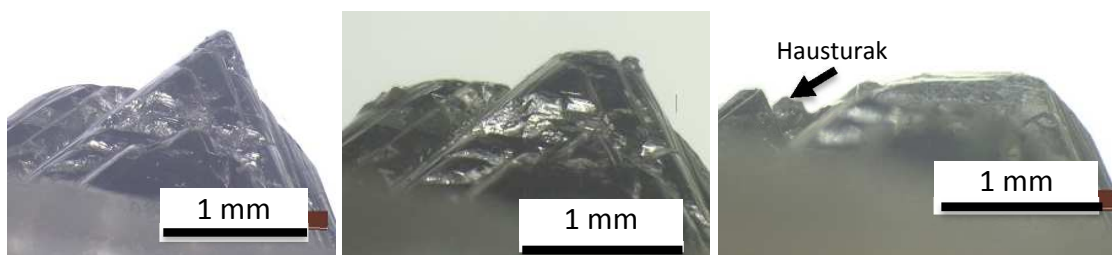
hausturak ikus daitezke. Probak egiteari uztea erabaki den unean (1.575 diamantatze iraganaldi ondoren), haustura dezente gehiago ageri dira kontaktu azaleraren ingurunean (3-39. irudiaren eskuineko argazkia).



3-39. irudia: D1 diamantagailuaren aurretiko irudia hasieran, 500 eta 1.575 diamantatze iraganaldi egin ondoren.

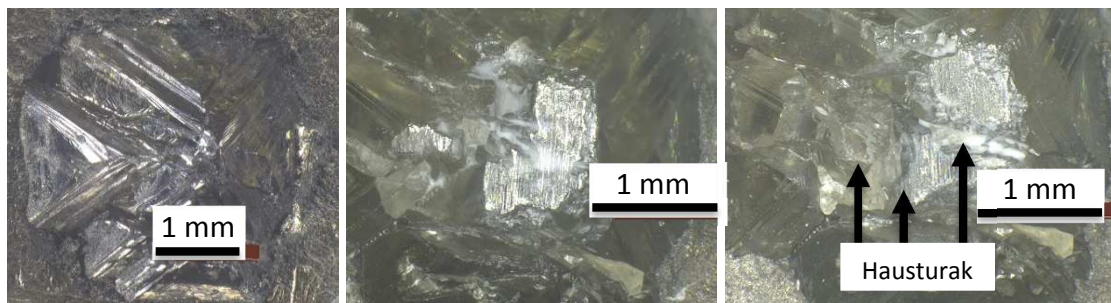
D2 diamantagailuari puntuaziorik handiena eman zaio diamantagailuen gainazal akaberari dagokion sailkapenean (3-1. taula); horrek esan nahi du probatu diren 4 diamantagailuetatik hark duela hauskorra izateko aukerarik handiena, eta, 3-36. irudia ikusiz gero, esan daiteke hipotesi hori berretsi egiten dela, higadura azaleraren portzentajezko hazkunde balio handiena baitu higaduraren bigarren fasean (higadura konstantea), eta hirugarren fasean gorabehera asko agertzen baititu, diamantearen haustura ugarien seinale.

Hasierako 25 eta 1.500 bitarteko diamantagailu iraganaldien osteko goitiko irudiak aztertuta (3-40. irudia), argi ikusten da diamantagailuaren hasierako punta lehen 25 iraganaldien ondoren desagertzen dela, eta hortik dator 3-33. grafikoko hasierako kurbaren hazkundea. Diamantatze iraganaldiak burutzearekin batera, higadura handituz doa, baina ez bakarrik puntan, beraren ezkerreko eremuan ere bai (3-40. irudiaren eskuinaldean), diamantagailuaren diamantatze gaitasuna egoera kontrola ezinean utzita.



3-40. irudia: D2 diamantagailuaren goitiko irudia hasieran, 25 eta 1.575 diamantatze iraganaldi egin ondoren.

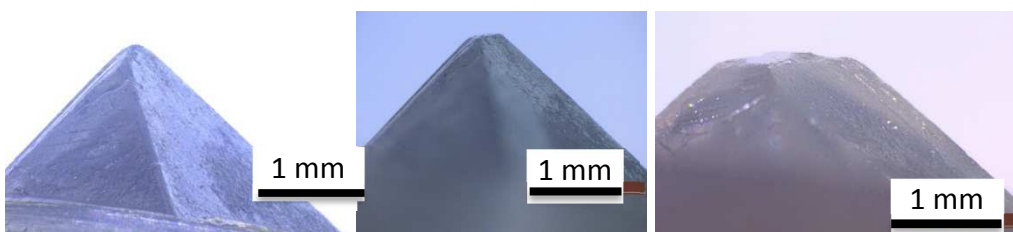
Aurretiko irudiak aztertuta, higadura azalerak D1 diamantagailuarekin lortutakoak baino askoz ere irregularragoak dira, eta antzeman daiteke, halaber, 500 eta 1.575 diamantatze iraganaldi bitartean egin ostean agertutako higadura azalerak oso antzekoak direla, azken kasuan ageri diren hausturak handiagoak izan arren.



3-41. irudia: D2 diamantagailuaren aurretiko irudia hasieran, 500 eta 1.575 diamantatze iraganaldi egin ondoren.

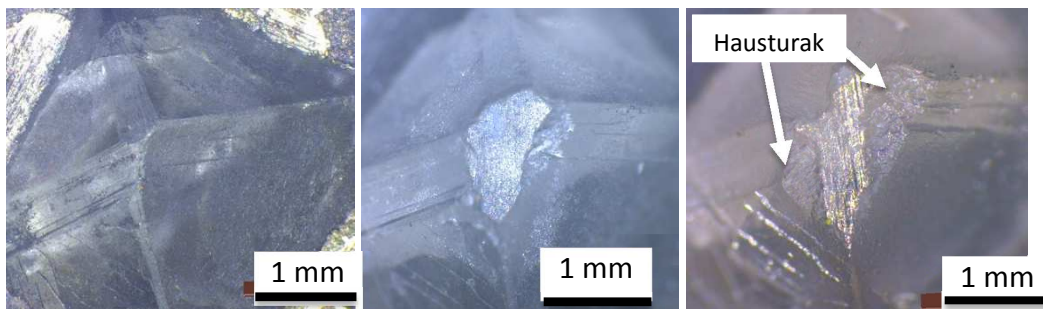
D3 diamantagailuaren higadura eboluzioa oso lineala da, harik eta 600. diamantatze zikloan hausturak hasten diren arte; hortik aurrera, esan daiteke nahiko konstante mantentzen dela, 1.100. diamantatze ziklora arte, non higadura azalera nabarmen txikiagotzen hasten den, bukaera aldera berriz hasten bada ere nabarmen hazten. Diamantagailuaren geometria oso erregularra izan arren, diamantagailu honen kalitateak ez dirudi D1 diamantagailuarenaren berdina; izan ere, irudietan hauskorragoa dirudi (3-7. eta 3-9. irudiak), eta, horregatik, gainazal akaberaren arabera eginiko sailkapenean (3-1. taula) 5-eko puntuazioa jarri zaio.

3-40. irudian, D3 diamantagailuaren hasierako goitiko irudiak ikus daitezke, 25 eta 1.500. diamantatze ziklo egin ondoren.



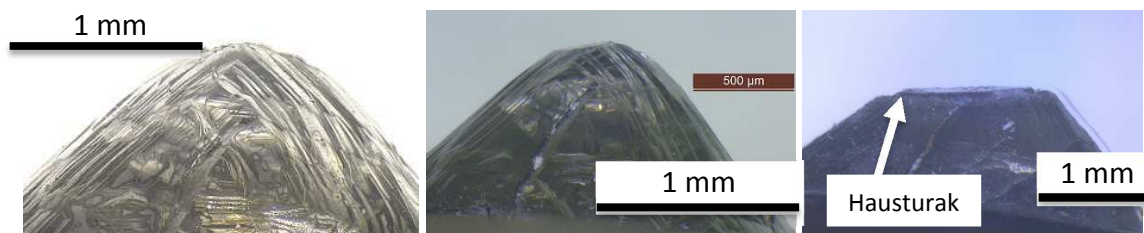
3-42. irudia: D3 diamantagailuaren goitiko irudiak hasieran, 25 eta 1.500 diamantatze iraganaldi egin ondoren.

Aurretiko irudietan, ikus daiteke 1.500 diamantatze iraganaldi egin ondoren material haustura garrantzitsuak ageri direla higadura azalaren alboetan (3-43. irudia).

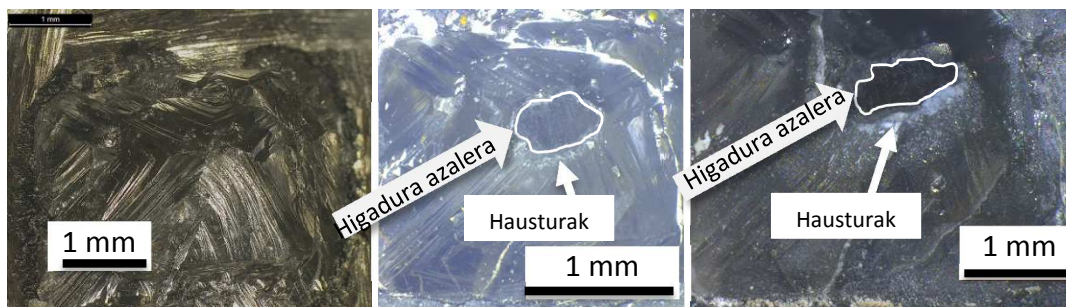


3-43. irudia: D3 diamantagailuaren aurretiko irudia hasieran, 600 eta 1.500 diamantatze iraganaldi egin ondoren.

Azkenik, D4 diamantagailuaren higadurari buruz esan behar da higadura eboluzioa D1 diamantagailuarenaren oso antzeko izan dela, batez ere bigarren fasean, hau da, higaduraren hazkunde konstantea gertatzen den tartean (625. diamantatze ziklora iritsi bitartean). Hortik aurrera, kontaktu azalerak D1-enak baino gorabehera gehiago jasaten ditu, agian diamantagailu honen gainazal akabera eskasa delako eta gainazalean pitzadura ugari dituelako. Beste diamantagailuekin bezala, goitiko eta aurretiko irudiak azaltzen dira jarraian.



3-44. irudia: D4 diamantagailuaren goitiko irudia hasieran, 25 eta 1.300 diamantatze iraganaldi egin ondoren.



3-45. irudia: D4 diamantagailuaren aurretiko irudia hasieran, 625 eta 1.300 diamantatze iraganaldi egin ondoren.

Atal honekin bukatzeko, egiaztatuko da 3.2.1. atalean diamantagailuen gainazal akaberaren arabera diamantagailu bakoitzaren biziraupenari buruz eginiko hipotesia zuzena den ala ez. Orduan genioen D2 diamantagailuak zuela hausturak jasateko eta

erabilpenaren bukaerara azkarren iristeko aukerarik handiena, D4, D3 eta D1 diamantagailuen aurretik, ordena horretan.

3-9. taulan, lehen sailkapen hori diamantagailuek jasandako higaduraren eboluzioarekin alderatu da, aldagai hauek kontuan hartuta:

- Higadura azalera handiena: D2 eta D3 diamantagailuek jasan duten higadura maila handiena (3-33. eta 3-34. irudiak).
- Higadura eboluzioaren 2. fasean uniformetasun eza: aldagai honek diamantagailuaren egonkortasuna neurtzen du, nolabait. Dugarik gabe, D2 diamantagailuak agertzen du irregulartasun handiena.
- Higadura eboluzioaren 3. fasean gorabeheratsuena: aurreko aldagaiarekin bat datorrela esan daiteke, baina fase honetan material hausturak gertatzeko arriskua neurtzen da batez ere. Berrito ere D2 diamantagailua da lehena sailkapenean.

3-9. taula: Diamantagailuen gainazal akabera.

	Diamantagailua			
Haustura arriskua eta gainazal akabera maila (3-1. taula)	D2 (125)	D4 (75)	D3 (5)	D1 (1)
Higadura azalera handiena 2. fasearen amaieran (mm ²)	D2 (0,438)	D4 (0,415)	D3 (0,369)	D1 (0,339)
2. higadura fasearen uniformetasun eza	D2	D1	D4	D3
3. higadura fasean gorabeheratsuena	D2	D3	D4	D1

Emaitzak ikusita, esan daiteke hipotesia nahiko ondo bete dela, batez ere D1 eta D2 diamantagailuen emaitzei dagokienez. D4 eta D3 diamantagailuak, berriz, tarteko balioetan ibili dira, baina esan beharra dago D4-rekin D3-rekin baino emaitza hobekak lortu direla. D3 diamantagailuaren higadura irudiak ikusita, baliteke emaitzok aurrez aipatutako kalitate ezaren ondorio izatea, lehen sailkapena egiterakoan ez baita kontuan hartu.

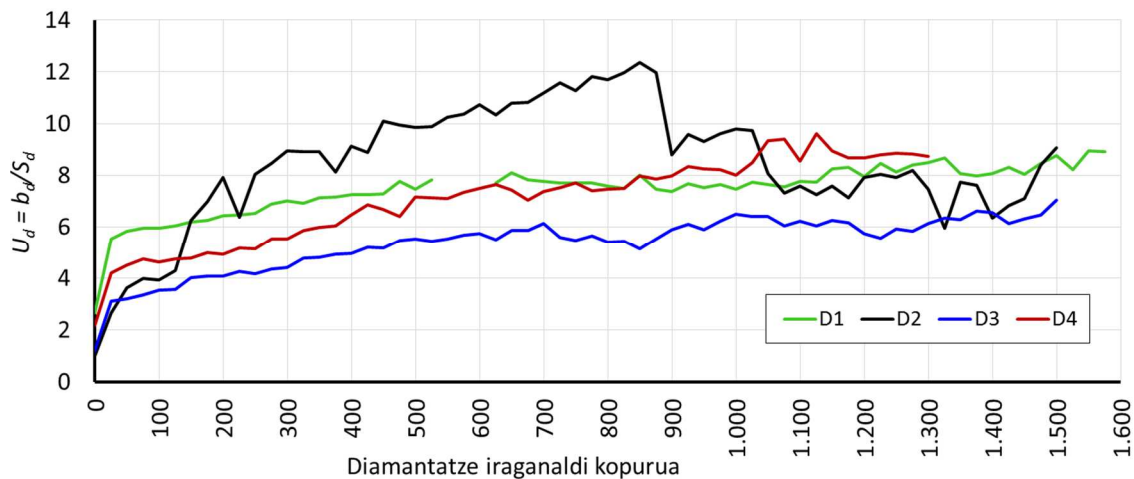
Besterik gabe, atal hau itxi eta jarraian b_d aldagairako diamantagailuetan neurtutako emaitzak aztertuko dira.

3.3.3.2. *Diamantagailuaren eta harriaren arteko b_d kontaktu luzera*

Diamantagailuaren eta harriaren arteko b_d kontaktu luzera a_d diamantatze sakonerari dagokion diamantagailuaren eta harriaren arteko kontaktu zabalera maximoa da, 2.2.4.1. ataleko 2-14. irudian ikus daitekeen bezala (22. orrialdea). Horrez gain, b_d -ren balioa handiagoa edo txikiagoa izango da diamantagailuaren puntaren geometriaren arabera.

Aurreko ataleko irudiak aztertuta, diamantagailuen goitiko ikuspegitik ateratakoak, segituan nabari daiteke diamantagailua higatuz doan neurrian b_d -ren balioa gero eta handiagoa dela, diamantagailuaren forma piramidal edo konikoaren eraginez (forma teorikoak). Atal honetan aztertzen da zer nolako garapena izan duten probatutako lau diamantagailuetan b_d -k eta, ondorioz, U_d -k (U_d gainezarpen ratioa, diamantatze prozesuan aldagai oso garrantzitsua, b_d balioaren menpe dago).

3-46. irudian U_d gainezarpen ratioaren eboluzioa irudikatu da erabilitako lau diamantagailuentzat; izan ere, artezariaren bira bakoitzeko diamantagailuaren S_d aitzinamendu abiadura konstanterako U_d eta b_d aldagaien eboluzioa berdina baita.

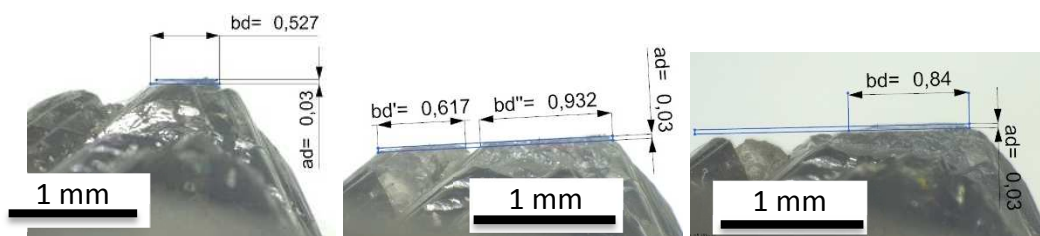


3-46. irudia: U_d gainezarpen ratioaren eboluzioa

Diamantagailuaren puntako azalerarekin gertatzen den bezala, lehen diamantatze zikloen ondorioz puntaren haustura gertatzen da, eta, hala, b_d balioa ere nabarmen igotzen da. Hortik aurrera, b_d edo U_d -ren hazkundera txikiagoa da, eta oso uniformea diamantagailu guztien kasuan, D2-n izan ezik. Entseguetako balio guztiak hartuta, batez besteko aldakortasun koefizientea % 23-koa da, A_f gainazal azalerarako neurtutakoa baino zertxobait handiagoa (% 18). Lehen 900 iraganaldiak soilik kontutan hartuta, ordea, % 27-

koa da aldakortasun koefizientea, eta D1, D3 eta D4 diamantagailuak baino ez aintzat hartuta % 20-koa. Horrek esan nahi du D2 diamantagailuaren higadura handiagoa dela besteena baino, eta aldaketa nabariak jasan dituela.

D2 diamantearen higaduraren azterketa azkarra eginda, ikus daiteke momentu jakin batetik aurrera punta nagusiaren ezker aldeko beste puntatxoak ere talka egiten duela artezariarekin, eta b_d' eta b_d'' zabalerak batu egiten direla (3-47. irudi erdiko argazkia). Halere, geometria oso irregularreko puntatxo horrek haustura garrantzitsuak jasaten ditu 900. diamantatze iraganalditik aurrera, eta, ondorioz, b_d balioa berriro ere jaitsi eta gorabehera nabariak jasaten ditu probaren bukaerara iritsi artean; 3-47. irudian, eskuinaldean, 1.400. zikloaren ondoren eginiko argazkia erakusten da.



3-47. irudia: D2 diamantagailuaren b_d aldagaiaren balioak 75, 800 eta 1400 diamantatze zikloen ondoren.

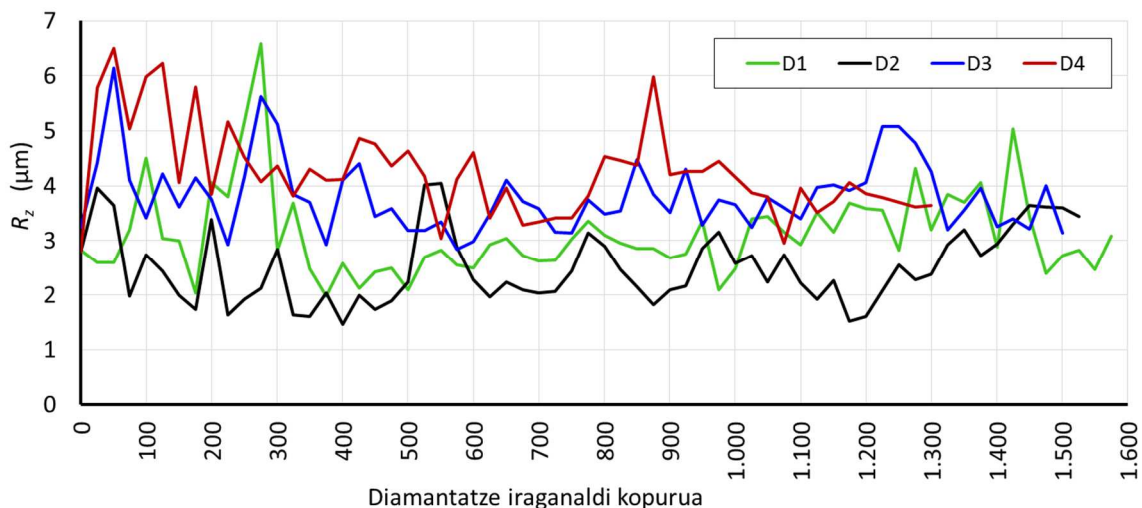
3-46. irudiko grafikoari erreparatuta, uler daiteke, era berean, U_d -ren balioak daudela 100. diamantatze zikloan 3,5 eta 6 artean eta probaren bukaeran 7 eta 9 artean, hasierako balioak 1 eta 3 artekoak izanik. Horrek esan nahi du diamantatze baldintzak asko aldatu direla hasieratik bukaerara, diamantagailuek jasandako higaduraren ondorioz, eta aldaketok artezketa prozesuan, derrigorrez, nolabaiteko eragina izan behar dutela; horixe egingo da aurrerago: higadura horrek arteztutako piezan izandako eragina aztertu. Rowe-k (2009) dion bezala, U_d balio oso handiekin lan egiteak asko handitzen du diamantagailuaren eta harriko aleen arteko interakzio kopurua, eta, diamantagailuaren beraren higadura azkartzeaz gain, ale urratzaileak ere kaltetzen ditu, gainazaleko erredurak izateko arriskua areagotuta.

3.3.3.3. Piezaren R_z gainazal akabera

Diamantatze prozesuan artezariaren gainazalean sortutako hariaren R_t sakonera hiru era, formula edo metodo erabiliz kalkulatu da teorikoki 3.2.5. atalean (ikusi 3-6. taula), eta

baieztatu da, probatutako lau diamantagailuen hasierako egoera kontuan hartuta, D1-ek uzten duela zimurtasun baliorik txikiena artezariaren gainazalean, ondoren D4-k eta D3-k eta, azkenik, D2-k; izan ere, zimurtasun balio txikia lotuta dago b_d eta, ondorioz, U_d aldagaien balio handiarekin.

Proba esperimentaletan, 25 iraganaldiko diamantatze ziklo bakoitzaren ondoren artezketa ziklo bat gauzatu da, piezaren gainazaleko R_a eta R_z zimurtasun balioak neurtzeko. Artezariaren gainazaleko R_t emaitzekin konparatzeko, R_z balioak hartu dira aintzat, biek ere funtsean gauza bera neurtzen baitute: zimurtasunaren tontorraren eta haranaren arteko balioa (lehenak balio maximo absolutua eta bigarrenak batezbestekoa). Proba guztiak burututakoan, ondorengo grafikoa osatu da (3-48. irudia), non balio bakoitza 5 neurketaren batezbestekoa den.

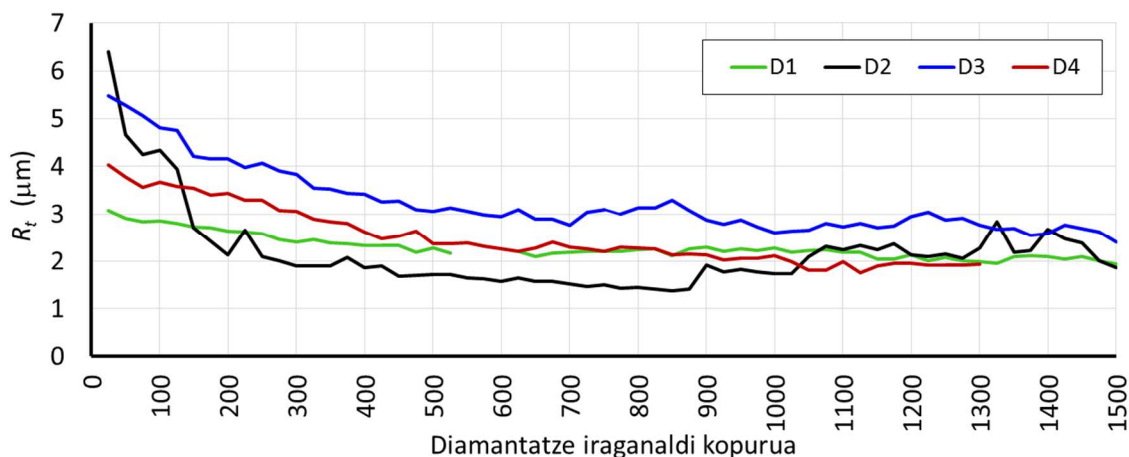


3-48. irudia: Piezaren gainazalean neurtutako R_z gainazal zimurtasun balioak.

Lehenik eta behin, esan behar da hasierako fase bat bereiz daitekeela (0-500 diamantatze iraganaldi artean), non R_z gainazal zimurtasunaren balioak ez diren egonkorregiak. Lehen fase horretan, diamantagailuen b_d aldagai geometrikoak aldaketa nabariak jasaten dituela egiaztatu da 3.3.3.2. atalean, batez ere D2 diamantagailuarenak, eta horrek zuzenean eragiten du zimurtasunaren balioan. Aipatu fasean, batez besteko aldakortasun koefizientea % 36-koa da. Erdialdean nolabaiteko anplitude murrizketa suma daiteke, non R_z -ren balioak 2 eta 5 μm artean dauden, % 22-ko aldakortasun koefizientearekin (ikusi 3-48. eta 3-50. irudiak), baina bukaera aldera zertxobait handiagoak dira berriz ere,

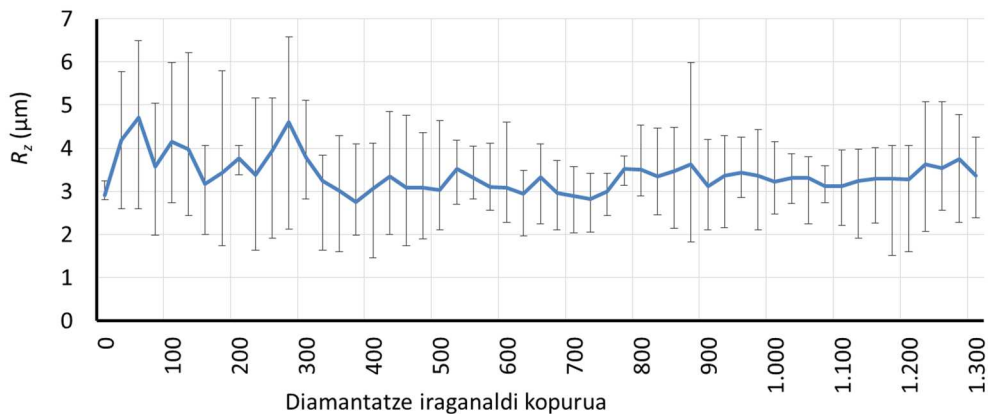
diamantagailuaren puntan sortutako haustura ugarien ondorioz, % 28ko aldakortasun koefizientearekin.

Bestalde, diamantatze ostean artezarriaren gainazalean lortutako hariaren R_t sakoneraren kurba eta piezaren gainazalean neurtutako R_t zimurtasunak konparatzeko, b_d -ren datuekin R_t kurba teorikoa sortu da 2-1. ekuazioa kontutan hartuta (ikus 3-49. Irudia). Bi grafikoak aztertuta, (3-48. eta 3-49. irudiak non 0-25 tarteko balioak kendu diren, balio handiagoa dutelako eta grafikoaren irakurketa garbia oztopatzen dutelako), esan daiteke biek ere badutela nolabaiteko antzekotasuna bai joeran, baita balioen anplitudean. Ondorengo grafikoetan (3-50. eta 3-51. irudiak) R_t eta R_z aldagaien eboluzioa irudikatzen da berriro ere, batez besteko balioa eta, neurketa bakoitzeko dispersioak jasota, bi grafikoen arteko antzekotasuna garbiago ikusteko.

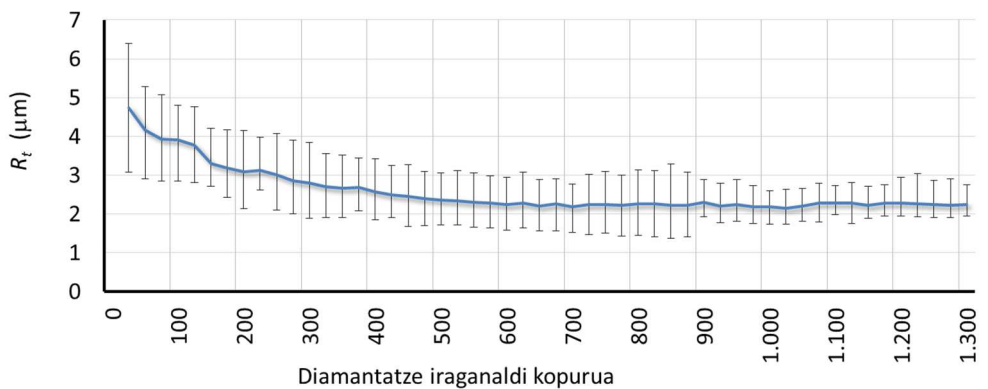


3-49. irudia: Diamantatze ostean artezarriaren gainazalean lortutako hariaren R_t sakoneraren kurba teorikoa.

Emaitza hauek ikusita, esan daiteke 500 iraganaldi inguruan gertatzen dela R_z kurbaren nolabaiteko egonkortasun fasea baina, etengabeko gorabeherak tarteko, oso zaila da zehaztea non gertatzen den aldaketa hori diamante bakoitzean. Beraz, esan daiteke piezaren gainazal zimurtasunaren eboluzioak ez duela balio diamantagailuaren biziraupenaren amaiera zehazteko.



3-50. irudia: Piezaren gainazalean neurtutako R_z gainazal zimurtasunaren batez besteko balioa.



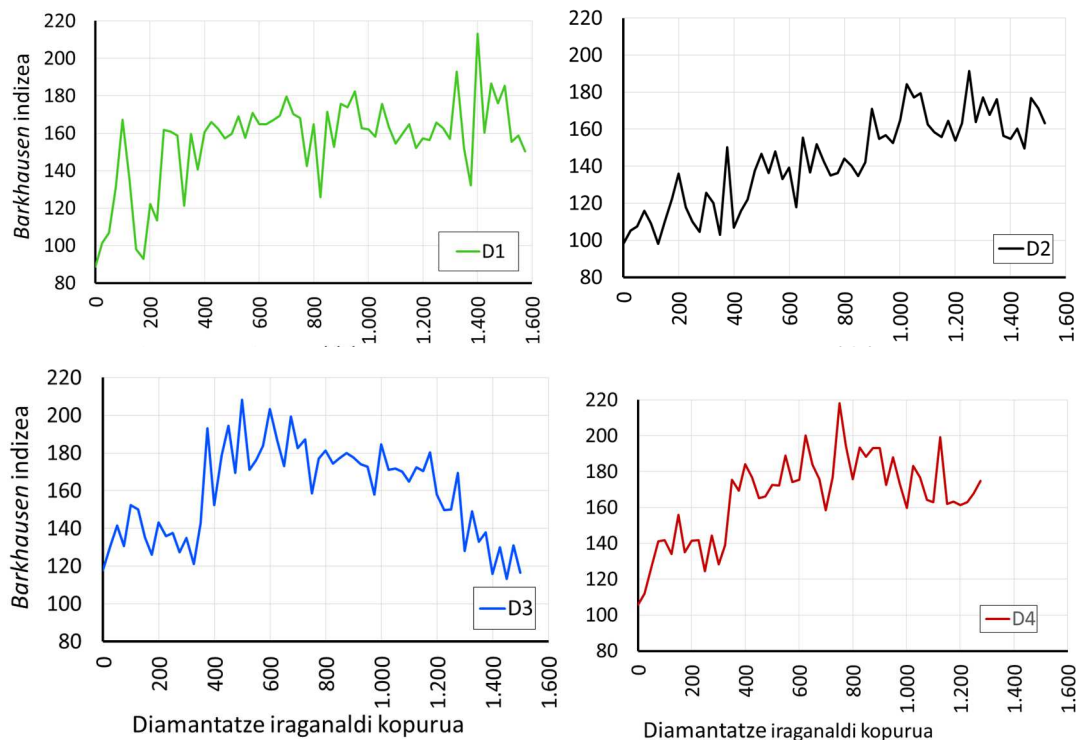
3-51. irudia: Artezarriaren gainazaleko hariaren R_t sakoneraren batez besteko balioa.

3.3.3.4. Piezaren gainazaleko Barkhausen zarata magnetikoa

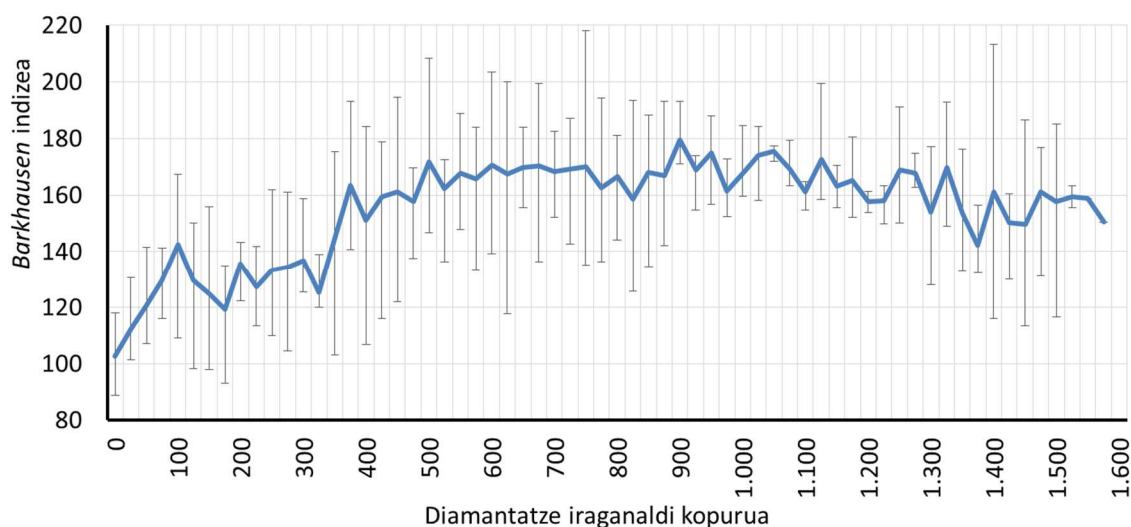
Aurrez 2.5. atalean aipatu bezala, *Barkhausen* metodoa ezaguna izan arren piezaren gainazaleko tentsio aldaketarik gertatu den antzemateko, probetan gorabehera handiak nabaritu dira piezaren gainazalean eginiko 8 neurketen artean, batez beste % 23-ko aldakortasun koefizientearekin; horrek esan nahi du kanpoko beste seinale magnetiko batzuek eragin dutela neurketan, edo piezaren gainazalak ez duela aldaketa nabarmenik jasan tentsio aldetik, eta, hortaz, ez dela kalte termikorik espero. Halere, lortutako *Barkhausen* zarata magnetikoaren eboluzioa aztertuta (3-52. eta 3-53. irudiak) ondokoa uler daiteke.

Diamantagailu guztiekin eginiko probetan, zarata magnetikoaren maila apur bat igotzen da, eta, beraz, piezaren gainazaleko tentsioek aldaketaren bat jasaten dutela esan daiteke (3-52. irudian, 8 neurketaren batez besteko balioak jaso dira). D3 eta D4 diamantagailuen kasuan, 100-120 balioan hasi eta 180 ingurura bitarte igotzen da (zenbait unetan, 220-ra

ere bai), baina gero berdin geratu edo jaitsi egiten da (D3-ren kasuan nabarmen). D1-en kasuan, 300 diamantatze iraganaldiren ostean, 160 balioaren inguruan egonkoritu eta hortxe geratzen da proba bukatu arte.



3-52. irudia: Piezen gainazaleko Barkhausen zarata magnetikoaren neurketa D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuekin.



3-53. irudia: 4 piezaren gainazaleko Barkhausen zarata magnetikoaren batezbesteko balioa.

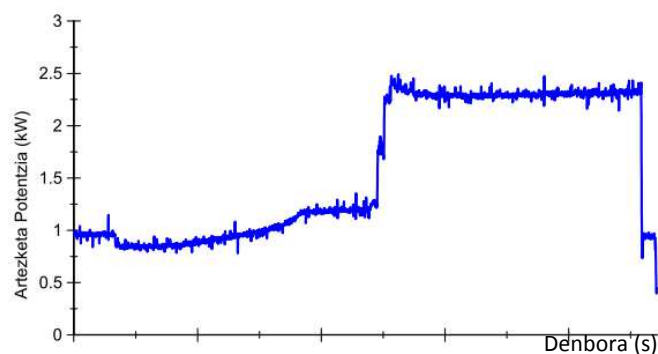
Aurrez esan bezala, *Barkhausen* metodoaren deskribapena eskaini denean, metodo horrekin lortutako emaitzak kualitatiboak dira, ezin baita jakin zein fenomenok eragin duen gorputzean sortutako eremu magnetikoaren aldaketa: gogortasun aldaketa, fase aldaketa,

hondar tentsioak, etab. Azterketa zehatzagoak egiteko, badira beste metodo batzuk, X izpi bidezko difrakzio teknika edo ekorketako mikroskopia elektronikoa, besteak beste. Horiek, baina, garestiak dira, denbora gehiago behar izaten dute azterketa egiteko eta metodo suntsitzaileak dira; lan honetako entseguetan, entsegu osoan pieza ezin zen suntsitu, beraren gainazaleko ezaugarrien kurba lortu ahal izateko.

Piezaren gainazaleko 8 puntutan neurtu da *Barkhausen* indizea, eta, kasu batzuetan, maximoen eta minimoen arteko aldeak % 43-ko diferentzia eman du batez besteko balioari dagokionez; horrenbestez, ezin da esan emaitza horiek erreferentzia moduan erabil daitezkeenik diamantagailuaren higaduraren adierazle gisa. Halere, lagungarriak izan daitezke diamantagailuen biziraupenaren amaiera zehazteko orduan.

3.3.3.5. Artezketa e_c energia espezifikoa

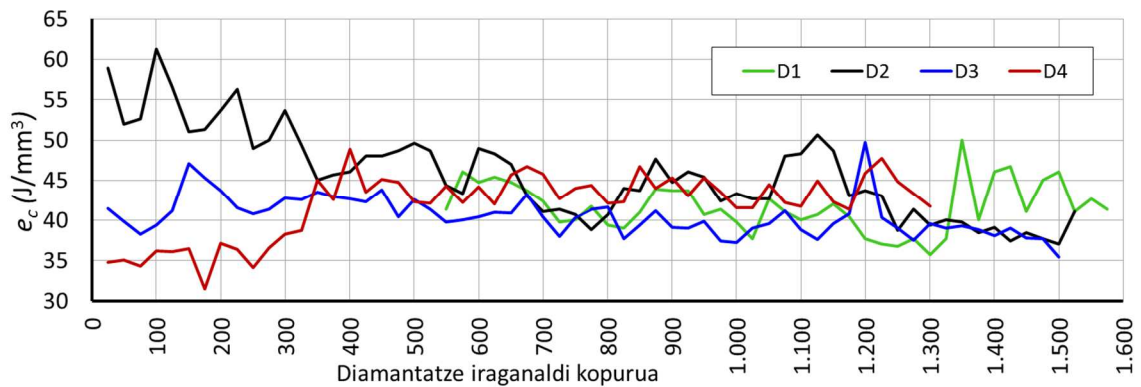
Artezketa zikloetan, potentzia seinalea jaso da (3-54. irudia) eta balio maximoarekin artezketa e_c energia espezifikoa kalkulatu da. 25 iraganaldiko diamantatze ziklo bakoitzaren ostean, artezketa ziklo bakarra burutu da. Diamantatze zikloetan gertatu den bezala (hurrengo atalean), hemen ere arazoa izan da potentzia seinalea eskuratzeko, eta, ondorioz, D1 diamantagailurako ez dago 0-500 tarteko informaziorik.



3-54. irudia: Artezketa prozesuan jasotako artezarriaren buruaren potentzia kontsumoa artezketa ziklo batean (seinale gordina).

Hasieran, garbi ikusten da lehen artezketa zikloetan neurtutako energia espezifikoa desberdina dela D2, D3 eta D4 diamantagailuetarako (3-55. irudia): D2 balio handiekin hasten da (55-60 J/mm³ tartean), eta 600. diamantatze zikloari dagokion neurketan egonkortu egiten da, 45 J/mm³ balioaren inguruan; D3 antzera mantentze da prozesu osoan 40-45 J/mm³ tartean; eta D4 balio txikiagotik hasi (35 J/mm³) eta, 400. diamantatze

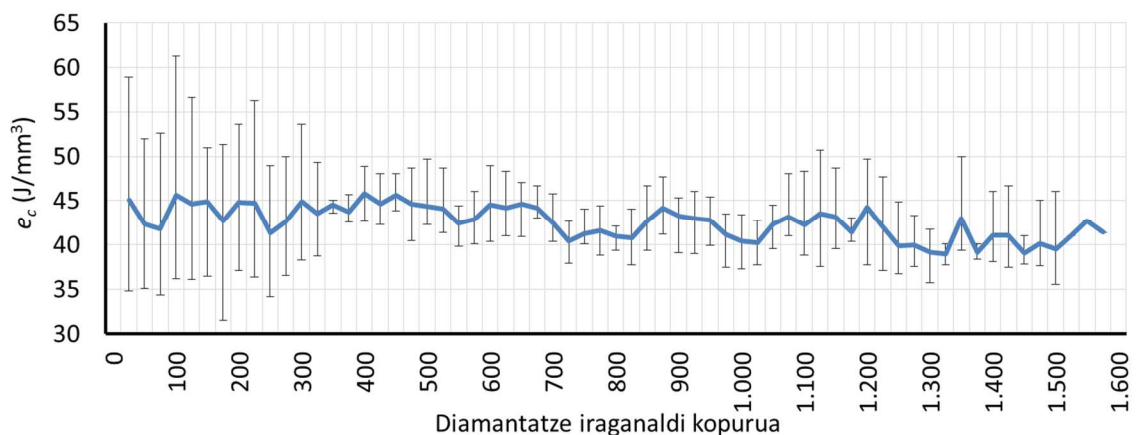
ziklo inguruan, 45 J/mm^3 balioan egonkortzen da. D1 diamantagailuarekin lortutako emaitzak, 500. iraganalditik aurrerakoak badira ere, $40\text{--}45 \text{ J/mm}^3$ tartean daude.



3-55. irudia: D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuekin neurtutako artezketako energia espezifikokoaren eboluzioa.

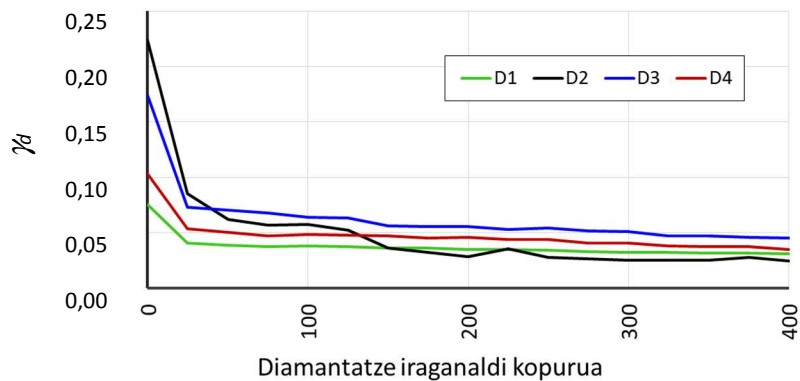
Irudi horrek R_z gainazal zimurtasunerako lortutako kurbaren tankera bai dauka (3-48. grafika). Lehen fasean (0–350 balioen artean) diamantagailuekin lortutako emaitzetan dispersio handia dago, % 21-eko aldakortasun koefizientearekin. Lehen diamantatze zikloen ondoren jasaten dituzte diamanteek geometria aldaketa nabariak, diamantearen puntaren haustura, kasurako; diamantearen hasierako geometriaren arabera, artezkarriaren gainazalean utzitako R_t gainazal sakonera desberdina izango da.

Ondoren, energia espezifikokoaren kurbaren aldakortasun koefizientea txikiagotu egiten da (% 8); horrek esan nahi du diamante bakoitzak jasandako higadura desberdina izanda ere, diamantagailu guztien lan-baldintzak oso bertsuak bihurtzen direla.



3-56. irudia: 4 probatan neurtutako artezketako energia espezifikokoaren batez besteko balioa eta desbideraketa estandarra.

Energia espezifikoaren kurbaren lehen fase horretan gertatzen diren desberdintasunak (ikus 3-55. irudia) diamantagailuen zorrotasun balioekin justifikatu daitezke neurri batean. 3-57 irudian hasierako diamantatze zikloetan diamantagailuek duten γ_d zorrotasun maila adierazi da, non D2-k duen hasera batetan balio handiena, eta jarraian D3, D4 eta D1-ek. 3.2. atalean azaldu den bezala kamustutako erremintekin (zorrotasun gutxikoa) lortutako artezketa indarrak txikiagoak dira orokorrean (Chen, 1995).



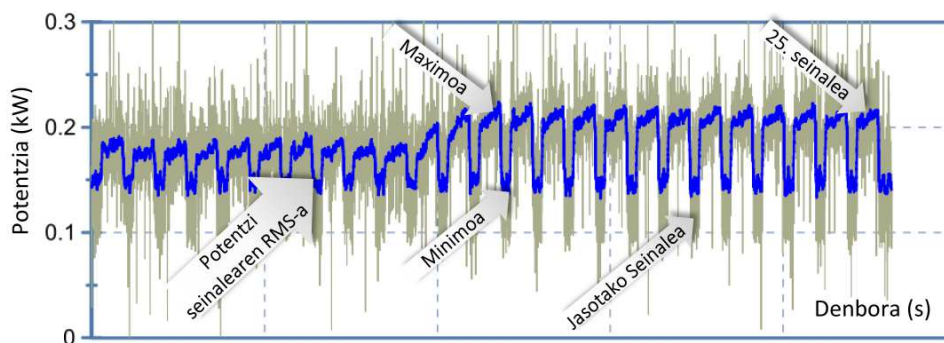
3-57. irudia: Diamantagailuen zorrotasuna lehen 400 diamantatze zikloetan.

Azken ondorio bezala, esan daiteke artezketa prozesuko potentzia kurbek ez diruditela egokienak diamantearen higadurari buruzko informazioa jasotzeko.

3.3.3.6. P_d diamantatze potentzia

Diamantatze eta artezketa prozesuetan jasotako seinaleak aztertzen hasteko, diamantatze iraganaldietan neurtutako artezarri buruaren potentzia kontsumoa aztertzen da atal honetan; potentziaren balioak erlatiboak dira, hau da, neurtutako balioari hutsean neurtutako balioa kendu behar zaio. Ziklo bakoitzeko eginiko 25 iraganaldietatik, 25. iraganaldiko balioa besterik ez da hartu aintzat potentzia seinalearen eboluzioa irudikatzen (3-58. irudia). Ondoko irudian, UPC-FR potentzia kontsumo neurgailua erabiliz lortutako kurba azaltzen da: kolore grisez potentzia seinalea gordina eta urdinez *RMS* balio estatistikoa.

3-59. irudian, diamantagailu bakoitzarekin neurtutako diamantatze potentzia maximoak ageri dira. Esan beharra dago D1 diamantagailuarekin proba egiteko orduan, arazo batzuk izan direla potentziari buruzko datuak eskuratzeko, beraz, 525. iraganalditik aurrera baino ez dira jaso. Halere, kurba hori baliozkoa da ondorengo ondorioak ere ateratzeko.

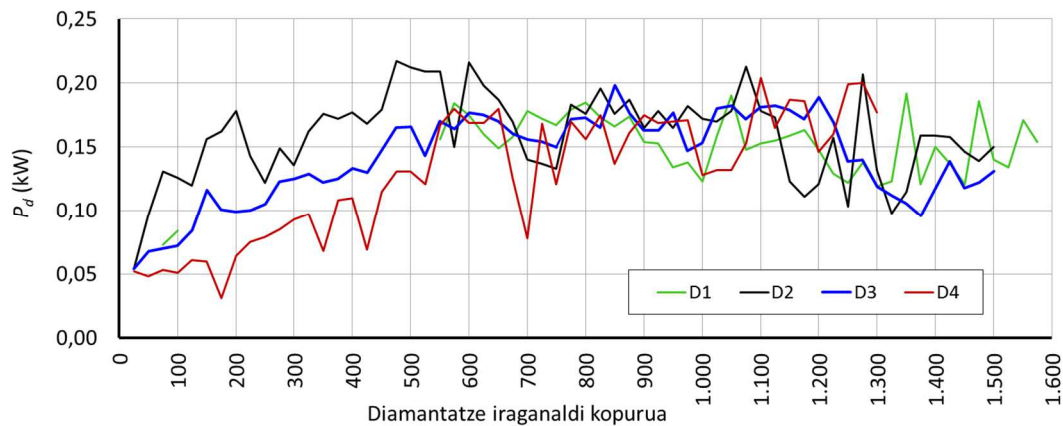


3-58. irudia: Diamantatze prozesuan jasotako artezarriaren buruaren potentzia kontsumoa (seinale gordina grisez eta RMS balioa urdinez) 25 diamantatze iraganaldiko ziklo baterako.

Lau diamantagailuei dagozkien potentzia kurbek joera bera dute kasu guztietan: 0,05 kW-eko balioan hasi eta handituz joaten da, eta 500-700 diamantatze ziklo bitartean 0,15-0,20 kW-eko balio inguruan egonkortzen da entsegua bukatu artean; zehazki, D1 diamantagailuarekin 0,155 kW-eko batez besteko balioa neurtu da, eta gainerakoekin, berriz, 0,16 kW-ekoa. Horrez gain, kalkulaturako aldakortasun koefizientea ere oso antzekoa da kasu guztietan: % 14, % 19, % 17 eta % 17 D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuetarako, hurrenez hurren.

D2-ren kasuan, hasierako hazkundera nabarmenagoa da dudarik gabe, eta ez da gainerako kasuetan bezain lineala. Joera hori 3-46. irudiko b_d edo U_d aldagaiaren eboluzioarekin bat datorrela esan daiteke; hau da, zenbat eta b_d balio handiagoa (diamantatze sakonera konstante mantenduta), diamantagailuaren eta artezarriaren arteko talkaren kontaktu azalera orduan eta handiagoa (diamanteari goitik begiratuta), eta, beraz, potentzia kontsumoa ere handiagoa izango da. D3 eta D4 diamantagailuekin, ordea, ez da gauza bera gertatzen, D4-ren neurtutako b_d aldagaia handiagoa izanik potentzia txikiagoa delako. Baina A_f kontaktu azaleraren kurbak berrikusiz gero, egiazta daiteke diamantatze potentziaren itxura berekoak direla, eta, hemen bai, D2-ren kurba besteen gainetik dago, D3-ren kurba eta D4-rena jarraian dituelarik.

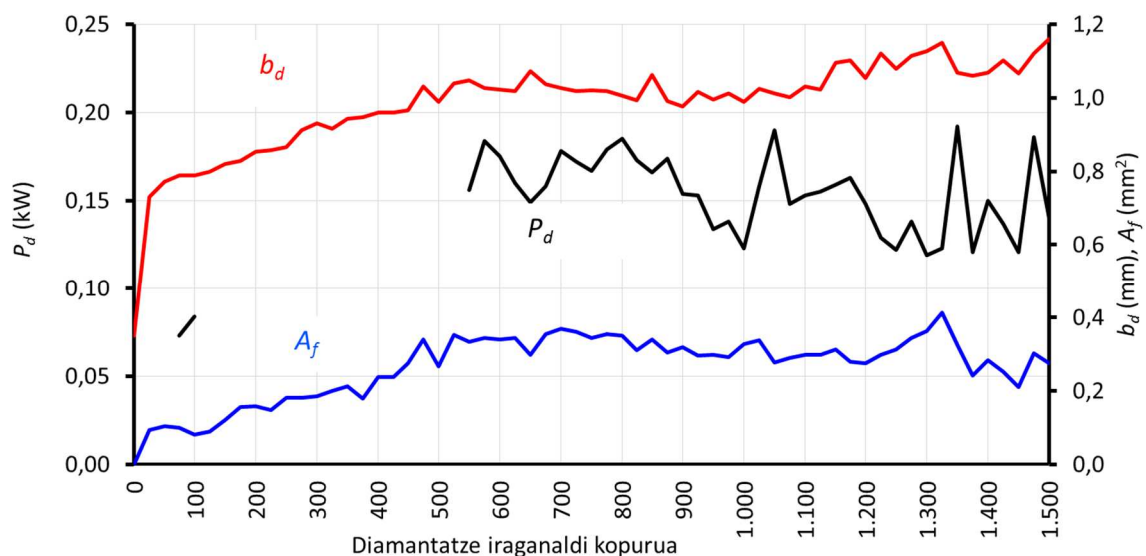
Hortaz, esan daiteke diamantatze potentziak baduela harremanik bai b_d parametroarekin edo diamantagailuaren eta artezarriaren arteko talka azalerarekin, bai bien arteko aurretiko A_f kontaktu azalerarekin; halere, zaila da zehaztea bakoitzak zein neurritan eragin dezakeen potentziaren balioan



3-59. irudia: D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuekin neurtutako potentzia maximoaren eboluzioa.

Ondoko irudiek diamantagailu bakoitzerako potentzia, diamantearen aurretiko A_f kontaktu azalera eta b_d kontaktu luzera kurben eboluzioak biltzen dituzte, hiru aldagaion arteko harremana hobeto ikusi ahal izateko.

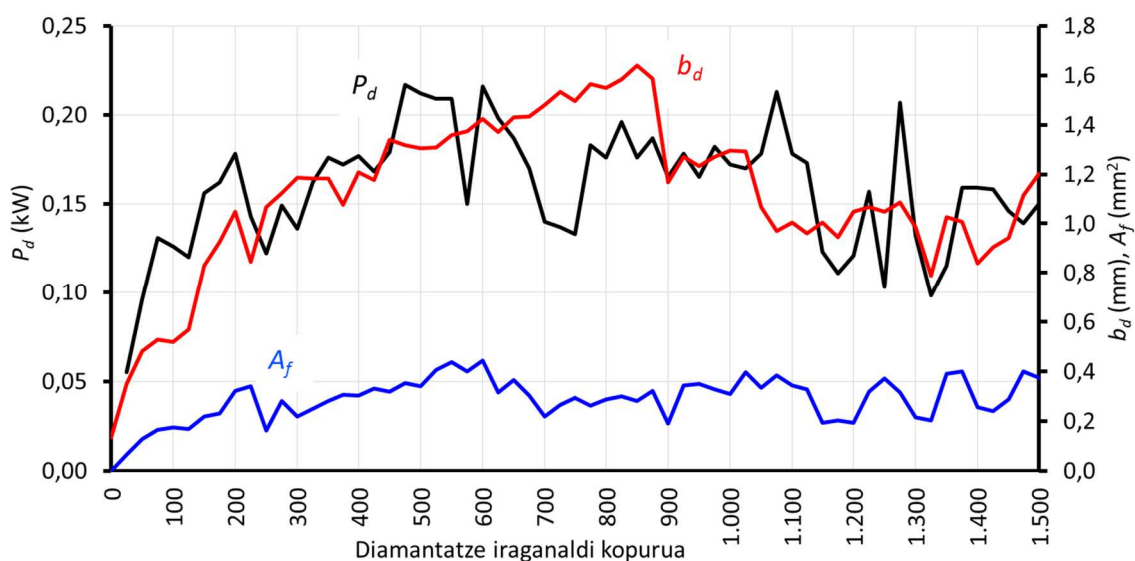
D1 diamantagailuaren kasuan (3-60. irudia), A_f eta b_d aldagaien kurbek, 500 eta 600 iraganaldi tartetean, joera aldaketa erakusten dute: hazteko joera etenda, 0,35 mm² eta 1,1 mm (A_f eta b_d , hurrenez hurren) balioen inguruan geratzen dira, zenbait gorabeherarekin. Jasotako potentziaren kurbak batezbesteko 0,15 kW-ko balioa erakusten du 1.500-era arteko iraganaldietan, balio maximo eta minimoaren artean 0,073 kW-ko diferentziarekin (% 45-eko dispersioa).



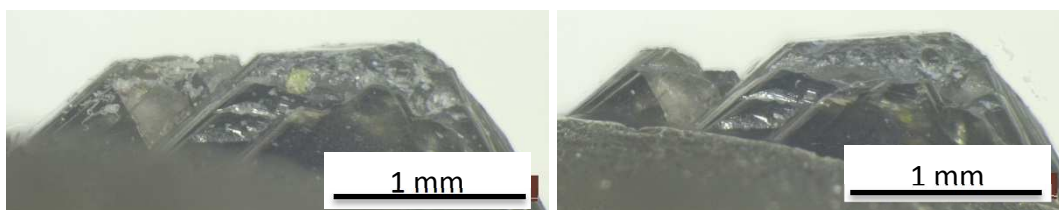
3-60. irudia: D1 diamantagailuarekin neurtutako P_d diamantatze potentzia, b_d kontaktu luzera eta aurretiko A_f kontaktu azalera.

Aipatu, b_d aldagaiaren balioa 0,8 mm-tik gora dagoela uneoro, Marinescu et al.-ek (2007) diamante puntako azaleraren gehieneko diametroarentzat finkatutako 0,6 mm balioaren gainetik (2-8. ekuazioa)

D2 diamantagailuarekin jasotako kurbak (3-61. irudia) ez dira batere egonkorak, seguruenik diamantearen geometria erabat irregularra delako (ikus 3-47. irudia), baina nabaritzen da potentziak 500. iraganaldira bitarte hazteko joera duela (0,20 kW-eko baliora arte) eta hortik aurrera 0,10–0,20 kW tarteko balioen artean mantentzen dela, gorabehera nabariekin. Potentziaren balio maximoak (0,21 kW 475 eta 600 iraganaldi tartean) bat datoz A_f kurbaren balio maximoekin, 550 eta 600 iraganaldi tartean; horrek adierazten du ingurune horretan diamantean hausturak gertatzen direla. b_d kurbak igotzeko joerari eusten dio 900. iraganaldira bitarte, eta hor diamantagailuak ordura arte izandako 2 puntetako bat hautsi egiten da (ikus 3-62. irudiko argazkiak); hortik aurrera, diamantagailuaren puntako hausturak oso nabariak dira, eta potentzia eta A_f kurbetan ere nabaritzen da 1.150 iraganalditik aurrerako balioen gorabeheratan islatuta.



3-61. irudia: D2 diamantagailuarekin neurtutako P_d diamantatze potentzia, b_d kontaktu luzera eta aurretiko A_f kontaktu azalera

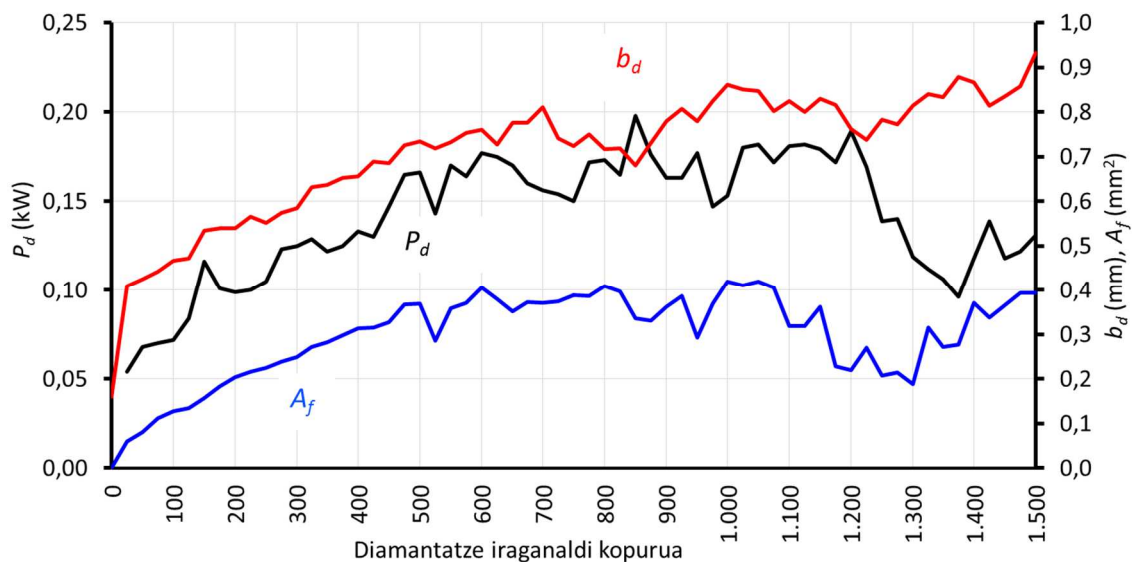


3-62. irudia: D2 diamantagailuaren goitiko bistako irudiak 875 eta 900 iraganaldietan

250. iraganaldi inguruan diamantagailuaren puntan bigarren kontaktu azalera bat agertzen da (ikus 3-40. irudia); bigarren punta honen agerpenak P_d , b_d zein A_f kurben igoeran eragiten du.

D3 diamantagailuarekin jasotako P_d , b_d eta A_f kurben eboluzioa (ikus 3-63. irudia) aurrekoen ildo beretik doa, P_d eta A_f kurben joerak oso antzekoak izanik. 600. iraganaldian lortzen dute balio maximoa (0,177 kW eta 0,405 mm², hurrenez hurren) eta, hortik aurrera, 0,15-0,20 kW artean mantentzen da potentziaren kurba, eta, A_f , berriz, 0,4 mm² balioaren inguruan, baina 1.100. iraganaldian nabarmen egiten du behera, diamantagailuak haustura gehiago jasan dituelako.

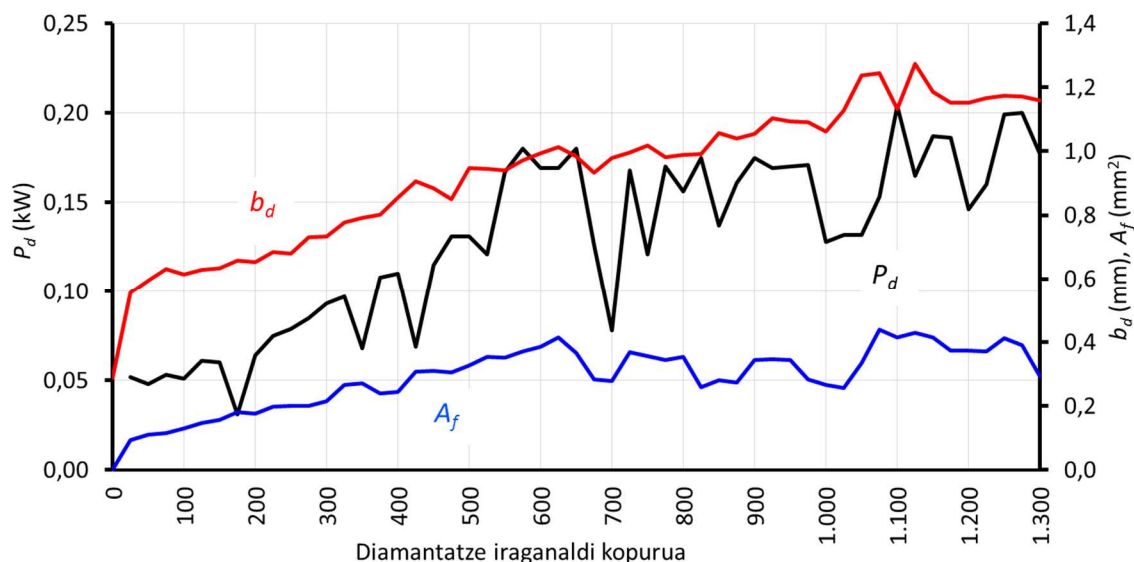
Diamantagailuaren eta artezarriaren arteko b_d kontaktu luzerari dagokionez, 700. iraganaldira bitarte igoera oso lineala erakusten du, hazkunde kurbak 0,811 mm-ko balio maximora iritsi arte, eta, hortik aurrera, 0,68 eta 0,93 balioen artean mugitzen da zenbait gorabeherarekin, 1.500. iraganaldira arte. Laburbilduz, esan daiteke D3 diamantagailuaren kasuan 600. diamantatze iraganaldian nabaritzen direla diamantearen biziraupenaren amaierako zantzuak.



3-63. irudia: D3 diamantagailuarekin neurtutako P_d diamantatze potentzia, b_d kontaktu luzera eta aurretiko A_f kontaktu azalera.

D4 diamantagailuarekin ere emaitza bertsuak lortu dira: P_d eta A_f -ren kurbek 600. diamantatze iraganaldi inguruan lortzen dute balio maximoa eta, hortik aurrera, P_d potentzia 0,12 eta 0,20 kW arteko balioetan ibiltzen da; azalera, berriz, 0,25 eta 0,43 mm²

bitartean. Bestalde, b_d kurbak kasik amaierara arte hazteko joerari eusten badio ere, 550 eta 750 iraganaldi artean suma daiteke kurbaren egonkortasun fasea, A_f eta P_d kurben maximoekin bat datorrena.

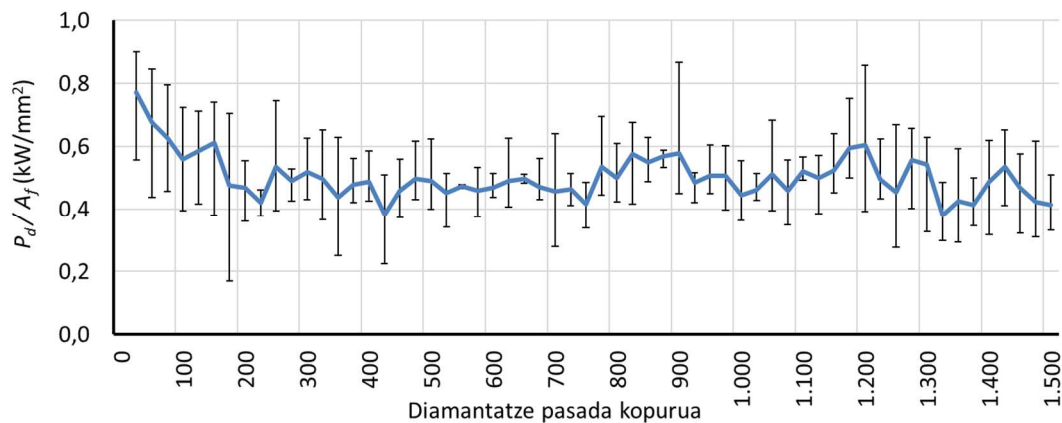


3-64. irudia: D4 diamantagailuarekin neurtutako P_d diamantatze potentzia, b_d kontaktu luzera eta aurretiko A_f kontaktu azalera.

Emaitzak ikusirik, eta aurretik egindako galderari erantzunez, esan daiteke diamantagailuaren puntako A_f kontaktu azalera erabateko eragina duela diamantatze prozesuko P_d potentziaren eboluzioan, eta eragin hori b_d aldagaiarena baino handiagoa dela. Beraz, diamantearen biziraupenaren amaiera A_f kontaktu azaleraren eboluzio kurbaren bidez zehazten denez (Dimla, 2002; Marinescu et al., 2013), ondoriozta daiteke potentzia kurba zuzeneko neurketa gisa balia daitekeela diamantagailuan gertatzen diren hausturak aurreikusteko.

Izan ere lau diamantagailuentzat burututako iraganaldi bakoitzarentzat diamantatze prozesuko potentzia eta diamante puntako higadura azaleraren arteko zatidura kalkulatu gero, kurba nahiko egonkorra lortzen da (hasierako iraganaldietan ezik) 0,4 eta 0,6 tarteko balioen artean (batezbesteko %20 aldakortasun koefizientearekin). Esan daiteke beraz bi aldagai hauen arteko erlazioa zuzena dela batetik eta bestetik burututako entseguek errepikakortasun maila ona erakusten dutela.

Bestalde, kasu guztietan b_d aldagaiaren balioa Marinescu et al.-ek (2007) diamante puntako azaleraren gehieneko diametroarentzat finkatutako 0,6 mm balioaren gainera dago.

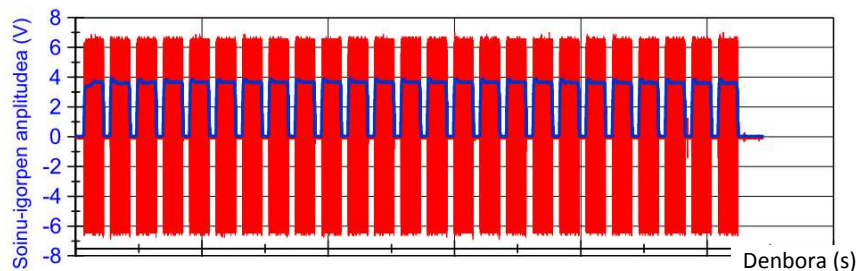


3-65. irudia: 4 probetan neurtutako artezketako energia espezifikokoaren batezbesteko balioa eta desbiderapen estandarra.

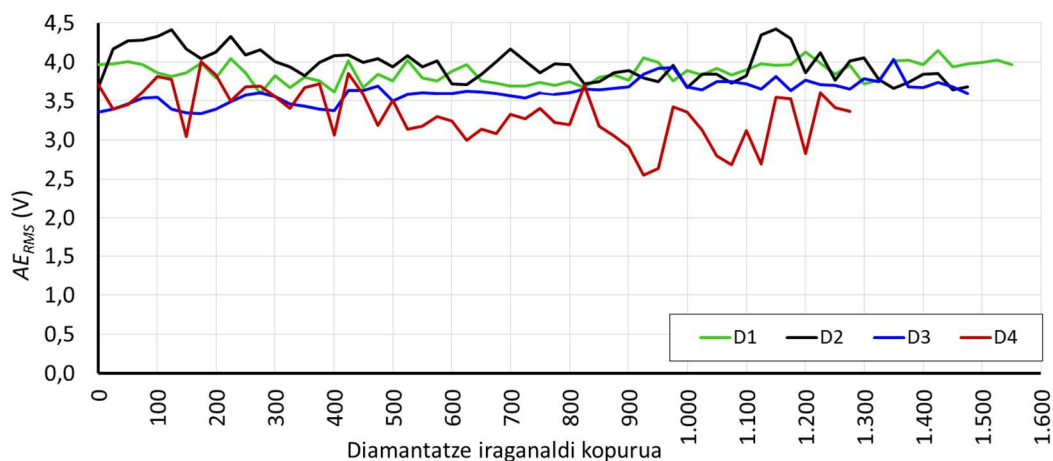
Diamanteen hasierako puntako geometria aztertu ondoren, 3.2.2. atalean esan da puntako r_d erradio txikiena duen diamantagailuak zorrozetasun maila haundiena duela eta ondorioz diamantatze potentzia kontsumo txikiena ere izango duela; potentzia kontsumo txikienetik handienara ordenatuz, D2, D3, D4 eta D1 izango litzateke ordena (3-2. taula). Ordea, D2 diamantagailua da potentzia kontsumo handiena erakusten duena, eta baita ere diamante puntako higadura maila handiena duena. Beraz, ondoriozta daiteke, aurrez esandako guztiagatik, diamantearen hasierako geometriak ez duela eragin handirik diamantatze prozesuko potentzia kontsumoan, eta bai diamanteak jasandako higadura mailak.

3.3.3.7. Soinu-igorpen seinaleak

Azkenik, diamantatze zikloetan jasotako soinu igorpen seinaleen eboluzioa aztertzen da. 25 diamantatze iraganaldiz osatutako zikloak egin dira (3-66. irudia) artezketa ziklo bakarra egin aurretik, eta ziklo horretako 25. iraganaldia besterik ez da hartu kontuan entsegu osoari dagokion grafikoa egiteko orduan (3-67. irudia).

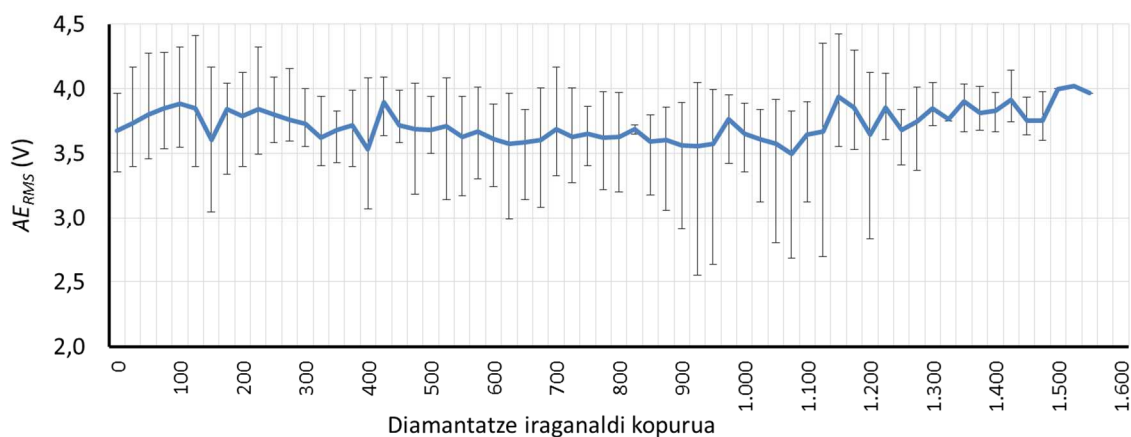


3-66. irudia: Soinu igorpen seinale gordina (gorriz) eta RMS balio estatistikoa (urdinez) 25 diamantatze iraganaldiko ziklo baterako.



3-67. irudia: D1, D2, D3 eta D4 diamantagailuekin neurtutako soinu igorpenaren eboluzioa.

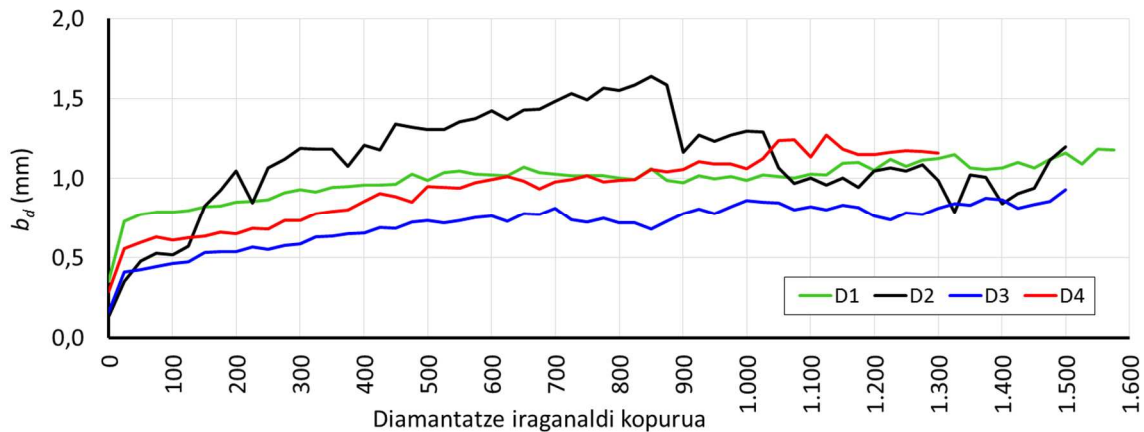
Emaitzaren azterketa azkarra eginda, esan daiteke lehen hiru diamantagailuekin jasotako soinu igorpen seinaleen eboluzioak (AE_{RMS}) oso antzekoak direla, eta laugarrenak, ostera, behera egiteko joera nabarmena erakusten duela, batez ere entseguren azken zatian. Lortutako balioen batezbestekoa 3,5 eta 4 V artean dago (3-68. irudia), batez beste 0,345-eko desbideraketa tipikoarekin eta % 9-ko aldakortasun koefizientearekin; horrek esan nahi du lortutako emaitzak nahiko errepikakorrek direla. 900-1.200 iraganaldi arteko desbideraketa tipikoa 0,41-era artekoa da, eta aldakortasun koefizientea % 12-ra igotzen da laugarren diamantagailuaren joerak eraginda (aurrerago aztertzen dira diamantagailu bakoitzarekin lortutako kurbak).



3-68. irudia: 4 probetan neurtutako soinu igorpenaren batez besteko balioa eta desbideraketa estandarra.

2.4.1. atalean esan bezala, soinu igorpen seinaleak honela defini daitezke: gorputz baten egituraren gerta daitezkeen dislokazio mugimenduen, fasearen transformazio, deformazio plastikoaren, marruskadura indarren eta pitzadura edo zartatze mekanismoen ondorioz

askatutako energiak sortutako uhin iragankorrak. Hala, diamantagailuaren eta artezarriaren arteko kontaktu azalera zenbat eta handiagoa izan, hau da, b_d -ren balioa zenbat eta handiagoa izan, gertatutako “mekanismo” kopurua ere areagotu egingo da, eta, ondorioz, soinu igorpen seinalearen magnitudea ere handiagoa izan beharko litzateke. Diamantagailuak higatu ahala, b_d -ren balioa handituz doala berretsi da (3-69. irudia), baina soinu igorpenarenak (3-67. irudia) ez du gora egiten.



3-69. irudia: b_d kontaktu luzeraren eboluzioa.

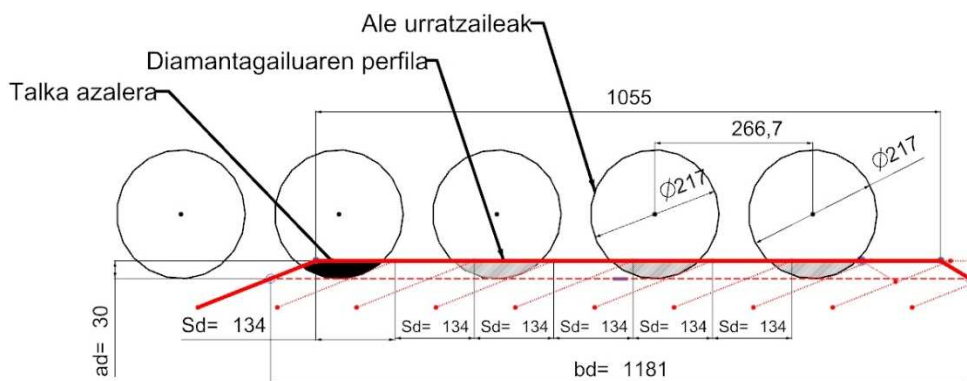
Filho et al.-ek (1999) punta bakarreko diamantagailuekin egindako ikerketan, garbi azaltzen da a_d diamantatze sakonera eta S_d aitzinamendu abiadura handitzeak (U_d txikitzeak, alegia) diamantagailuaren eta artezarriko ale urratzaileen arteko talka kopurua eta soinu igorpen seinalearen anplitudea handitzen dituela. Halaber, ondorioztatu zuten, punta anitzeko diamantagailuak erabiliz gero, lehen diamantearen talkaren ondorioz sortutako soinu igorpen seinaleak duela benetan garrantzia, eta gainerako diamantagailuek ia ez dutela eragiten soinu igorpenaren seinlean; ale urratzaileetan marruskadura efektua eragiten dute, eta are gehiago kamusten laguntzen dute.

Entsegu hauetan ere antzeko zerbait gertatzen da, S_d balioa konstante mantendu izan den proba guztietan. D1 diamantagailua eredu hartuta, ondoko paragrafoetan esplikatzeko da nola eragin duen b_d aldagaiak diamantatze prozesuan eta, zehazki, soinu igorpen seinlean.

3-70. irudian, D1 diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talkaren modelo teorikoa azaltzen da, diamantagailua erabat higatuta dagoenean (1.575. zikloan). Kontuan izan behar da garatutako talkaren 2D modelo oso sinplea dela, ale guztiak biribil perfektuak

izanda eta ondo lerrokatuta egonda, baina benetan gertatzen den talka mekanismoa askoz ere konplexuagoa da.

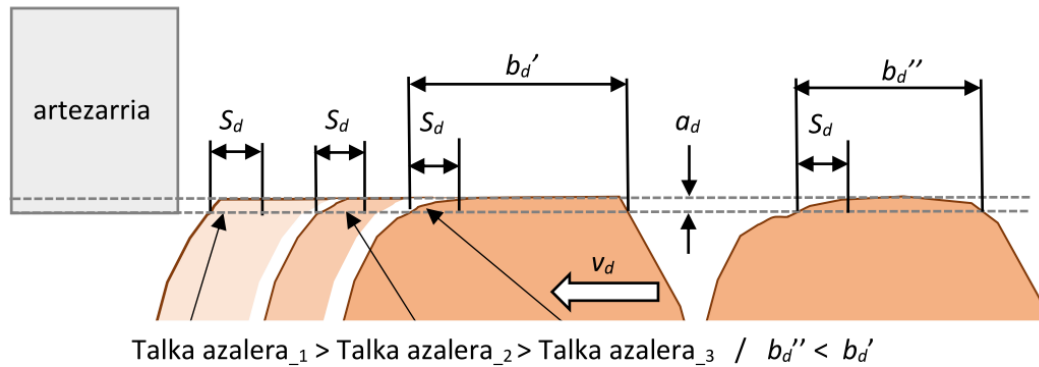
Irudian ikus daitekeen bezala, diamantagailuaren puntak teorikoki lau alerekin egingo luke talka. Baina artezarriaren bira bakoitzeko diamantagailuaren aitzinamendu abiadura 0,134 mm/min izanik (irudian mikratan adierazia), benetako talka zabalera horri dagokion azalera baino ez da gertatzen (ikus irudian beltzez margotutako azalera), eta diamantagailuaren gainerako zabalera aurrez jandako edo mekanizatutako aleen gainetik pasatzen da (ilundutako azalera), marruskadura efektuan eraginez, Filho et al.-en (1999) kasuan punta anitzeko diamantagailuekin gertatzen den bezala. D1 diamantagailuaren kasuan (3-70. irudia), b_d aldagaia 0,731 mm-tik 1,181 mm-ra handitzen da 25. iraganalditik aurrera), % 61, alegia, eta soinu igorpenaren seinalea, berriz, 4 V-ko balioan mantentzen da hasieratik probaren bukaerara arte. Ondorio bera atera daiteke gainontzeko diamantagailuekin lortutako emaitzetatik. Beraz, argi dago soinu igorpen seinalearen balioa S_d diamantatze prozesuko aldagaiaren menpe dagoela nagusiki.



3-70. irudia: D1 diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talkaren modelizazioa 1.575. diamantatze iraganaldian (neurriak mikratan).

Halere, diamantagailu guztiak goitik aztertuta (ikus D4 diamantagailuari dagokion 3-72. irudia), nabaria da diamanteak artezarriarekin lehen talka egiten duen ingurunean jazotzen direla higadura eta hausturarik nabarmenenak. Horren ondorioz, S_d eta α_d aldagaiek osaturiko azalera aldatu egiten da, baita aleen higadura mekanismoa ere (ikus 3-71. irudiko adierazpen sinplifikatua), α_d diamantatze sakonera aldakorra bihurtzen baita (lehen kontaktuan, α_d txikiarekin; S_d iraganaldiaren bukaeran, α_d balio handiagoarekin). Gainera, diamantagailuen higaduraren azterketa egin denean, egiaztatu da diamantearen puntaren higadura konstante fasean b_d aldagaiaren hazkundea lineala dela (Marinescu et al., 2013)

eta material hausturak hasi direnean beste joera bat hartu dutela. Beraz, b_d aldagaiaren eboluzioa ere izan daiteke diamantearen degradazioaren adierazle bat, nahiz eta prozesuan ezin den zuzenean neurtu.



3-71. irudia: Diamantagailuaren higaduraren irudikapena.



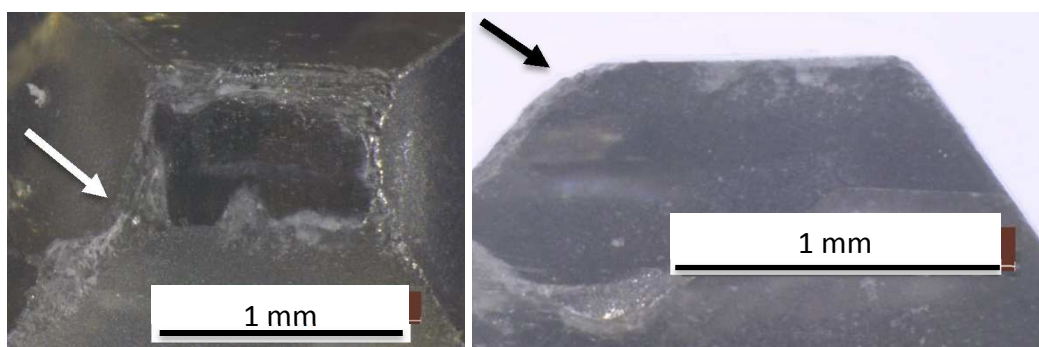
3-72. irudia: Higadura D4 diamantagailuan eta hausturak diamantagailuaren eta artezarriaren arteko lehen talkaren ingurunean.

Orain arte esandakoak arrazoinamendu teorikotik eginiko azterketaren hipotesiak dira, baina benetan oso gauza konplexua da diamantatze prozesuko une bakoitzean zehaztea zein den diamantagailuaren eta artezarriko ale urratzaileen arteko benetako talka azalera eta gertatzen diren benetako higadura mekanismoak. Entseguetan jasotako b_d eta AE_{RMS} seinaleen artean harremanik dagoen ikusi, eta AE_{RMS} kurbaren bidez diamantearen higaduraren edo degradazioaren adierazlerik defini daitezkeen aztertze, jarraian diamantagailu bakoitzarekin lortutako emaitzen azterketa ageri da, grafiko berean bi kurba horiek A_f kurbarekin batera adierazita.

D1 diamantagailuarekin jasotako soinu igorpen seinaleari dagokionez, neurketako balio guztiak 3,6 – 4,1 V artean daude, 0,130 V-ko desbideraketa tipikoarekin eta soilik % 3-ko aldakortasun koefizientearekin; printzipioz, prozesu oso egonkorra dela esan daiteke. 675-875 iraganaldi tartean, ordea, diamantagailuak anplitude tarte txikiagoko fase bat

erakusten du (3,66 – 3,8 V), % 1,1-eko aldakortasun koefizientearekin, b_d kurbaren fase egonkor batekin bat datorrena.

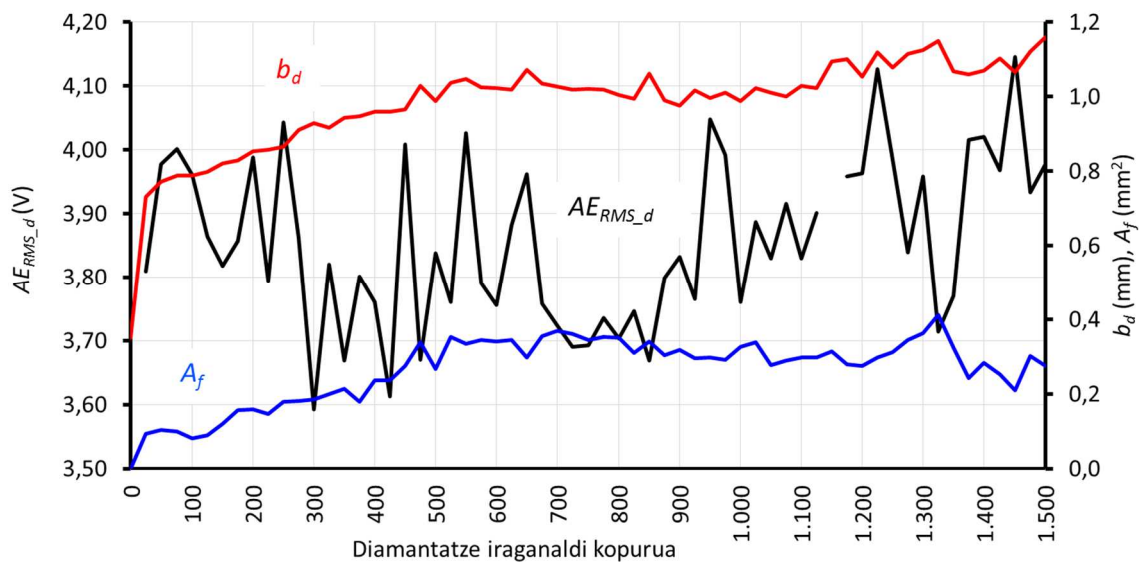
AE_{RMS} kurbak 675. iraganaldian jasaten duen aldaketa hori ez da oso nabaria anplitude aldetik, baina bai joera aldetik. Diamantatze prozesua burutu bitartean, diamantearen ertzak higatu egiten dira, talken ondorioz, batez ere artezarriarekin talka egiten duen aldea (ikus 3-73. irudia); zikloaren bukaeran, oster, diamantatze punta ere higatzen da eta, ziklo batean edo bestean, ertzetako higadura horiek desagertu egiten dira, gauza bera gertatzen delarik ziklo batetik bestera. Horrek esplikatu dezake AE_{RMS} seinaleak erakusten dituen gorabeherak, talka azaleraren etengabeko aldaketen ondorio gisa. Haustura garrantzitsu bat gertatuz gero, aldiz, iraganaldi gehiago behar dira haustura horrek eragindako higadura aztarnak desagerrarazteko, eta, bitartean, aldaketa txikiagoak gertatzen dira AE_{RMS} seinalean, 675 -875 tartean gertatzen den bezalaxe.



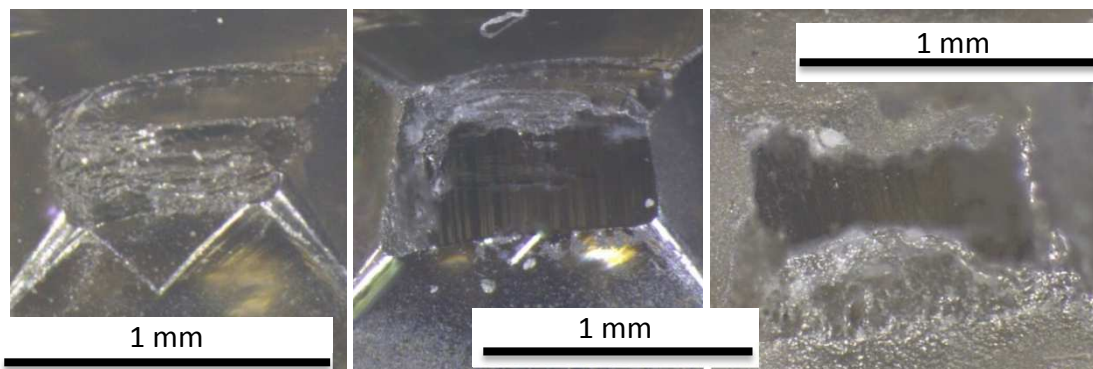
3-73. irudia: D1 diamantagailuaren higaduraren aurretiko eta goitiko ikuspegiak 775. iraganaldiaren ondoren.

Esan beharra dago, era berean, b_d eta A_f kurben joerak oso antzekoak direla, bi kasuetan hazkunde fasea nahiko lineala izanik 500. iraganaldira bitarte; jarraian, anplitudeak balio konkritu baten inguruan mantentzen dira kasik amaierara arte (1 mm eta 0,35 mm², hurrenez hurren). Horrek adierazten du 500. iraganaldiaren ostean gertatzen direla diamantagailuaren puntaren lehen higadura eta haustura nagusiak (ikus 3-75. irudia).

D2 diamantagailuarekin lortutako AE_{RMS} kurbaren balio marjina handiagoa da (3,64 - 4,42 V), eta aurrekoak baino ezegonkortasun apur bat handiagoa erakusten du, 0,206 V-ko desbideraketa tipikoarekin eta % 5-eko aldakortasun koefizientearekin (3-76. irudia).

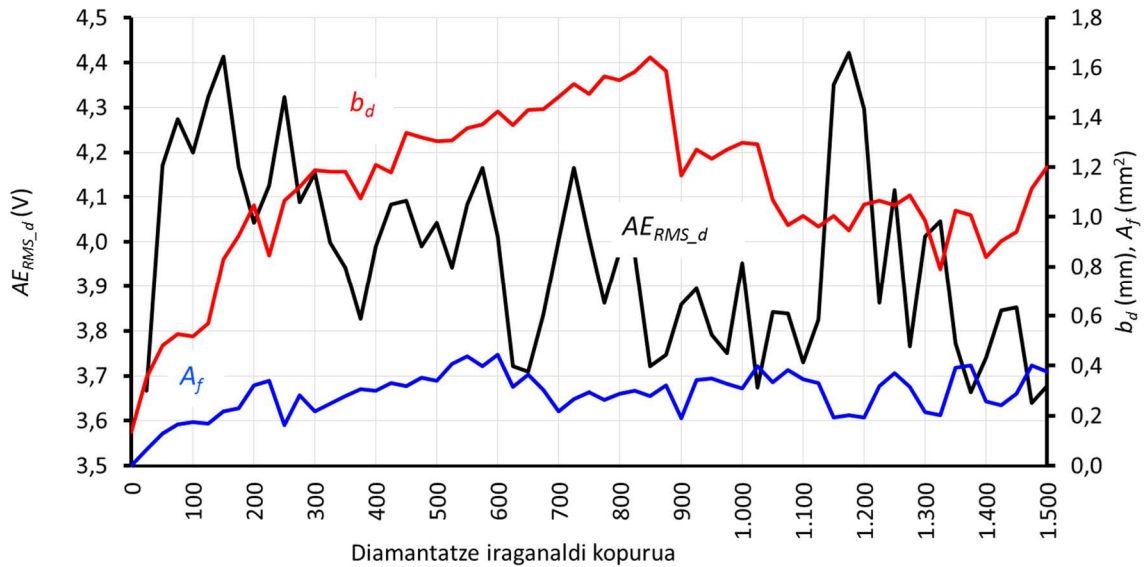


3-74. irudia: D1 diamantagailuarekin neurtutako AE_{RMS} diamantatze potentzia, b_d kontaktu luzera eta aurretiko A_f kontaktu azalera.



3-75. irudia: D1 diamantagailuaren higaduraren aurretiko ikuspegia 25, 500 eta 1.100 iraganaldi ondoren.

Diamantatze ziklo bakoitzean D2 diamantagailuaren eta artezarriko ale urratzaileen arteko talka azaltzea ez da batere erraza, diamantagailuak 2 punta baitauzka. Hasera batean, punta bakarrak egiten du lan (eskuinekoak); hori higatzeaz batera, beste punta (ezkerrekoa) hasten da artezarria ukitzen, diamantatze baldintzak aldatzen dituena. 3-77. irudian ageri da diamantagailuak 100, 225 eta 725 iraganaldi ostean jasandako higaduraren eboluzioa: lehen kasuan, eskuinaldeko puntak bakarrik egiten du talka artezarriarekin; bigarrenetan, ezkerreko punta ere talka egiten hasten da; azkenik, higadura hain da handia, ezen punta biek kasik bat egiten duten. Aurrerago, ezkerreko puntak haustura nabarmenak jasango ditu, 3-62. irudian ikus daitekeen bezala. 175-250 iraganaldi tartean gertatzen diren higadura eta hausturak erraz suma daitezke A_f , P_d eta b_d kurbetan (ikus 3-61. eta 3-76. irudiak); soinu igorpen seinalean, aldiz, zailagoa da aldaketa nabaritzea.



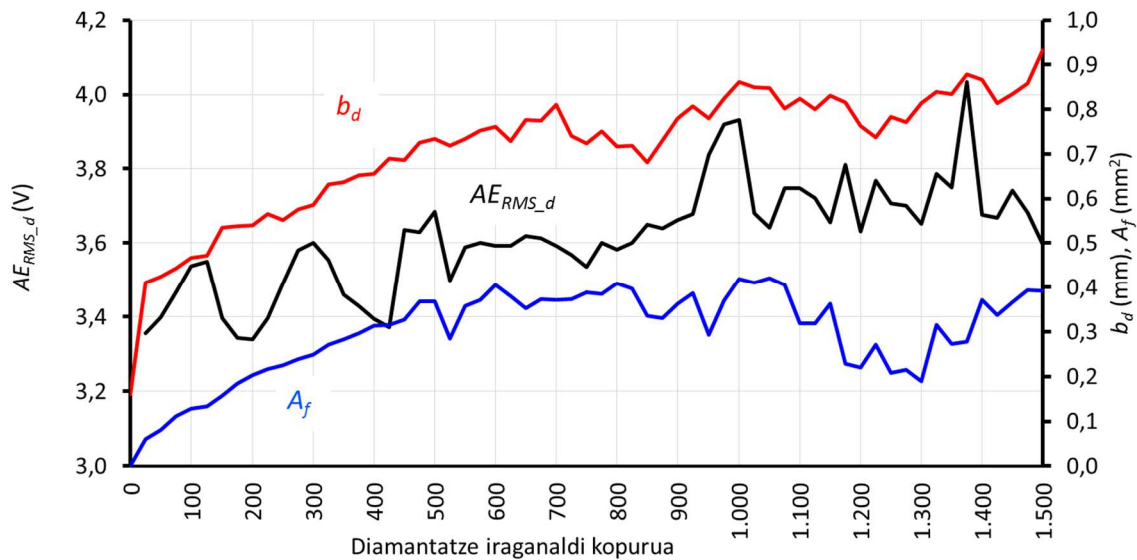
3-76. irudia: D2 diamantagailuarekin neurtutako AE_{RMS} diamantatze potentzia, b_d kontaktu luzera eta aurretiko A_f kontaktu azalera.



3-77. irudia: D2 diamantagailuaren goitiko ikuspegia 100., 225. eta 725. iraganaldietan, hurrenez hurren.

850-1.100 iraganaldi tartean, ordea, balio maximoen eta minimoen arteko tartea murriztu egiten da (3,67-3,95 V artean), D1 diamantagailuarekin gertatu den bezalaxe; tarte hori bat dator 875-900. iraganaldi bitarteko b_d kurbaren bat-bateko aldaketarekin, bai eta diamantagailuaren puntaren hausturarekin ere (ikus 3-62. irudia). Hala, soinu igorpen seinalearen tarte hori erabil daiteke diamantagailuak iraganaldi horretan jasandako higaduraren eta hausturen adierazle gisa.

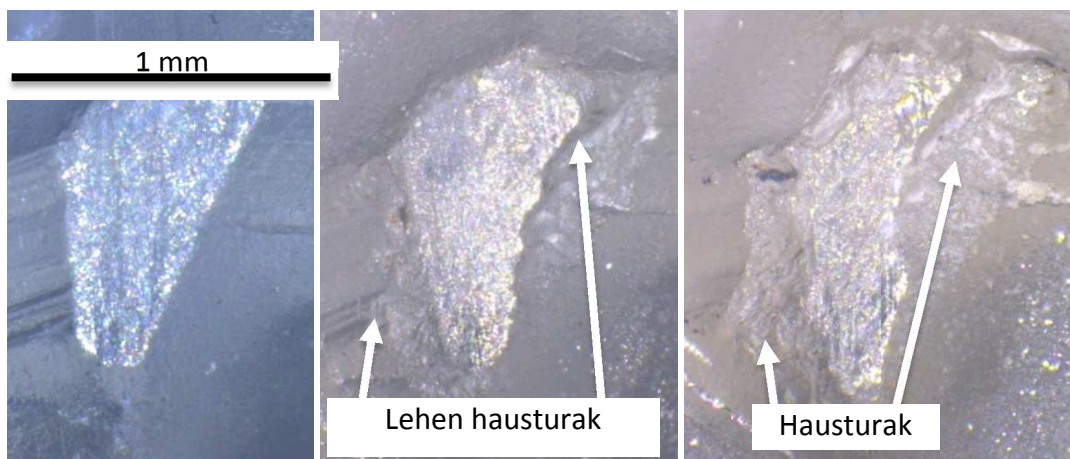
D3 diamantagailuarekin jasotako AE_{RMS} seinaleak aurrekoa baino egonkorragoa dirudi (3-78. irudia). Balio maximoen eta minimoen arteko tartea aurrekoen oso antzekoa da (3,35-4,03 V), 0,145eko desbideraketa tipikoarekin eta % 4-ko aldakortasun koefizientearekin. Diamantagailu horren geometria oso erregularra da (piramide itxurakoa) hasiera-hasieratik, eta 550-600 iraganaldi bitartera arte diamantagailuaren puntak jasandako higadura ere zeharo erregularra da; agian, horrek azal dezake AE_{RMS} seinalearen egonkortasun maila.



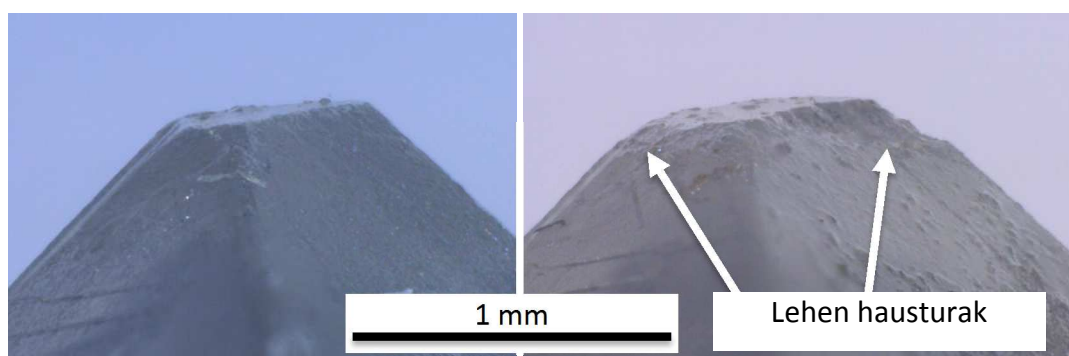
3-78. irudia: D3 diamantagailuarekin neurtutako AE_{RMS_d} diamantatze potentzia, b_d kontaktu luzera eta aurretiko A_f kontaktu azalera.

Kasu honetan ere, 550-800 iraganaldi bitartean, kurbak anplitude tarte oso txikiko fase bat erakusten du: aldakortasun koefizientea oso txikia da (% 1-ekoa besterik ez), eta b_d kurbaren maximoarekin eta A_f kurbaren bigarren fasearen amaierarekin bat egiten du, hots, diamantearen biziraupenaren amaierarekin.

D3 diamantagailuaren irudi horietan, nahiko argi ikusten dira diamantagailuaren puntaren inguruan sortzen diren lehen higadura eta haustuta zantzuak, 425. eta 675. iraganaldietan, hurrenez hurren (3-79. eta 3-80. irudiak).



3-79. irudia: D3 diamantagailuaren higaduraren aurretiko ikuspegia 425., 675. eta 975. iraganaldietan.



3-80. irudia: D3 diamantagailuaren higaduraren goitiko ikuspegia 425. eta 675. iraganaldietan.

Azkenik, D4 diamantagailuarekin lortutako AE_{RMS} kurbari dagokionez (3-82. irudia), esan daiteke 3 fase erakusten dituela, 3-10. taulan azaltzen den bezala.

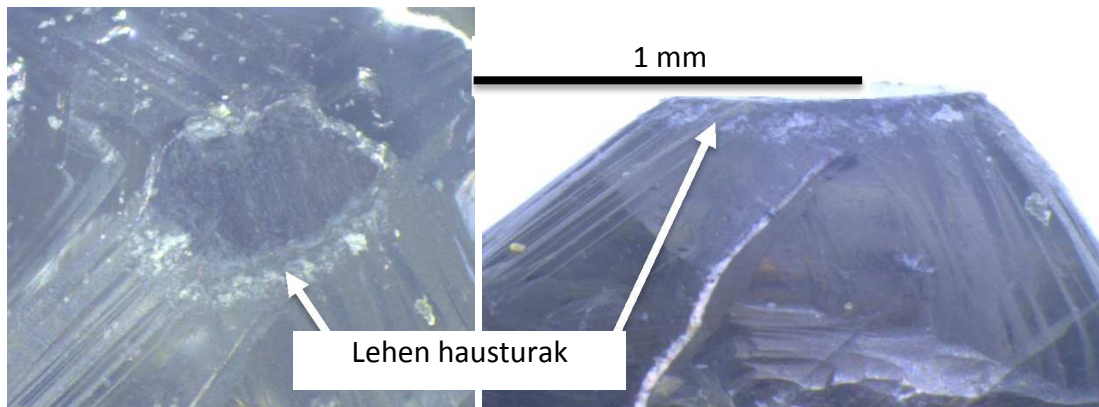
3-10. taula: D4 diamantagailuarekin lortutako AE_{rms} kurbaren azterketa.

Iraganaldi tartea	Batez besteko balioa (V)	Maximo eta minimo tartea (V)	Desbiderapen tipikoa (V)	Aldakortasun koefizientea (%)
0 – 550	3,56	3 - 4	0,276	7,7
550 – 800	3,23	3 – 3,4	0,149	4,5
800 -1300	3,14	2.5 – 3,7	0,347	11,6

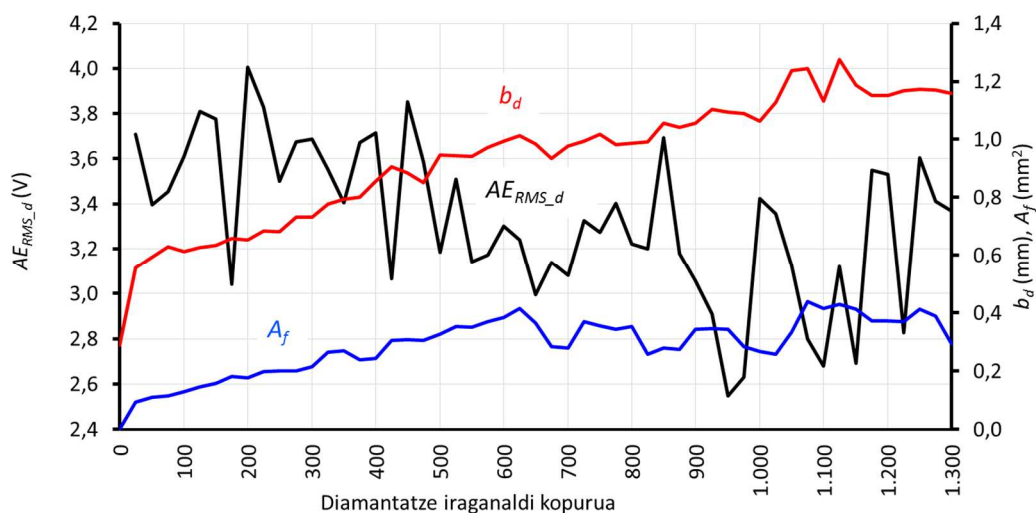
Bigarren iraganaldi tartea A_f -ren maximoarekin bat egiten du (625. iraganaldia), baita b_d kurbak ingurune horretan erakusten duen egonkortasun ziklo txiki batekin ere. Horrez gainera, diamantagailuaren higadura eta haustura eboluzioa aztertuz gero (3-81. irudia), ikus daiteke 625. iraganaldian hasten direla diamantagailuaren puntaren inguruneke haustura garrantzitsuenak.

Beraz, emaitza hauek guztiak ikusita, esan daiteke lehen iraganaldi tartean diamantagailuaren higadura oso erregularra dela, A_f eta b_d hazkunderak oso uniformeak baitira. Soinu igorpen seinalean ere desbideraketa tipiko eta aldakortasun koefiziente balio txikiak neurtu dira (ikus 3-10. taula). Bigarren zatian, hausturak gertatzen hasten dira eta, horren eraginez, diamantagailuaren eta artezarriaren arteko talka azalera konstante samar mantentzen da ziklo batzuetan; egoera horretan, AE_{RMS} seinaleak aldaketa txikiak jasaten ditu (aurrez aipatu den bezala, D1 diamantagailuaren emaitzak aztertu direnean). Hausturak hirugarren iraganaldi tartean hasten dira handiagoak eta ugariagoak izaten, inolako kontrolik gabeko egoera eraginda, A_f , b_d , eta AE_{RMS} kurbetan antzeman daitekeen bezala.

Beraz, aurreko hiru diamantagailuekin ondorioztatu den bezala, AE_{RMS} kurba erabil daiteke diamantagailuan gertatzen diren higaduraren eta hausturen adierazle gisa, hau da, diamantagailuaren biziraupenaren amaieraren adierazle gisa.



3-81. irudia: D4 diamantagailuaren higaduraren aurretiko eta goitiko ikuspegiak 625. iraganaldian.



3-82. irudia: D4 diamantagailuarekin neurtutako AE_{RMS} diamantatze potentzia, b_d kontaktu luzera eta aurretiko A_f kontaktu azalera

3.3.4. Diamantearen biziraupenaren amaiera zehazteko K_A kurba adierazlea

2. kapituluko 2.4.2. atalean azaldutako azterketa bibliografikoaren arabera, ez dira asko zentzu honetan eginiko ikerketak, eta gehienak neurona sareen erabilpenean oinarritzen dira; gainera, aurkeztutako irtenbideak lan baldintza konkretu batzuetarako baino ez dute balio (Martins et al., 2014; Wehmeier eta Inasaki, 2002). Bestalde, zuzeneko metodo gisa, diamantearen gainazaleko higadura azaleraren tamaina da adierazle ezagunena

diamantagailua erabilgarria den ala ez jakiteko: kurbaren hirugarren fasean aurkitzen bada, diamantagailua aldatu edo zorroztu beharra dago (Marinescu et al., 2013).

Ondorengo 3-11. taulan, aztertutako aldagai guztiak bildu eta haietan ikusitako joera aldaketak gertatu diren iraganaldi zenbakiak laburbiltzen dira.

3-11. taula: Prozesuko aldagaiak eta eboluzio kurbako adierazleak.

	D1	D2	D3	D4
A_f	500	550	500 - 600	625
P_d	Seinale zati bat falta da	500 - 600	500 - 600	550 - 650
b_d	525	250 / 850	700	600 - 700
AE_{RMS}	675 - 875	850 - 1100	550 - 800	550 - 800
e_c	Ez da jokaera nabarmenik bereizten			
Barkhausen	400	1000	400	400
R_z	Ez da jokaera nabarmenik bereizten			

Taula hau ikusita, A_f eta P_d -ren arteko erlazioa oso zuzenekoa dela ondoriozta daiteke, eta, zalantzarik gabe, potentzia kurba diamantagailuaren bizi zikloaren adierazle gisa erabil daiteke. AE_{RMS} kurbaren ezaugarriak, hau da, anplitude diferentzia txikiko fase baten agerpena, b_d kurbaren aldaketarekin bat dator kasu gehienetan, eta horrek diamantearen puntan gertatzen diren haustura garrantzitsuak identifikatzen ditu. Gainerako kurbek ez dute informazio nabarmenik ematen.

Hurrengo pausoa izango da P_d eta AE_{RMS} kurben bi ezaugarri horiek biltzen dituen adierazpen bakarra definitzea, diamantagailuan agertzen diren higadura eta hausturen berri emateko. Aguiar et al. (2002) eta Moia et al.-en (2011) ikerketak aintzat hartuta, DPO aldagai estatistikoa erabili zuten piezaren gainazaleko erreduarak identifikatzeko, batetik, eta, bestetik, diamantatze ziklo kopuru egokia aurkitzeko, hurrenez hurren (2.4.3. kapituluua). Soinu igorpen seinalearen σ desbideraketa tipikoa (std izendatua) eta artezketa prozesuko potentzia maximoa erabiltzen dute DPO kalkulatzeko (3-6. ekuazioa). Azken finean, helburua da balio estatistiko baten bidez potentzia eta soinu igorpen seinaleetan dauden berezitasunak nabarmentzea.

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N - 1}}$$

3-6. ekuazioa

Diamantatze prozesuko P_d potentziari dagokionez, aurrez esan bezala, kurbaren eboluzioa berbera da kasu guztietan: hasieran, igoera malda batekin maximo batera iritsi arte eta, jarraian, mantendu edo jaitsi egiten da.

Potentzia eta soinu igorpen seinaleetan gertatzen diren joera aldaketak identifikatzeko, C_v aldakortasun koefizientearen alderantzizkoa proposatzen da. Definizioz, C_v aldakortasun koefizienteak datu bakoitza aritmetiko sinpletik zenbat desbideratzen den adierazten du, ehunekotan, eta ematen duen informazioa deskriptiboagoa da σ desbideraketa estandarrarekin alderatuta, adibidez. Haren balioa lagin baten desbideraketa estandarraren eta batezbestekoaren arteko zatiduraren bidez kalkulatzen da (3-7. ekuazioa).

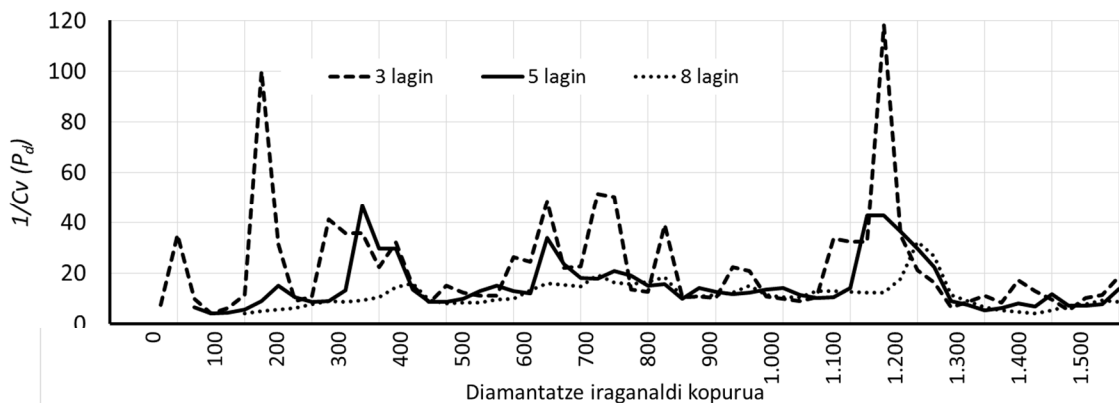
$$C_v = \frac{\sigma}{|\bar{x}|}$$

3-7. ekuazioa

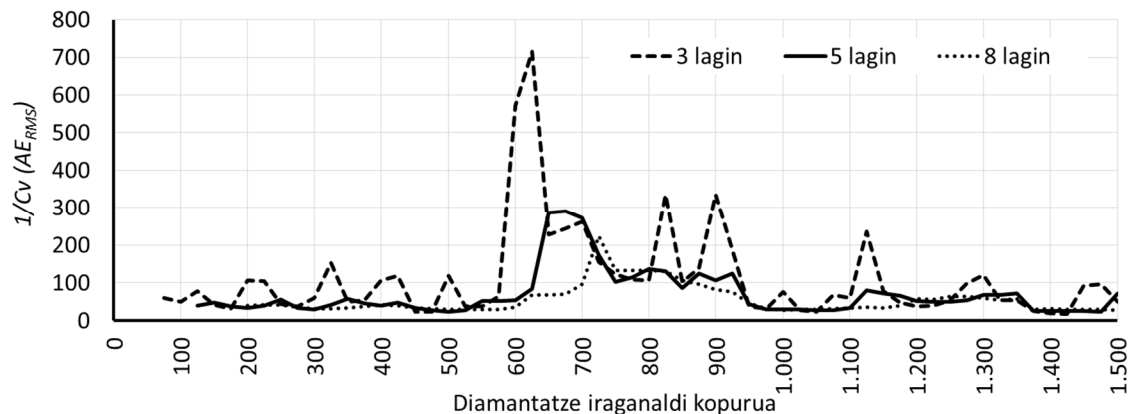
Formula hori erabiliz, potentzia kurbaren lehen faseko (igoera fasea) aldakortasun koefizienteak handiagoa izan beharko luke ondorengo faseko balioen aldean; izan ere, tarte horretan denbora osoan balioa konstante mantenduko balitz, aldakortasun koefizientea 0 izango litzateke, edozein lagin tamainarako. Alderantzizko balioa kontuan hartuta, berriz, hasierako balioak txikiak izango lirateke, eta ondorengoak, aldiz, oso handiak. Baina potentzia eta soinu igorpen seinaleen ausazkotasuna nahiko handia denez, C_v aldakortasun koefizientea kalkulatzeko laginaren tamaina definitu egin behar da.

Lagin txikiak edo laburrak erabiltzean, epe labur zein luzeko joerak ere ikusten dira, oro har, baina kasu batzuetan epe laburrekoak gailentzen dira eta ez da epe luzeko joerarik nabarmentzen; hori oso nabaria da seinaleen ausazkotasuna handitzen denean. Beraz, epe luzeko joera hobeto bereizteko, laginaren zabalera handitu beharra dago. Lagin handiak, berriz, desagerrarazi egiten ditu epe laburreko gorabeherak, eta epe luzekoak baino ez ditu erakusten, baina zenbat eta lagin zabalagoa, orduan eta informazio gehiago galtzen da, eta maximoaren eta minimoaren arteko aldea murriztu egiten da. Ondorengo 3-83. eta 3-84. irudietan, D3 diamantagailuaren potentzia eta AE_{RMS} balioen aldakortasun koefizientearen alderantzizko funtzioa kalkulatu da 3, 5, eta 8, laginetako adierazlerako.

Hiru lagin erabiliz, epe laburreko aldaketak besterik ez dira nabarmentzen (puntako balio ugari), eta ez da epe luzeko joerarik nabari. Zortzi balioko laginarekin, berriz, erabat galtzen da epe laburreko informazioa, eta kurbak oso lauak dira. Gainera, zenbat eta lagin handiagoa, orduan eta beranduago sumatuko litzateke diamantearen higadura edo haustura. Beraz, tarteko tamaina aukeratu da, 5 lagin, potentzia eta soinu igorpen kurbak erabilia diamantagailuaren adierazle kurba definitzeko C_v aldakortasun koefizientea erabiliz.



3-83. irudia: D3 diamantagailuaren potentzia balioen aldakortasun koefizientearen alderantzizko funtzioak 3, 5 eta 8 lagineko adierazlerako.



3-84. irudia: D3 diamantagailuaren AE_{RMS} balioen aldakortasun koefizientearen alderantzizko funtzioak 3, 5 eta 8 lagineko adierazlerako.

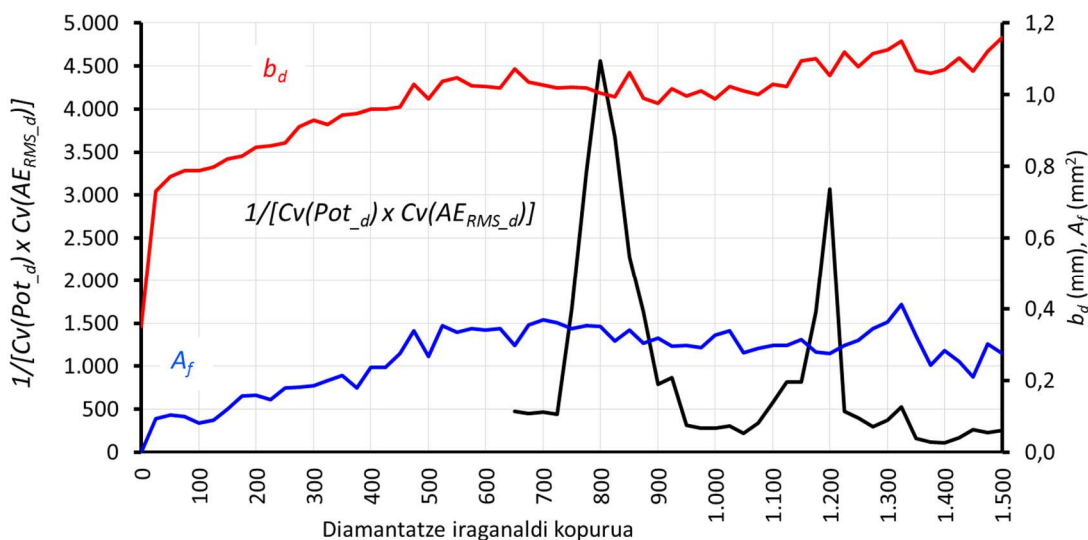
Proposatzen den funtzio estatistikoak (ikus 3-8. ekuazioa) potentzia eta soinu igorpen seinaleen C_v aldakortasun koefizientearen alderantzizkoen biderkadura kalkulatzen du: alde batetik, potentzia kurbaren lehen fasetik bigarrenerako trantsizioan gertatzen den kurbaren malda txikiagotzea, eta, bestetik, soinu igorpen seinaleko maximo eta minimoaren arteko anplitude tarte txikia duten diamantatze prozesuko faseak identifikatzea da helburua.

$$K_A \text{ (kurba adierazlea): } \frac{1}{C_v(P_d) \cdot C_v(AE_{RMS})}$$

3-8. ekuazioa

Lau grafikoetan, lau diamantagailuetarako kalkulaturako K_A kurbak azaltzen dira, A_f eta AE_{RMS} kurbekin batera.

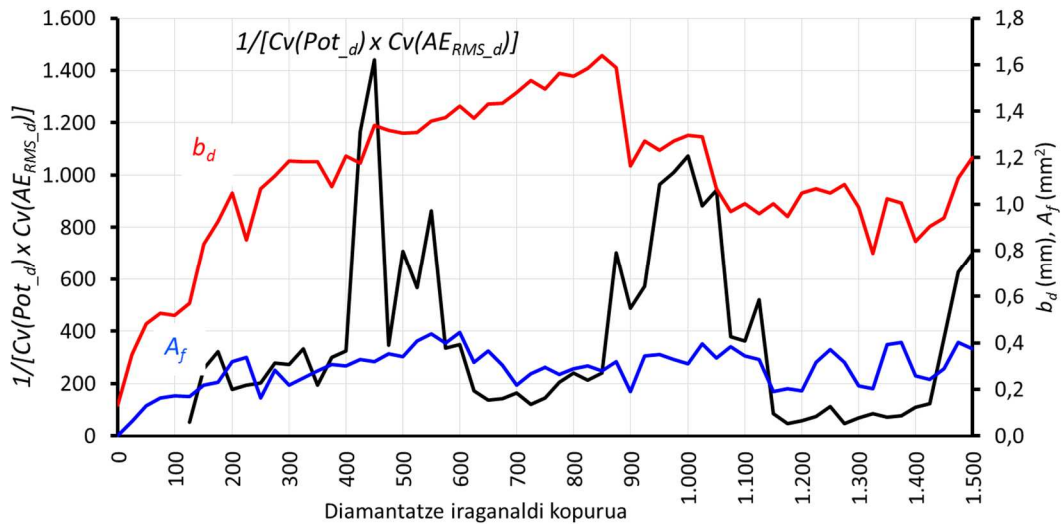
Potentzia seinale osoa jasotzeko izandako arazoak direla eta, D1 diamantagailuarekin kalkulaturako K_A kurba adierazleak ez du 500. iraganaldi inguruan gertatzen den higaduraren berri ematen (ikus 3-85. irudia). 800. iraganaldian, ordea, puntaren balio bat nabarmentzen da, AE_{RMS} kurbak 700-900 iraganaldi tartean azaltzen duen dispersio txikiko fasearen eraginez. Izan ere, tarte horretan gertatzen dira diamantagailuaren puntaren inguruko material haustura batzuk, 3-73. irudian azaldu den bezala.



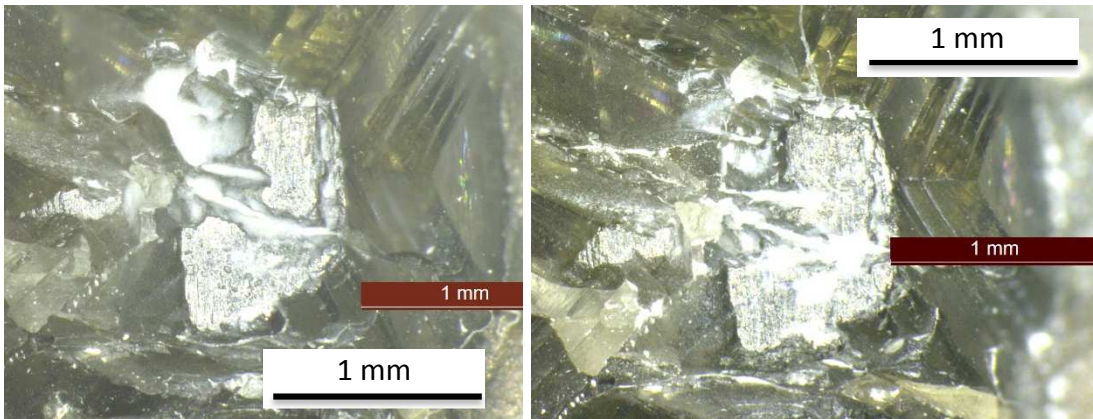
3-85. irudia: D1 diamantagailuaren puntaren A_f aurretiko kontaktu azalera, b_d kontaktu luzera eta kurba adierazlea.

Bigarren diamantagailuak puntaren bi balio erakusten ditu: lehena 450-550 iraganaldi tartean eta bigarrena 850-1.100 tartean. Lehenengoa A_f kurbaren balio maximoa baino lehen hasi arren, 375. eta 450. iraganaldietako diamantearen aurretiko ikuspegitik hartutako 3-87. higadura irudiak aztertuz gero, antzeman daiteke kontaktu azaleraren ingurunean material haustura batzuk ageri direla, batez ere artezarriarekin talka egiten duen aldean. Ondorengo iraganaldietan, haustura gehiago gertatzen dira.

850. iraganalditik aurrera ageri den igoera faseak bi gertakari adierazten ditu: batetik, 825. iraganalditik aurrera gertatzen diren hausturak (ikus 3-89. irudia), eta bestetik, ezkerreko puntaren haustura 900. iraganaldian (3-62. irudia).



3-86. irudia: D2 diamantagailuaren puntaren A_f aurretiko kontaktu azalera, b_d kontaktu luzera eta K_A kurba adierazlea.

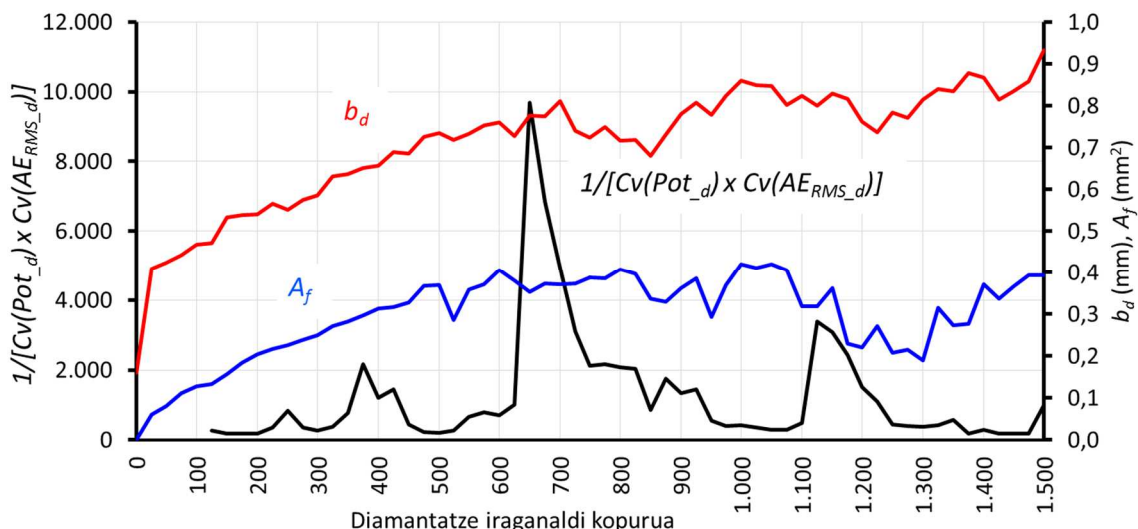


3-87. irudia: D2 diamantagailuaren higaduraren aurretiko irudiak 375. eta 475. iraganaldietan.



3-88. irudia: D2 diamantagailuaren higaduraren aurretiko irudiak 825. iraganaldian.

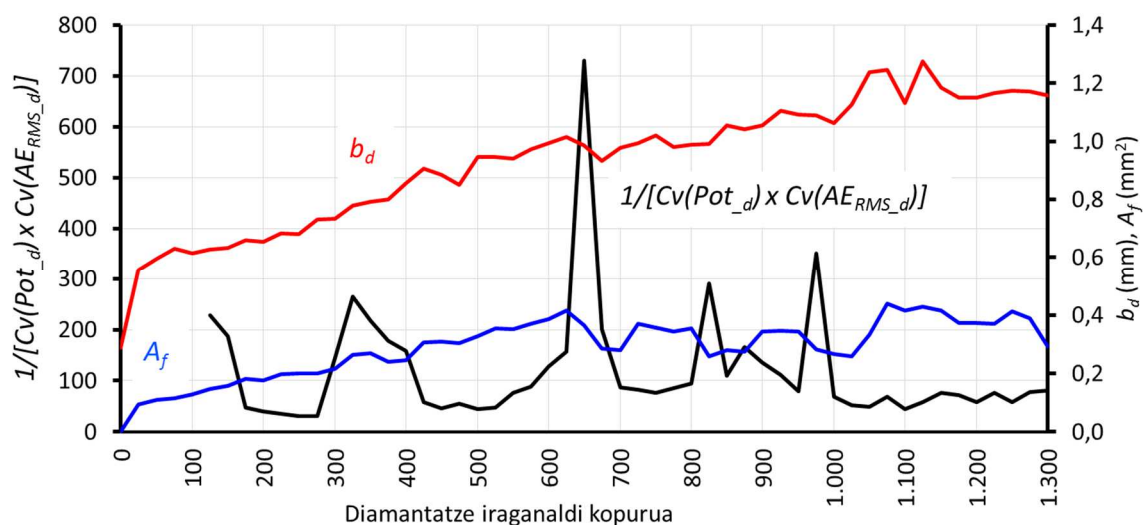
D3 diamantagailuan, 650. iraganaldian ageri da puntaren balio nagusia, eta diamantagailuak ingurune horretan jasaten dituen lehen higadura arrasto eta hausturekin bat egiten du (ikus 3-79. eta 3-80. irudietako argazkiak).



3-89. irudia: D3 diamantagailuaren puntaren A_f aurretiko kontaktu azalera, b_d kontaktu luzera eta K_A kurba adierazlea.

Azkenik, D4 diamantagailuari dagokionez, era berean 650. iraganaldian ageri da A_f kurbaren inflexio puntuarekin bat datorren puntaren balio nabarmenena (ikus 3-90. Irudia). 3-81. irudian azaltzen dira diamantearen puntaren kontaktu azaleraren inguruneko lehen higadura eta haustura arrastoak.

Oro har, esan daiteke definitutako K_A kurba adierazleak ondo identifikatzen dituela diamantean gertatzen diren higadura eta haustura nagusiak. 3-12. taulan, K_A kurba adierazleak puntaren balioak zein iraganalditan agertzen dituen zehazten da, A_f , P_d , b_d eta AE_{RMS} kurben ezaugarriekin batera.



3-90. irudia: D4 diamantagailuaren puntaren A_f aurretiko kontaktu azalera, b_d kontaktu luzera eta K_A kurba adierazlea.

3-12. taula: Kurba adierazlearen puntaren balioak.

	D1	D2	D3	D4
A_f	500	550	500 - 600	625
P_d	Seinale zati bat falta da	500 - 600	500 - 600	550 - 650
b_d	525	250 / 850	700	600 - 700
AE_{RMS}	675 - 875	850 - 1.100	550 - 800	550 - 800
K_A	800	425 - 550 850 - 1.000	650	650

Gogoratu beharra dago egindako azterketa, 25 diamantatze iraganaldiko ziklotik, azken iraganaldiko datuekin egin dela, eta ezin dela jakin zer gertatu den tarteko iraganaldietan. Litekeena da tarte horietan beste higadura eta haustura batzuk gertatu eta, azken iraganaldira iritsi aurretik, arrastoa desagertu izana. Hori beste azterketa bat litzateke. Benetan, batez beste 5 diamantatze iraganaldi egiten dira artezarriaren ebaketa ahalmena berreskuratzeko (Xue et al., 2002). Horrekin esan nahi da, entseguak egiteko 5 iraganaldiko zikloak egin izan balira, agian K_A kurba adierazleko puntaren balioak hurbilago egongo liratekeela.

Bestalde, C_v aldakortasun koefizienteak kalkulatzeko egindako 5 entseguen balioak erabiltzen dira, eta horrek, nahi eta nahi ez, K_A kurbak egin dezakeen higaduraren eta hausturen iragarpena atzeratzen du. Azterketa hori egiteko, 5 entseguetako balioen lagina erabiltzea egokitzat jo da, kurbaren bidez epe labur eta luzeko ezaugarriak jasotzeko; uste izan da 3 balioko laginak epe laburreko gertaerak besterik ez duela jasotzen, eta 8-koak, berriz, epe laburrekoak galdu egiten dituela. Dena dela, erabilitako metodologia erabat baliozkoa da diamantatze ziklo motzagoak egiteko ere.

Kurba adierazle modelo hau beste lan baldintza batzuetan lan egiteko baliagarria dela frogatzeko, beste hiru diamantatze entsegu egin dira 3-13. taulan zehazten diren lan baldintzak erabiliz (D14, D10 eta D11 diamantagailuak). Proba horietan ez dira aurrekoetan adina datu jaso, batez ere diamantagailuaren puntaren higadura azalerari dagozkionak (100 diamantatze iraganalditik neurri bakarra jaso da).

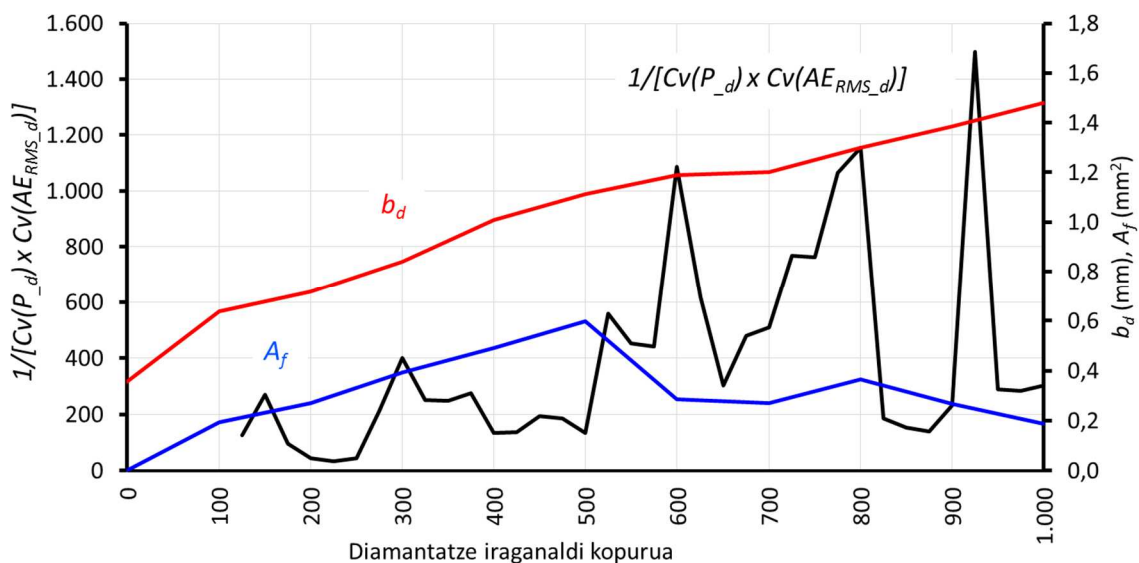
3-13. taula: Proba esperimental gehigarriak.

Diamantagailu erreferentzia	D14	D10	D11
a_d (μm)	20	15	10
v_d (mm/min)	200	100	30
Artezarria	DRAGAO - 82AA70-9J6VW		UNESA - CBL70J7V489

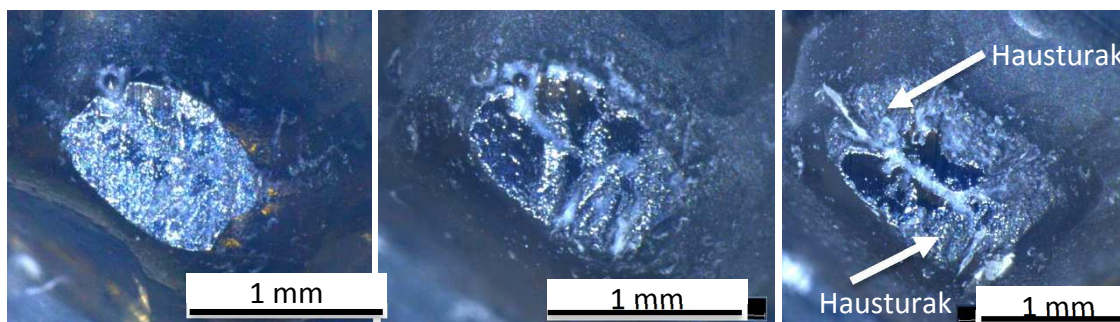
D14 diamantagailuarekin erabilitako lan baldintzak oso antzekoak dira aurrekoen aldean; kasu honetan, a_d diamantatze sakonera apur bat txikiagoa da (20 μm), eta v_d aitzinamendu abiadura, ostera, zertxobait handiagoa (200 mm/min). 3-91. irudian ikus daitezke diamantagailu horrekin lortutako A_f , b_d eta K_A kurbak.

A_f kurbak 500. iraganaldian lortzen du balio maximoa, eta, hortik aurrera, anplitudea txikitu egiten da; b_d kurbak igoera joera erakusten du denbora osoan, eta K_A kurbak, berriz, lehen punta balioak 500 eta 600 balioen artean A_f kurbaren maximoarekin bat eginda. Beranduago, beste punta balio batzuk ere ageri dira 700-800 tartean; nabariena 925. iraganaldian.

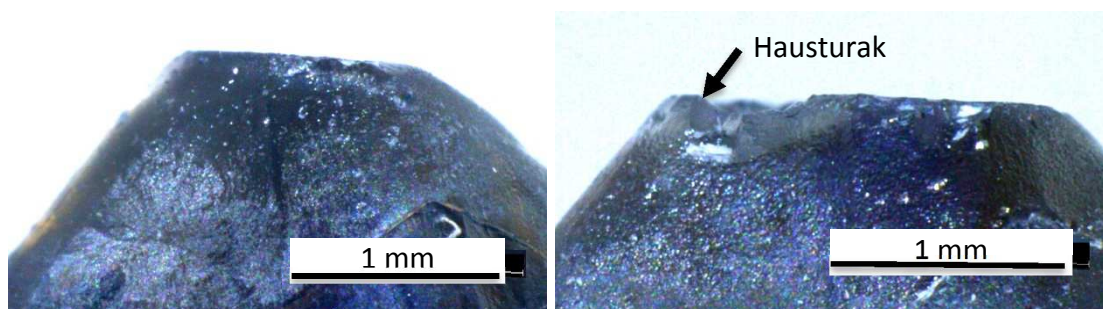
600. iraganaldiaren ondoren ateratako argazkian, argi ikusten dira aurreko 100 iraganaldietan diamanteak jasandako higadura eta hausturak (3-92. irudia). 900. iraganaldiaren ostean eginiko argazkiek ere haustura gehiagoren berri ematen dute (ikus 3-92. eta 3-93. irudiak).



3-91. irudia: D14 diamantagailuaren puntako A_f aurretiko kontaktu azalera, b_d kontaktu luzera eta K_A kurba adierazlea.

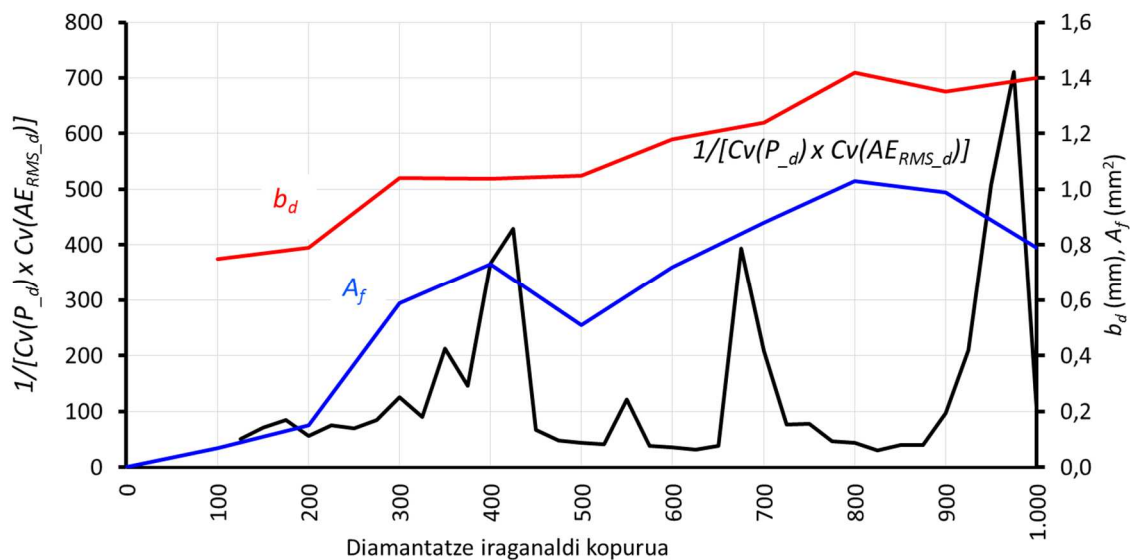


3-92. irudia: D14 diamantagailuaren higaduraren aurretiko irudiak 500., 600. eta 900. iraganaldietan.

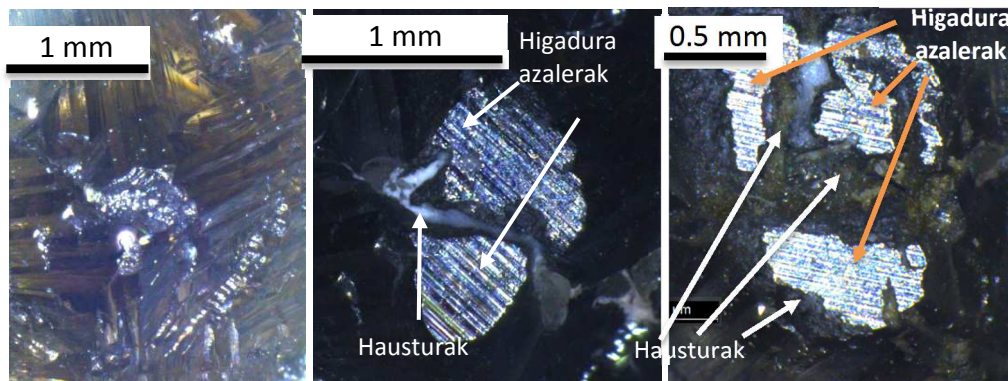


3-93. irudia: D14 diamantagailuaren higaduraren goitiko irudiak 600. eta 900. iraganaldietan.

D10 diamantagailuarekin lortutako emaitzak aztertzen hasi baino lehen (ikus 3-94. irudia), esan beharra dago haren hasierako gainazalaren akabera ez zela batere ona: oso irregularra zen, pitzadura dezenterekin (3-95. irudian, ezkerrean). Lortutako adierazle kurbak 400. iraganaldian du lehen punta balio garrantzitsua, eta esan daiteke bat datorrela diamantagailuaren puntaren A_f azaleraren aldaketarekin. 300. iraganaldiari dagokion aurretiko ikuspegian (3-95. irudian, erdian), garbi asko ikus daitezke hausturak eta urraduraz beteriko bi kontaktu azalera. Diamantearen higadura maila handituz doa, 800. iraganaldira iritsi arte, eta tartean beste haustura batzuk gertatzen dira; 700. iraganaldiko irudian, ez da argi ikusten haustura berezirik gertatzen den K_A kurbaren punta balioa azaltzeko (irudi nahiko iluna). 900. iraganaldiaren ondoren ateratako argazkian, ordea, argi eta garbi ikusten da diamantagailuaren haustura maila oso handia dela eta diamantea erabat suntsituta dagoela, 975. iraganaldiari dagokion punta balioak ondo adierazten duen bezala K_A kurban.



3-94. irudia: D10 diamantagailuaren puntaren A_f aurretiko kontaktu azalera, b_d kontaktu luzera eta K_A kurba adierazlea.

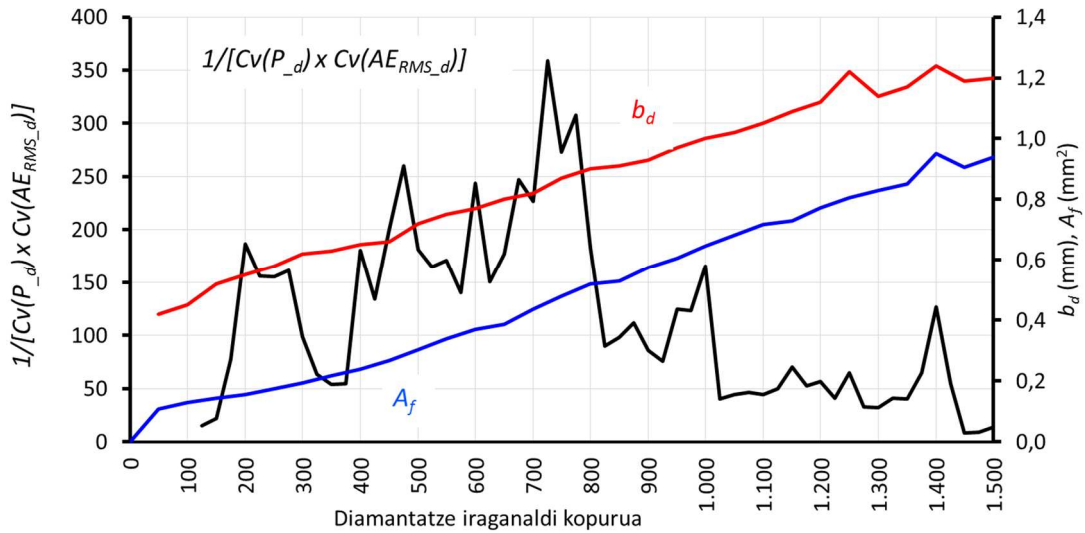


3-95. irudia: D10 diamantagailuaren higaduraren aurretiko irudia hasieran, 300. iraganaldiaren eta 700. iraganaldiaren ondoren.

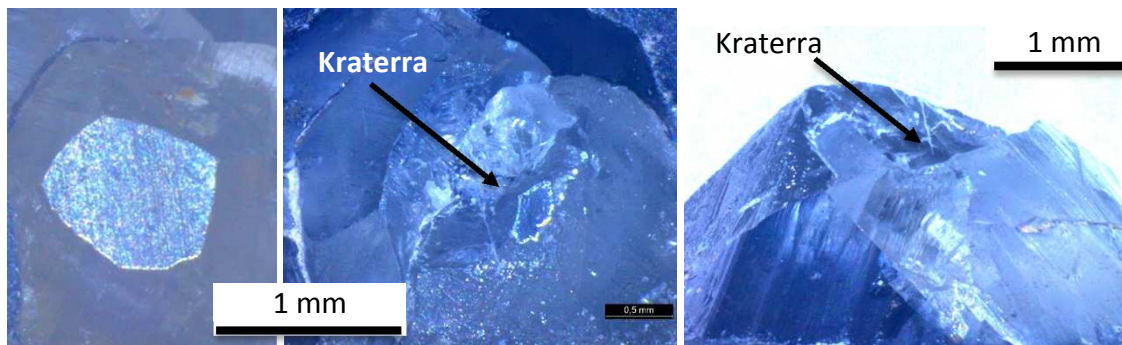
Azkenik, D11 diamantagailuarekin egindako proba esperimentaletan lortutako emaitzen berri emango da (3-96. irudia). Kasu horretan, beste etxe bateko artezarria erabili da, baina ez dago kodifikazio aldetik, behintzat, alde nabarmenik (ikus 3-13. taula). Lan baldintzen aldetik, esan behar da aurreko kasu guztietan erabilitakoak baino dezente arinagoak direla 10 μm -ko diamantatze sakonerarekin eta 30 mm/min-ko aitzinamendu abiadurarekin.

Lortutako K_A kurba adierazleak ez du informazio garbirik ematen, ez baita punta balio garbirik ageri. Bestalde, A_f eta b_d kurbek igoera joera lineala erakusten dute probaren hasieratik bukaeraraino. Azkenik, diamantearen higaduraren argazkiak aztertuz gero, ikus daiteke puntaren higadura oso progresiboa dela 1.450. iraganaldira iritsi arte, non diamantearen punta erabat deuseztatzen den, argi eta garbi diamantearen biziraupenaren amaiera adierazita (3-94. irudia). Entsegu honetan, kasualitatez, 1.500 iraganaldi burutu

dira, baina gertaera hori ez da K_A kurban islatu. Halere, emaitzetan garbi ikusten da diamantagailu horrek duela biziraupenik luzeena orain arte probatutako diamantagailuen artean.



3-96. irudia: D11 diamantagailuaren puntaren A_f aurretiko kontaktu azalera, b_d kontaktu luzera eta K_A kurba adierazlea.



3-97. irudia: D11 diamantagailuaren higaduraren aurretiko irudia 900. eta 1.450. iraganaldien ondoren, eta goitiko irudia 1.450. iraganaldiaren ondoren.

Egindako entseguetan lortutako K_A kurbako punta balioak jarraian dauden 2 edo 3 neurketen ostean gertatzen dira, eta anplitudea 3 eta 10 arteko faktoreagatik biderkatzen da (ikus 3-14. taulan); batez beste, 5 aldiz biderkatzen da balioa jarraian dauden bi balioen artean. Halere, punta balio horiez gain, badira K_A kurbaren beste igoera batzuk ere, anplitudea txikiagokoak izan arren, aurreko balioarekiko ehuneko berean hazten direnak (ikus 3-91. irudian hasierako iraganaldietako igoerak). Kasu horietan, potentzia kurbaren jarraipena egitea oso lagungarria izan daiteke, igoera fasearen bukaera noiz gertatzen den zainduta.

3-14. taula: : Kurba adierazlearen puntako balioak.

	D1	D2	D3	D4	D14	D10	D11
Oinarrizko balioa	468	325	1.013	156	134	145	----
Puntako balioa	4.500	1.441	9.680	730	558	429	----
Anplitude igoera	9,7	4,4	9,5	4,7	4,16	2,95	----
Diamantatze ziklo kopurua	3	2	2	2	2	2	----
Batez besteko igoera 2 iraganaldi artean	4,85	4,4	9,5	4,7	4,16	2,95	----

Egindako azterketa honen ondorio gisa esan daiteke P_d eta AE_{RMS} balioen aldakortasun koefizienteetan oinarritutako K_A kurba adierazlea erabilgarria dela diamantearen higaduraren eta material hausturen berri emateko eta, azken finean, diamantearen biziraupenaren amaiera ezagutzeko. Etorkizuneko ikerketa ildo bezala diamantearen biziraupena identifikatzeko prozesu automatizatua garatzea proposatzen da.

4.Kapitulua

Diamantatze prozesuaren azterketa termiko teoriko-esperimentalak eta hozgarririk gabeko diamantatze ekologikoari buruzko proposamena

4. DIAMANTATZE PROZESUAREN AZTERKETA TERMIKO TEORIKO-ESPERIMENTALA ETA HOZGARRIRIK GABEKO DIAMANTATZE EKOLOGIKOARI BURUZKO PROPOSAMENA

Aurreko bi kapituluetatik, bi ondorio garrantzitsu lortu dira: punta bakarrek diamantagailuaren higadura eta haustura, nagusiki, mekanismo termiko zein mekanikoen eraginez gertatzen dela, batetik; eta, bestetik, diamantagailuen biziraupenaren amaiera, hau da, diamantagailuaren eta artezarriaren arteko kontaktu azaleraren hazkunde linealaren muga, diamantatze prozesuko potentziaren eta soinu igorpen seinaleen arteko erlazio matematiko-estatistiko baten bidez defini daitekeela.

Kapitulu honen helburua diamantatze prozesuaren azterketa termikoa gauzatzean datza, diamantearen higaduraren eta jasandako tenperatura maximoaren arteko erlazioa aztertuta. Entsegu esperimentalak sekzio konstante eta punta bakarrek diamantagailuekin egin dira, higaduraren ondorioz diamantagailuaren eta artezarriaren arteko kontaktu azalera ahalik eta konstanteen mantentzeko. Horrez gainera, eroankortasun termiko desberdineko bi material (altzairua eta kobrea) erabili dira diamantagailuaren euskarri gisa (doktoretza tesi honetan diseinatu eta fabrikatutako euskarriak), diamantatze prozesuan diamantagailuan barreiatutako bero kantitatearen ondorioz euskarriek diamantagailuaren egoera termikoan izan dezaketen eragina aztertzeko asmoz.

Bestalde, artezketa prozesuak (bere osotasunean) erabiltzen duen hozgarri kopurua kontuan hartuta, ondorio oso kaltegarriak izan ditzake, bai ingurumenean, bai gizakiengan. Prozesua ekologiko bihurtzeko saiakera batzuk egin dira artezketa zikloan erabilitako hozgarri kantitatea gutxituz (Minimum Quantity of Lubricant - MQL teknologia) edo kenduz, baina hori ez da nahikoa; diamantatze zikloetan ere gauza bera egin beharko litzateke, orokorrean, erabilitako hozgarri kopurua ahalik eta gehien murrizteko.

Atal honetan, kobrezko euskarria eta Vortex tutu bidez sortutako haize hotzeko hozgarri sistema erabiliz, altzairuzko euskarria eta hozgarri likidua erabiliz lortuko liratekeen emaitza oso antzekoak lortu dira diamantagailuaren higadurari dagokionez, industrian erabilgarri izan litekeen teknika berria proposatuz; gaur egun bibliografian aurki daitekeen irtenbide bakarrenetakoa da.

4.1. DIAMANTATZE PROZESUAREN AZTERKETA TERMIKO ESPERIMENTALA

4.1.1. Sarrera

Esan bezala, aztertutako bibliografiaren arabera, diamantagailu edo diamanteek jasaten duten higaduraren eta hausturen iturburua diamantagailuen eta ale urratzaileen arteko talka ugarien ondorioz sortutako karga termikoetan eta mekanikoetan aurkitzen da. Kapitulu honetan, karga termiko eta mekaniko hauek diamantearen higaduraren eboluzioan nola eragiten duten aztertzeko egindako entsegu esperimentaletan lortutako emaitzen berri emango da: artezarri buruaren potentzia kontsumoa diamantatze prozesuan, diamantagailuen higaduraren azterketa sakona ekorketako mikroskopia elektroniko bidez (*Scanning Electron Microscopy – SEM*), diamantearen grafitizazio azterketa X izpien difrakzio bidez, elementu finitu bidezko simulazio termikoa, diamantagailuaren puntaren tenperatura neurketak eta arteztutako piezaren gainazal akabera, besteak beste.

Diamantagailuaren puntaren tenperatura neurketari dagokionez, bi koloreko pirometro neurgailua erabili da diamantagailuaren eta artezarriaren arteko talka azaleratik ahalik eta gertuen dagoen puntu bateko tenperatura jasotzeko (beti ere, diamantearen gainazalean). Teknika horrek lehorreko baldintzetan lan egitea eskatzen duenez, hau da, hozgarri likidorik gabe, diamantatze probak hozgarririk gabe egin dira; baldintza horrek, gainera, diamantearen higadura bizkortzen du, entseguen iraupena laburtuz eta entsegu gehiago egiteko aukera emanez.

Hasiera batean ohikoa den diamantatze prozesua aztertu da, diamantearen euskarri altzairuzko egitura metalikoa erabiliz. Jarraian, berriz, diamanteak jasaten duen karga termikoa gutxitzeko helburuarekin, eroankortasun termiko handiagoa duen materiala erabili da euskarriko material gisa, kobrea kasu honetan.

4.1.2. Ohiko diamantatze prozesuaren azterketa termikoa altzairuzko euskarriarekin.

Esan bezala, lehen entsegu esperimentalak altzairuzko euskarriarekin egin dira, jarraian zehazten diren lan baldintza eta tresneria erabiliz.

4.1.2.1. Entseguen deskribapena eta jarraitutako prozedura

Diamantagailuen azterketa termikoa bi lan baldintza desberdinetan egindako diamantatze entseguen hasi da: bata, arina, a_d eta S_d balio txikiekin (15 μm eta 0,15 mm/bira, hurrenez hurren); eta, bestea, bortitzagoa, a_d eta S_d balio handiekin (30 μm eta 0,5 mm/bira, hurrenez hurren) (ikusi 4-1. taula). Definitutako lan baldintza horiek ohikoak dira industria munduan (Graf, 2011) aluminazko harriein lan egiteko, eta asko gerturaten dira artezketarekin loturik literatura zientifikoan aurki daitezkeen lan parametroetara, Linke eta Klocke-k (2010) erabilitakoak adibidez.

Entsegu bakoitzean 400 diamantatze iraganaldi gauzatu dira (bata bestearen atzetik jarraian) diamantagailuaren higadura handiagoa lortu eta lan baldintzen arteko higadura maila desberdina hobeto bereizteko asmoz. Azkenik, entsegu bakoitza hirutan errepikatu da, prozesuaren errepikakortasuna aztertzeko.

4-1. taula: Diamantatze prozesuko lan baldintzak altzairuzko euskarriarekin.

Entsegu zenbakia	1	2
a_d (μm)	15	30
v_d (mm/min)	204	679
U_d	5,5	2
Hozgarria	Ez	Ez

3.3.3. atalean eginiko proba esperimentaletan diamante naturalezko punta bakarrek diamantagailuak erabili dira (4-1. irudiko ezkerrean), hain zuzen ere, diamantagailu mota horiek batetik bestera duten geometria desberdinak higaduran izan dezakeen eragina aztertzeko asmoz; izan ere, prozesuko aldagai bakarra diamantagailuen puntako geometria izan da. Kasu honetan, ordea, ez da komeni higaduraren ondorioz geratutako

diamantagailuaren geometria aldaketarik gertatzea, a_d diamantatze sakonera eta S_d (edo U_d) baitira prozesuko aldagaiak.

Beraz, lurrun faseko jalkitze kimiko bidez (CVD) sortutako eta sekzio konstanteko diamante kristal anitzekoak erabili dira (*Element Six* etxeko CVDRESS CDD L401515 erreferentziako diamantagailuak) (4-1. irudiko eskuinaldean). Horiek $1,5 \times 1,5 \times 4 \text{ mm}^3$ neurriko geometria paralelogramoa dute (b_d kontaktu luzera teorikoa $1,5 \text{ mm}$ -koa da) eta euskarri beharra dute lan egiteko. Proba hauek egiteko 4-2. irudian ageri den *ad hoc* diseinatutako altzairuzko euskarria fabrikatu da.



4-1. irudia: Diamante naturalez eginiko diamantagailuak (ezkerraldean) eta sekzio konstanteko kristal anitzeko diamantagailuak (eskuinaldean).

Entsegu bakoitzerako diamante berri bana erabili denez, neurketak gauzatu aurretik diamantatze ziklo batzuk egin dira diamantearen puntako geometriak harriaren forma har dezan eta, horrela, proba guztiak ahalik eta baldintza berdintsuetan egin ahal izateko. Diamantearen puntak, berriak direnean, ez dute geometria erabat laua izaten kasu askotan, eta, artezarriarekin izan lezaketen kontaktu azalera desberdina izan liteke kasu batetik bestera, prozesuari ziurgabetasuna atxikiz. Eragiketa hau potentzia neurgailuarekin eta makinaren pantailan bistaritzen den soinu igorpenen seinaleen egonkortasun maila kontrolatuz gauzatu da.

Aipatzekoa da, era berean, entsegu hauetan erabilitako artezarria UNESA etxeko aluminazko CBL70J7V489 erreferentziadun artezarria izan dela, kodifikazioz behintzat aurreko entseguetan erabilitakoaren oso antzekoa (ABRASIVOS DRAGAO etxeko 82AA70J6VW artezarria).

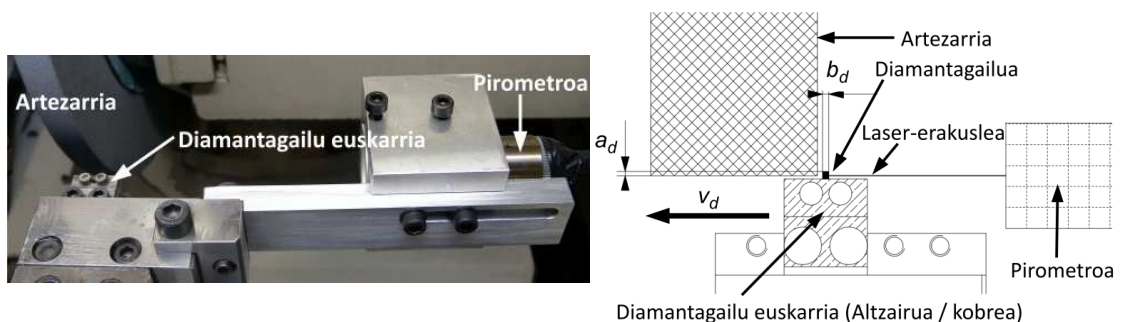
Instrumentazioari dagokionez, potentzia neurgailua ez ezik (aurreko probetan erabilitako bera da), beste hauek ere erabili dira diamantearen puntaren tenperatura jaso eta

diamanteak jasandako higaduraren azterketa sakonagoak egiteko. 4-2. taulan daude laburbilduta entseguetan erabilitako erreminta eta instrumentuak.



4-2. irudia: Altzairuzko diamante euskarria eta euskarriaren kokapena makinan.

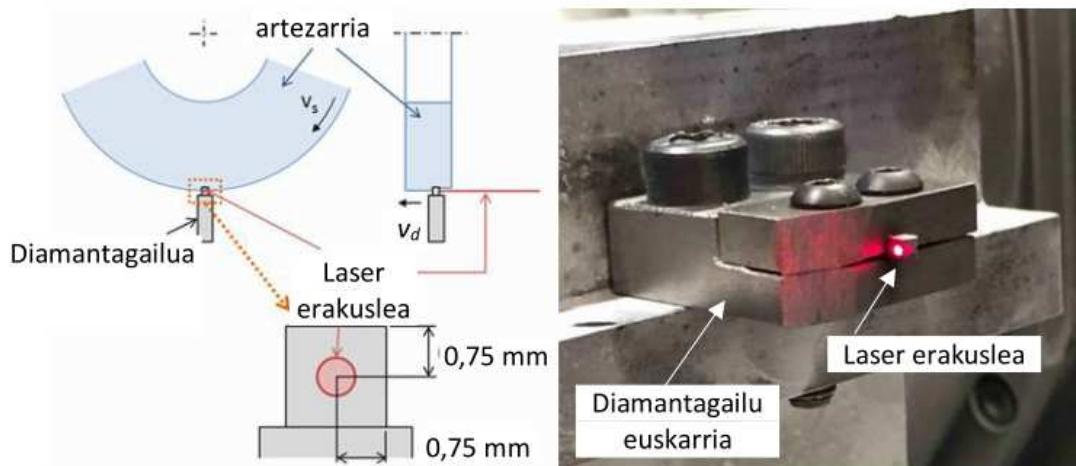
- **Diamantagailuaren azterketa topografikoa:** diamantagailuaren higadura LEICA mikroskopiaarekin baino xehetasun handiagoarekin aztertu ahal izateko, diamante laginak EHUren SGIKER laborategiko ekorketako mikroskopia elektroniko (SEM) makinan aztertu dira (JEOL etxeko JSM-6400 modelo); makina horrekin 250 aldiz handitutako irudiak atera ahal izan dira, aurrerago ikusiko den bezala, emaitza interesgarriak lortuz.
- **Temperatura neurgailua bi koloreko pirometro bidez:** Diamantearen gainazalaren temperatura maximoa neurtzeko, IMPAC etxeko IGAR 12-LO bi koloreko pirometroa erabili da (4-4. irudia). Lan esparrua 623-1.523 K-ekoa duenez, eskaintzen duen doitasuna K-tan irakurritako balioa gehi 1 K da eta 18,5 Hz-eko laginketa maiztasunarekin erabili da. Pirometroa makinan behar bezala kokatzeko, euskarri berezia diseinatu eta fabrikatu da (4-3. irudia). Temperatura neurriak diamantagailuaren puntatik 0,75 mm distantziara dagoen puntuan jaso dira 0,6 mm diametroko laser erakusle bidez eta $\pm 0,2$ mm-ko doitasunarekin (ikusi 4-5. irudia).



4-3. irudia: Diamantagailu euskarria makinan muntatuta eta temperatura neurtzeko muntaia pirometro bidez.



4-4. irudia: IMPAC etxeko IGAR12-LO pirometroa.



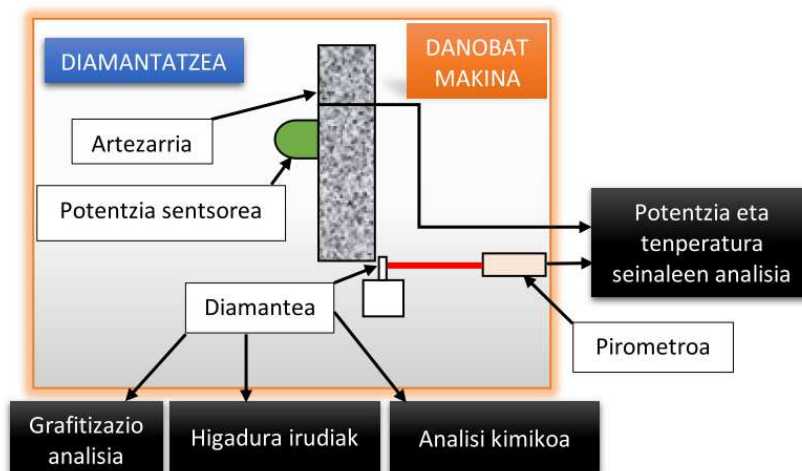
4-5. irudia: Pirometroaren laser erakuslea diamantagailuaren puntan jarrita neurketa egiteko.

- **Diamantearen azterketa kimikoa:** diamantatze prozesuaren ondoren diamantean agertzen diren arrastoak ezagutzeko EDX espektroskopia bidezko azterketa kimikoa gauzatu da Oxford Instruments etxeko INCA Energy 350 makinarekin.
- **Diamantearen grafitizazio azterketa:** jasandako tenperatura altuen ondorioz ale urratzaileekin kontaktuan dauden diamantearen azaleretan grafito bilakaerarik gertatu den egiaztatzeko X izpien difrakzio bidezko analisia egin da EHUren SGIKER laborategian PANalytical etxeko Xpert PRO makinan.

Ondorengo irudian (4-6. irudia) eskema moduan ageri da egindako proba esperimentalen konfigurazioa.

4-2. taula: Entseguetan erabilitako erreminta eta instrumentazioa.

Makina	DANOBAT FG-600-S makina
Diamantea	1,5 x 1,5 x 4 mm ³ neurriko kristal anitzeko diamanteak
Artezarria	Aluminazko CBL70J7V489 artezarria.
Pirometroa	Bi koloretako pirometroa
Potentzia neurgailua	Potentzia neurgailua
Diamanteen azterketa topografikoa	SEM - Ekorketako mikroskopia elektroniko
Grafitizazio analisia	X izpien difrakzioa
Azterketa kimikoa	EDX - Espektroskopia bidezko azterketa kimikoa



4-6. irudia: Proba esperimentalak egiteko erabilitako tresneria eta konfigurazioa.

4.1.2.2. *Emaitzak eta lehen ondorioak*

4.1.2.2.1. *Temperaturaren neurtzea*

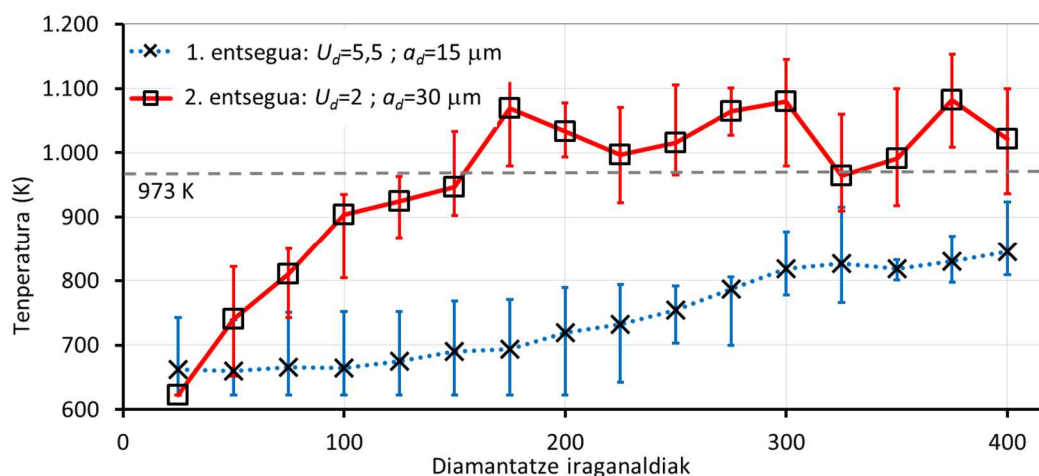
Lehenik eta behin, diamantagailuaren puntan neurtutako temperaturen kurba azalduko da (4-7. irudia). Aurrez, esan beharra dago, seinale osoa (400 diamantatze iraganaldi guztira) 25 iraganaldiko tartetan banatu dela eta soilik tarte bakoitzeko azken 5 temperatura balioak hartu direla kontuan, oro har, ziklo bakoitzeko temperatura maximoak. Egin diren hiru entseguetarako gauza bera eginez, 15 temperatura balio erabili dira une bakoitzeko temperatura maximoen batezbestekoa eta dispersioa kalkulatu eta diamantearen puntaren temperatura eboluzioa osatzeko.

Lan-baldintza gogorrenarekin (2. entsegua) lortutako emaitzen azterketa termikoari dagokionez, kurbaren hasierako 175 iraganaldietan temperatura igoera fasea dago,

pirometroak neurtu dezakeen balio minimotik hasi (623 K) eta kasik 1.100 K arte, hau da, diamantagailuaren grafitizazio tenperatura mugaren gainetik (973 K) (Linke eta Klocke, 2010; Wegener et al., 2011). Jarraian, entsegua bukatu arte (175 iraganalditik aurrera), batez besteko tenperatura 1.000-1.100 K balioen tartean mantentzen da maximo eta minimoen arteko 244 K-eko anplitudearekin. Lan baldintza hobeeekin egonkortasun termikoaz hitz egin ahal izango litzateke, baina fase honetan grafitizazio tenperatura aise gaituta dagoela kontuan izanik eta, 4-8. irudian ikus daitezkeen bezala, diamanteak higadura eta haustura seinale nabarmenak dituela, ezin da esan prozesu egonkorra denik.

Lehen entseguko lan baldintzekin neurtutako tenperatura maila dezente txikiagoa da, aurrekoari dagokionez. Batez besteko balio minimoa 660 K-ekoa eta maximoa 846 K-ekoa izanik, entsegu osoan neurtutako balio maximoa 924 K-ekoa izan da (azken 25 diamantatze zikloari dagokiona); teorian, beraz, ez litzateke grafitizazio arazorik izan behar diamantagailu hauekin. Tenperaturaren goranzko joera oso garbia da 300 iraganaldira iritsi arte eta, hemendik aurrera, nahiko egonkor mantentzen da bukaera arte, agian, sistemak (diamantea, euskarria, artezarria eta ingurunea) lortutako egonkortasun termikoaren seinale.

Kasu honetan beste ziurgabetasun faktore bat gehitzen zaio prozesuari, izan ere, lehen 200 iraganaldietako neurketa batzuetan ez da pirometroak neurtzen duen tenperatura minimoa gaitutu, eta ezin da jakin zein izan den benetako tenperatura balioa neurketa horietan.



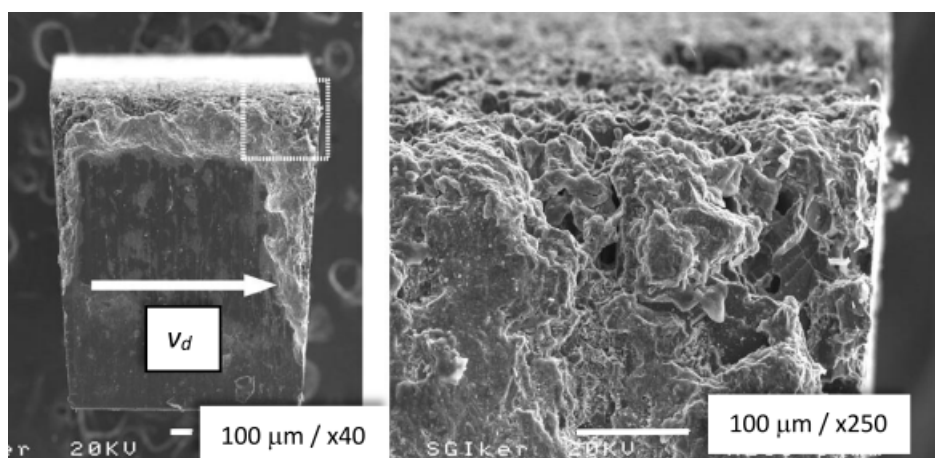
4-7. irudia: 1. eta 2. entseguetan neurtutako diamantagailuaren puntaren tenperatura maximoen batezbestekoa altzairuzko euskarriarekin.

Ziurgabetasun faktore eta dispersio balioez gain, lortutako kurbek argi erakusten dute zein den tenperaturaren joera lan baldintza bakoitzean, bigarren entseguan (lan baldintza gogorragoak) lehen entseguan baino tenperatura nabarmenki altuagoak izanik.

Esan liteke bi entseguen arteko tenperatura diferentzia lan baldintzen arteko desberdintasunagatik dela: bigarren entseguan, S_d aitzinamendu abiadura eta a_d diamantatze sakonera handiagoarekin, diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talka kopurua handiagoa da, lehenengoarekin alderatuz, eta, ondorioz, aleen apurketa ugariagoa eta askatutako bero-energia ere handiagoa. Halere, bi entsegu horiekin ezin da zehaztu zeinek duen eragin handiagoa tenperaturaren, U_d edo a_d -k, baina erabilitako lan baldintza eta diamantagailuak jasandako karga termikoen arteko lehen erlazio bat aztertzeko nahikoa da eta bat datoz, gainera, bibliografiako ikerketekin; aurrerago (4.1.3. atalean), apur bat sakonago landuko da bi aldagai horiek duten eragina tenperaturaren, baita diamantatze prozesuko potentzian ere.

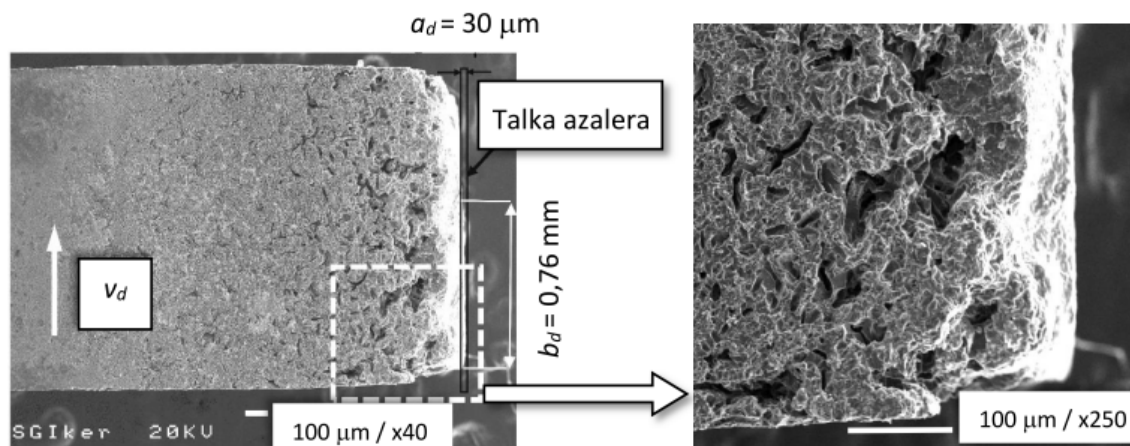
4.1.2.2.2. *Diamanteen higaduraren eta grafitizazioaren azterketa*

Altzairuzko euskarriarekin grafitizazio tenperaturaz gainera tenperatura balioak lortu izanik bigarren entseguan, diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko etengabeko talken ondorioz diamantearen higadura eta apurketa maila oso kezagarria dela esan liteke, diamantearen bizi iraupenari dagokionez. Erakusgarri, ondorengo irudietan altzairuzko euskarriarekin erabilitako diamantearen aurretiko (4-8. irudia) eta goitiko (4-9. irudia) SEM irudiak azaltzen dira.



4-8. irudia: : Altzairuzko euskarriarekin erabilitako diamantearen aurretiko SEM irudiak, diamante osoa ezkerrean eta xehetasuna eskuinean.

4-9. irudian (ezkerraldean) nahiko ongi bereiz daitezke talka azaleraren murrizketa diamantearen puntako higaduraren eta hausturen ondorioz; izan ere, b_d talka zabalera 1,5 mm-koa izatetik diamante berrian, 0,76 mm-koa izatera pasatu da (NX CAD sistema bidez egin da neurketa +/- 0,05 mm-ko doitasunarekin).



4-9. irudia: Altzairuzko euskarriarekin erabilitako diamantearen goitiko SEM irudiak, diamante osoa ezkerrean eta xehetasuna eskuinean.

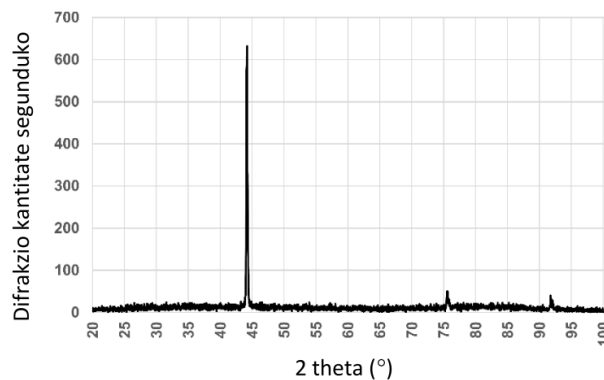
Diamantearen puntaren tenperatura altuen eta diamantearen higaduraren ondorioz bi gertaera kontrajarri gerta daitezke, diamantatze prozesua termikoki zein mekanikoki ezegonkor bihur dezaketenak. Alde batetik, kontaktu azalera txikiagotzeak diamantearen eta ale urratzaileen arteko talka kopurua murriz dezake, diamantatze prozesuko tenperatura maila jaitsiarazita (Linke eta Klocke, 2010). Bestetik, ordea, tenperatura altuen eraginez altzairuaren eroankortasun termikoa txikiagotu egiten da, 273 K-eko 74 W/m·K-etik 1.200 K-eko 27 W/m·K-era (ikus 4-3 taula); horren ondorioz, euskarrian zehar barreiatutako bero kantitatea txikiagotu eta diamantean metatutako bero kantitatea handitu egiten da; eta, horrekin, tenperatura maila ere bai. Horiek izan daitezke arrazoiak tenperaturaren kurban (4-7. irudia) 175. iraganalditik aurrerako gorabeherak ulertzeko.

Diamantean grafitizazioa gertatzen den tenperatura teorikoa (973 K), entsegu hauetan lortutako tenperatura maximoak eta diamantearen higatutako irudiak (4-9. irudiko eskuinaldea) zeharkako nabaritasunak dira diamantearen zona batzuk (esklusiboki diamantearen eta artezarriaren arteko kontaktu azalera inguruan) grafito bihurtu direla baieztatzeko. Beraz, grafito abarren baten presentzia bilatzeko, diamante lagina hartu eta X izpien difrakzio bidezko azterketa egin da EHUren SGIKER laborategian.

4-3. taula: Altzairuaren k eroankortasun termikoa tenperaturaren arabera (eFunda, 2016).

Temperatura (K)	300	800	1.000	1.200
k (W/m·K)	74	42	32	27

X izpien difrakzio diagramak argi eta garbi erakusten du ez dagoela grafito aztarnarik (4-10. irudia), 20° – 100° tartean puntako 2θ difrakzio angelu balio bakarra $43,91^\circ$ difrakzio angeluan gertatzen baita, eta diamanteari dagokio. Grafito aztarnaren bat balego $26,38^\circ$ difrakzio angeluan, bestelako punta balioa azalduko litzateke.



4-10. irudia: Altzairuzko euskarriarekin erabilitako diamantearen X izpien difrakzio diagrama.

Halere, litekeena da grafitizazioa gertatu izana; ordea, grafitoaren ezaugarri mekanikoak diamantearenarekin alderatuta askoz txikiagoak izanik, diamantearen eta artezarriaren arteko talken ondorioz, litekeena da birrindu eta artezarriaren hautsarekin batera kanporatuak izatea.

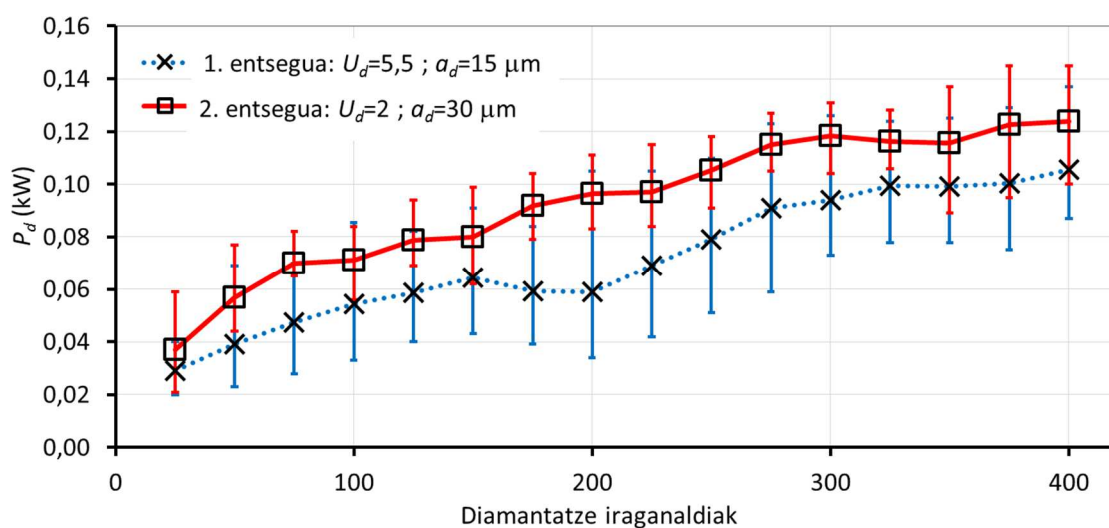
Diamantearen EDX espektroskopia bidezko azterketa kimikoa egin da eta emaitza bera lortu da, hots, aluminazko artezarrietan ohikoak diren Al, Si, K eta Ca osagaien arrastoak aurkitu dira.

4.1.2.2.3. *Diamantatze prozesuko P_d potentzia*

Diamantatze potentzia ere neurtu da entsegu guztietan eta jarraian ageri den 4-11. irudian ikus daiteke izan duen eboluzioa. Esan beharra dago, berriro ere, balio hauek diamantatze prozesuari soilik dagozkiola, artezarri buruan egindako potentzia kontsumoaren neurketari hutsean kontsumitzen duen potentzia kendu baitzaio; beraz, benetako potentzia da. Bestalde, potentzia neurgailu bidez jasotako seinalea prozesatu eta balioak irakurtzeko

aurreko atalean erabilitako seinale prozesatzaile bera erabili da; irakurketetan izandako akatsa % 3-koa baino txikiagoa da.

Altzairuzko euskarriarekin bi entseguetan lortutako kurbak (4-11. irudia) oso antzekoak izanik (entsegu bakoitza 3 aldiz errepikatuz), bigarren entseguan lortutako balioak lehenengoan lortutakoak baino apur bat altuagoak dira, batez beste % 33; kasu horretan ere, temperatura emaitzen azterketan esan den bezala, lan baldintzak gogortzearekin batera, diamantearen eta ale urratzaileen arteko talka maiztasunaren handitzearen ondorioz, potentzia ere handitu egiten da.



4-11. irudia: 1. eta 2. entseguetan neurtutako potentzia maximoen batezbestekoa altzairuzko euskarriarekin.

Potentzia kurben eboluzioari dagokionez, 300 diamantatze iraganaldira arte batez besteko potentzia balioaren igoera joera nabari da (bi kasuetan % 200-ekoa ingurukoa) eta hortik aurrera egonkortze fasea dagoela esan liteke 0,08 eta 0,14 kW balioen artean; temperatura kurben joera ere oso antzekoa dela ikusi da aurreko azterketan, baina kasu honetan lan baldintza gogorrekin (bigarren entsegua) jasandako temperatura igoera % 73-koa da hasierako eta bukaerako iraganaldien artean eta % 27-koa bakarrik lehen entseguko baldintzekin neurtutakoa (ikusi 4-7. irudia). Beraz, esan liteke potentzia kontsumoaren eta diamantagailuan neurtutako tenperaturaren artean badela erlaziorik, baina lan baldintza berdinetan jasandako portzentajezko igoerak ez direla berdinak batean eta bestean.

Aipatzekoa da, era berean, batez besteko balioen kurbak bata bestearengandik nahiko ondo bereizita ageri diren arren, neurketen dispersioa nahiko handia izan dela, batez ere

lehen entseguan, non % 39-ko aldakortasun koefizientea neurtu den; balio oso handiak diren arren, esan behar da, batez ere, hasierako iraganaldietan neurtutako potentzia balioak txikiak direla (0,02 eta 0,10 kW tartean) eta, ondorioz, neurketa diferentzia txikienek ere eragin handia dutela disipertsio balioan. Bigarren entseguan, batez besteko aldakortasun koefizientea % 7-koa izanik, azken iraganaldietakoa zertxobait handiagoa da, % 17-koa, ziur aski, prozesuaren ezegonkortasunaren ondorio.

Altzairuzko euskarriarekin hozgarririk gabe egindako diamantatze ziklo hauetan diamantagailuaren puntan neurtutako tenperatura altuak ikusirik (batez ere, bigarren entseguan), esan liteke diamantatze prozesuan sortutako bero kantitatea ez dela behar bezala barreiatzen diamantetik euskarrira eta hemendik makina egiturara. Honen ondorioz, diamanteak jasandako karga termikoak eta mekanikoak handiak dira eta jasandako higadura eta apurketa maila altua 4-8. eta 4-9. irudietan ikusi den bezala. Kontuan izanik diamantearen eroankortasun termikoa altzairuarena baino askoz ere handiagoa dela (ikus 4-3. eta 4-4. taulak), ondoriozta liteke euskarria dela oztupoa beroaren garraioan. Beraz, diamantagailuaren puntaren tenperatura maximoa jaisteko asmoz eta, ondorioz, diamantearen higadura maila murrizteko asmoz, gomendagarria litzateke euskarrian altzairuak baino eroankortasun termiko handiagoa duen beste material bat erabiltzea.

Ondorengo atalean, altzairuzko euskarriarekin erabilitako lan baldintza berberak aplikatuz, kobrezko euskarria erabiliz gauzatutako entsegu esperimentaletan lortutako emaitzak aztertuko dira.

4.1.3. Lehorreko diamantatze prozesu berri bati buruzko proposamena kobrezko euskarriarekin

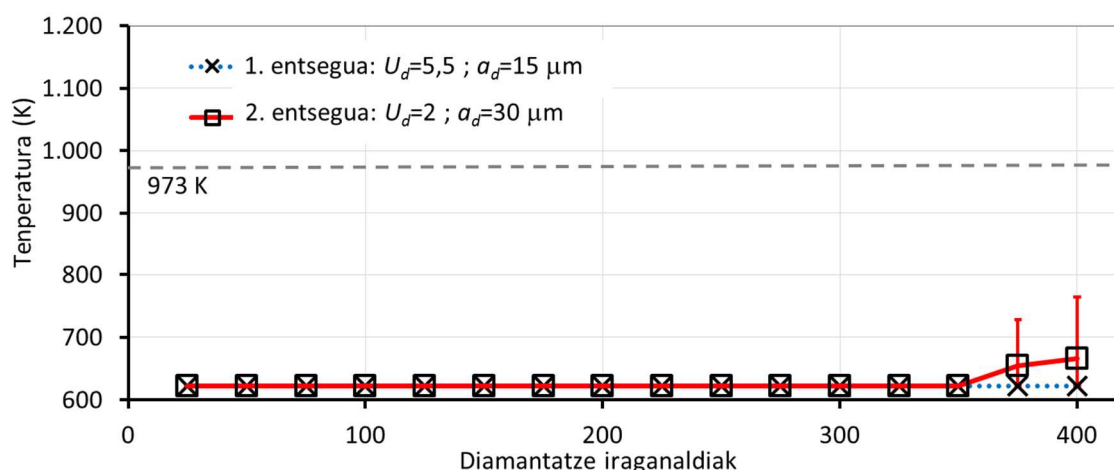
Kobreak altzairuak baino eroankortasun termikoaren koefiziente handiagoa du (konparatu 4-3. eta 4-4. taulak, hurrenez hurren) eta, beraz, esan liteke kobrezko euskarriak diamantearen puntan sortutako bero kantitatea euskarrian zehar barreiatzeko ahalmen handiagoa duela, diamantearen puntak jasan beharreko tenperatura eta higadura maila txikiagotuta. Hipotesi hori baieztatzeko aurreko lan baldintza berak erabiliz errepikatu dira entseguak, diamanteak kobrezko euskarrian kokatuta.

4-4. taula: Kobrearen k eroankortasun termikoa temperaturaren arabera.

Temperatura (K)	300	800	1.000	1.200
k (W/m·K)	401	366	352	339

Kobrezko euskarriarekin 400 diamantatze iraganaldietan neurtutako temperatura kurba (ikus 4-12. irudia) altzairuzko euskarriarekin neurtutakoarekin alderatuta (4-7. irudia), nabarmena da lehen kasuan temperatura maila askoz ere txikiagoa dela, balio guztiak, bigarren entseguko azken bi neurketetan ezik (655 K eta 667 K, hurrenez hurren), pirometroaren neurketa tarteko balio minimoaren azpitik egonik, hots, 623 K azpitik. Horrek esan nahi du ezin dela jakin iraganaldi bakoitzeko benetako temperatura.

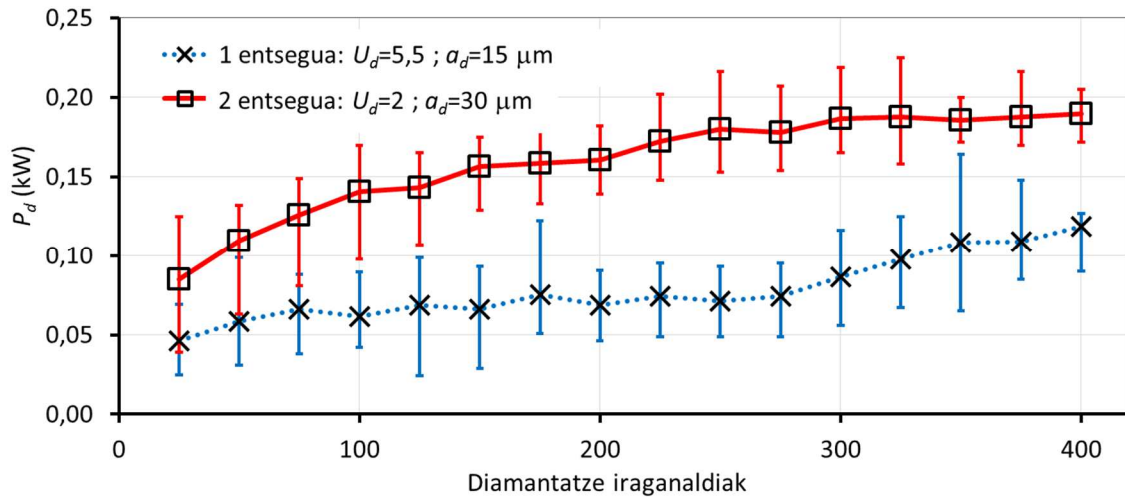
Emitza horien arabera, esan liteke kobrezko euskarriarekin diamantagailuan metatutako bero kantitatea txikiagoa dela eta bere eroankortasun termiko propietateak izan dezakeela eraginik lortutako temperatura baxuan.



4-12. irudia: 1. eta 2. entseguetan neurtutako diamantagailuaren puntaren temperatura maximoen batezbestekoa kobrezko euskarriarekin.

Potentzia kurbaren joera (4-13. irudia) altzairuzko euskarriarekin lortutakoaren oso antzekoa da, hau da, lan baldintza gogorragoekin potentzia maila handiagoa da, lan baldintza bigunagoekin lortutako balioekin alderatuta, batez beste % 107. Aldakortasun koefizienteari dagokionez, berriz, lehen entseguko lan baldintzetan % 28-ko balioa kalkulatu da, altzairuzko euskarriarekin kalkulaturikoa baino txikiagoa; horrek esan nahi du kobrezko euskarriarekin egindako diamantatze prozesua egonkorragoa dela. Baina bigarren lan baldintzetan, batez beste % 16-ko aldakortasun koefizientea kalkulatu da

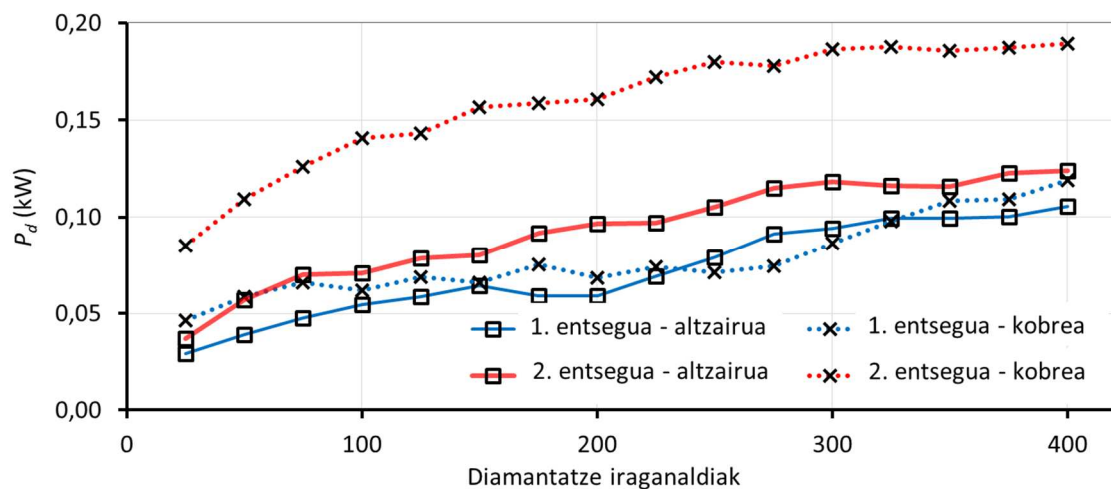
(altzairuarekin, % 7-koa), batez ere, lehen ehun iraganaldietako balioen dispersio handiak eraginda. Azken 200 iraganaldiak kontuan izanez gero, aldakortasun koefizientearen balioa % 9-koa da, altzairuarekin lortutakoaren oso antzekoa.



4-13. irudia: 1 eta 2 entseguetan neurtutako potentzia maximoen batezbestekoa kobrezko euskarriarekin.

Baina, bi emaitzak (altzairu eta kobrezko euskarriekin lortutakoak) bata bestearen gainean irudikatuta, beste modu batera ere uler liteke (4-14. irudia): bigarren entseguan kobrezko euskarriarekin neurtutako potentzia balioak altzairuarekin neurtutakoak baino dezente handiagoak dira, eta lehen entseguan lortutakoak, oster, oso antzekoak. Gertaera horrek bi azalpen izan ditzake.

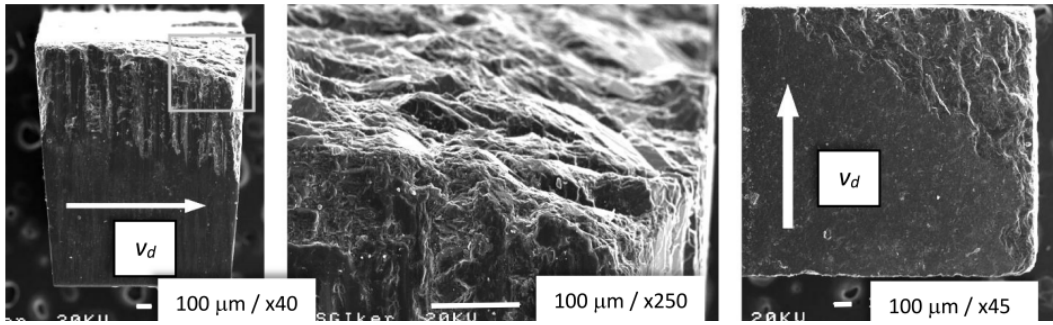
Alde batetik, altzairuzko diamantagailua erabili denean, diamantagailuaren puntaren tenperatura kobrezkoarekin baino dezente gehiago igo dela ikusi da, batez ere, bigarren entseguan, non grafitazio tenperatura erraz gaintu den. Diamantatze prozesuaren egoeraren azterketa egin denean azaldu da tenperatura altuekin (1.000 K-etik gora) diamantearen tentsio maximoa % 30 murriz daitekeela, 100 K-eko tenperaturan izan dezakeenarekin konparatuta (Luque et al., 2008). Beraz, diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talka energia txikiagoa izango da eta, ondorioz, kontsumitutako energia ere bai. Lehen entseguan, berriz, potentzia balioak oso antzekoak dira, altzairuarekin neurtutako tenperatura grafitazioaren azpitik baitago.



4-14. irudia: 1. eta 2. entseguetan neurtutako potentzia maximoen batezbestekoa altzairu eta kobrezko euskarriekin.

Beste aldetik, kontuan izan behar da, kobreaken eroankortasun termikoaren parametroa altzairuarena baino handiagoa izatea abantaila bat izan arren (7-10 aldiz handiagoa temperaturaren arabera 4-3. eta 4-4. tauletan ikus daitezkeen bezala), kobreaken dilatazio termikoaren koefizientea altzairuarena baino handiagoa dela ($17,10^{-6}K^{-1}$ eta $12,10^{-6}K^{-1}$, hurrenez hurren) eta, ondorioz, euskarriak kasu bakoitzean izan dezakeen temperatura banaketaren arabera, kobrezko euskarriak dilatazio termiko handiagoak jasateko arriskua duela. Horrela, dilatazio horien eraginez benetako diamantatze sakonera programatutakoa baino handiagoa izango litzateke egonkortasun termikoa lortu artean, eta sakonera handiago horrek kontsumitutako potentzia handitzea eragingo luke. Beraz, zenbat eta temperatura handiagoa (4-11. irudia), orduan eta bero kantitate handiagoa barreiatuko da euskarriaren, dilatazio termikoa handituz: eta, zenbat eta dilatazio termiko handiagoa, orduan eta diamantatze sakonera handiagoa eta, beraz, potentzia kontsumo handiagoa (4-13. irudia); altzairuzko euskarriaren ere balio dute ondorio horiek.

Kobrezko euskarriarekin erabilitako diamantearen azterketa eginda, ondorengo irudietan ikus daitezke (4-15. irudia) diamantearen material haustura arrastorik ez dela nabari eta higadura soilik jasan duela, bereziki diamantagailuaren goiko eskuineko aldean (ezkerraldeko argazkia), non diamantagailuak ale urratzaile "berriekin" lehendabizikoz talka egin duen. Ez da grafitizazio seinalerik ageri, ez irudietan, ez neurtutako temperatura mailan. Beraz, esan liteke kobrezko euskarriak baduela eragin termikorik, positiboa jakina, diamantearen.



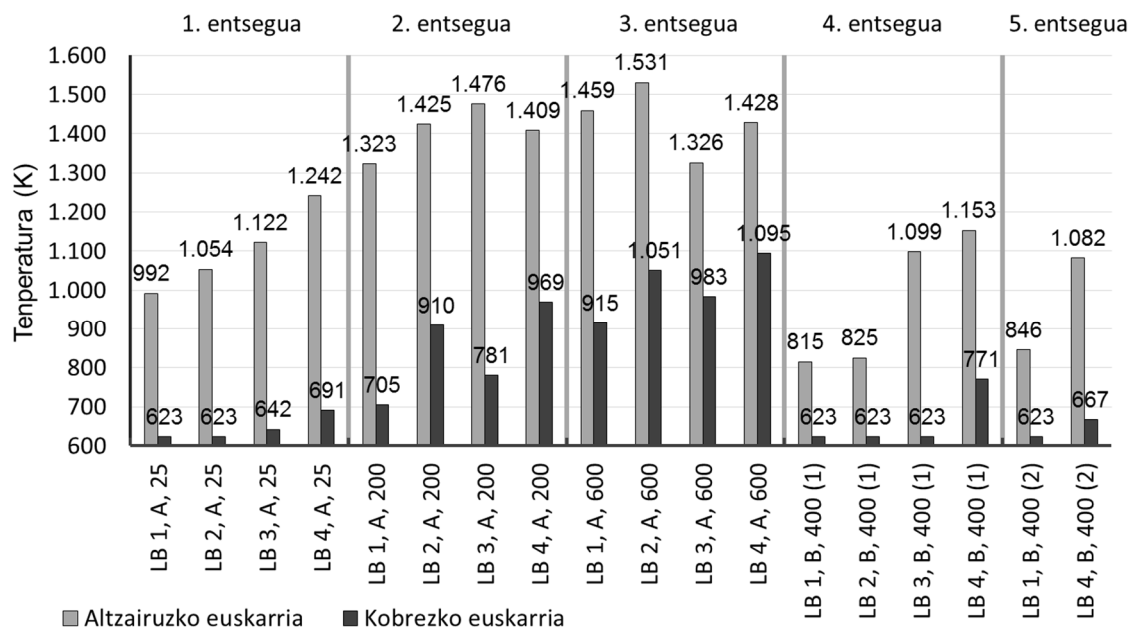
4-15. irudia: Kobrezko euskarriarekin erabilitako diamantearen SEM irudiak

Jarraian, eta era laburragoan, egindako beste diamantatze entsegu batzuetan neurtutako temperatura maximoen azterketa egin da altzairuzko eta kobrezko euskarriak erabiliz. Entsegu hauetan a_d diamantatze sakonera eta v_d aitzinamendu abiaduraz gain, artezarri mota eta diamantatze iraganaldi kopurua ere erabili dira diamantatze prozesuko aldagai gisa, beste lan baldintza batzuekin lortutako emaitza termikoak aurrez aztertutakoekin bat datozen egiaztatzeko. Azken entseguko emaitzak (5. entsegu) atal honetan aurrez azaldutako balioei dagozkie; soilik bi lan baldintza aztertu direnez, berriz ere errepikatu dira probak 4-5. taulan azaltzen diren lau lan baldintzak aplikatuz (laugarren entsegu). Aurrekoetan bezala, 3 aldiz errepikatu da entsegu bakoitza.

4-5. taula: Diamanteen azterketa termikoa burutzeko entsegu gehigarrien datuak.

1. lan baldintza (LB1)	$a_d=15 \mu\text{m}$, $v_d=204 \text{ mm/min}$, $U_d=5,5$		
2. lan baldintza (LB2)	$a_d=15 \mu\text{m}$, $v_d=679 \text{ mm/min}$, $U_d=2$		
3. lan baldintza (LB3)	$a_d=30 \mu\text{m}$, $v_d=204 \text{ mm/min}$, $U_d=5,5$		
4. lan baldintza (LB4)	$a_d=30 \mu\text{m}$, $v_d=679 \text{ mm/min}$, $U_d=2$		
Artezarriak	A: 82AA70J6VW (Dragao Abrasivos Lda.) B: CBL70J7V489 (Unesa S.L.)		
Hozgarririk gabe, lehorrean			
Diamantatze iraganaldi kopurua	25, 200, 400 ^{(1) (2)} , 600		
Euskarriaren materiala	Altzairua eta kobrea		
Entseguak	Lan baldintzak	Artezarria	Iraganaldi kopurua
1	LB1, LB2, LB3, LB4	A	25
2	LB1, LB2, LB3, LB4	A	200
3	LB1, LB2, LB3, LB4	A	600
4	LB1, LB2, LB3, LB4	B	400
5	LB1, LB4	B	400

Taula honetan daude laburbilduta bost entsegu hauetan erabilitako lan baldintzak eta 4-16. irudian, berriz, entsegu hauetako bakoitzean altzairuzko eta kobrezko euskarriekin neurtutako batez besteko tenperaturen grafikoa, bata bestearen ondoan.



4-16. irudia: Entsegu gehigarrietan neurtutako batezbesteko tenperaturen emaitzak.

Lortutako emaitza horiekin hauek dira egin daitezkeen irakurketak. Lehenik eta behin, eta nabariena den emaitza, lan baldintza guztietan kobrezko euskarriarekin neurtutako tenperaturak altzairuzko euskarriarekin neurtutakoak baino txikiagoak direla, batez beste %35 txikiagoak, eta ondorioz diamantean metatutako bero kantitatea txikiago dela.

Jarraian, esan behar da diamantatze iraganaldi kopurua handitzearekin batera (1., 2. eta 3. entseguetan) tenperatura maila ere igo egiten dela, bai altzairuzko, bai kobrezko euskarriekin lan egitean. Hazkunde hori batez beste % 28-koa eta % 30-koa da (altzairu eta kobrezko euskarriekin, hurrenez hurren) 25-etik 200 iraganaldira pasatzean; eta, % 2-koa eta % 21-ekoa 200-dik 600-era pasatzean. Beraz, proportzioan, hazkundera handiagoa da 25-etik 200-era pasatzean. Tenperaturen balio absolutuei dagokienez, ostera, altzairuzko euskarriarekin grafitazio tenperatura aise gainditu da, batez ere, bigarren eta hirugarren entseguetan (1.300 K-etik gora kasu guztietan), eta kobrezkoarekin hirugarren entseguan LB2 eta LB4 kasuetan soilik gainditu da 973 K-eko muga, 1.095 K-eko balio maximoarekin. Datu horiek euskarriaren dilatazioaren ondoriozko diamantatze sakoneraren handitzeak sor dezakeen tenperatura hazkunderaren hipotesia sendotzen du, egonkortasun termiko

egoera lortzen den artean; grafitizazio tenperatura erraz gauditutako kasuetan ezin da ziurtatu egonkortasun termikoa lortzerik dagoen. Dударик gabe, dilatazio termikoak handiagoak dira kobrezko euskarrian dilatazio koefiziente handiagoa duelako, baina, eroankortasun termiko koefizientea ere handiagoa duenez, ahalmen handiagoa du prozesuan sortutako beroa euskarrian barrena makinarantz barreiatzeko, diamantearen puntaren tenperatura maila baxuago mantenduta, altzairuzko euskarriarekin alderatuta.

Bestalde, aipatzekoa da 4. eta 5. entseguetan (400 diamantatze iraganaldi) neurtutako tenperatura maila baxua, aurreko 3 entseguekin konparatuta, batez ere, iraganaldi gutxiago egin diren 1. eta 2. entseguekin. Diamantatze iraganaldi kopuruaz gain, artezarri mota ere aldatu da proba hauen artean: 4. eta 5. entseguetan beste artezarri bat erabili da (CBL70J7V489), erreferentziaz aurrekoetan erabilitakoaren oso antzerakoa (82AA70-9J6VW), baina 3. kapituluan gauzaturiko proba esperimentaletan gertatu den bezala (3.3.3. atala), artezarri honen propietate mekanikoak (B artezarria) dezente ahulagoak dira aurrekoarenak baino (A artezarria), eta hori da 4. eta 5. entseguetako tenperatura emaitzetan berriro ere islatu dena. Laugarren eta bigarren entseguetako datuak konparatuta (400 eta 200 diamantatze iraganaldi, hurrenez hurren), batez beste % 31 jaitsi da tenperatura altzairuzko euskarria erabiliz eta % 21-ean kobrezkoa erabiliz.

4-6. taula: a_d eta U_d diamantatze aldagaien eragina tenperaturan.

Entseguak (Iraganaldiak)	Altzairuzko euskarria					Kobrezko euskarria				
	1 (25)	2. (200)	3. (600)	4. (400)	5. (400)	1 (25)	2. (200)	3. (600)	4. (400)	5. (400)
$a_d=15 \mu\text{m}$ $U_d=5,5 \rightarrow 2$	% 6	% 8	% 5	% 1	----	% 0	% 29	% 15	% 0	----
$a_d=30 \mu\text{m}$ $U_d=5,5 \rightarrow 2$	% 11	% -5	% 8	% 5	----	% 8	% 24	% 11	% 24	----
$U_d=5.5$ $a_d=15 \rightarrow 30 \mu\text{m}$	% 13	% 12	% -9	% 35	----	% 3	% 11	% 7	% 0	----
$U_d=2$ $a_d=15 \rightarrow 30 \mu\text{m}$	% 18	% -1	% -7	% 40	----	% 11	% 6	% 4	% 24	----

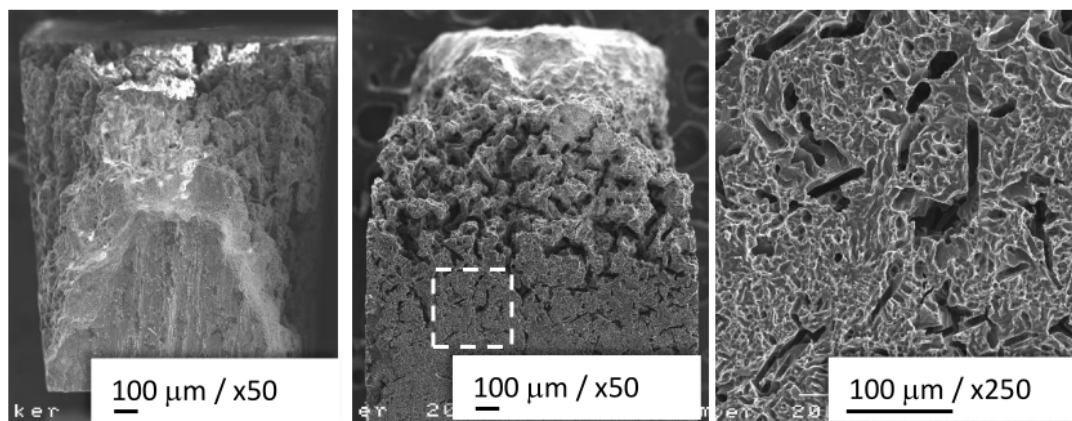
Azkenik, a_d eta U_d (edo v_d) prozesuko aldagaiek diamantearen puntaren tenperaturan duten eraginaren azterketa egin da. Oro har, a_d aldagaiaren handitzeak eta U_d aldagaiaren txikitzeak (S_d -ren handitzeak) tenperaturaren balioa handitzen dute. Hau da, zenbat eta diamanteen eta ale urratzaileen arteko talka azalera handiagoa izan (a_d eta S_d arteko biderketa), orduan eta talka frekuentzia handiagoa izango da, eta sortutako bero kantitatea

ere bai. Aldagai bakoitzak duen eragina ikusteko, 4-5. taula osatu da, 4-16. irudiko tenperatura balioak erreferentziatzen hartuta.

Laburbilduz, esan liteke lehen entseguan a_d -ren hazkunderen eragina $U_d=5,5$ eta 2 balioentzat (% 13-koa eta % 18-koa altzairuzko euskarriarekin eta % 3-koa eta % 11-koa kobrezko euskarriarekin) handiagoa dela, U_d -ren murrizketarekin alderatuta $a_d=15 \mu\text{m}$ eta $30 \mu\text{m}$ balioentzat (% 6-koa eta % 11-koa altzairuzko euskarriarekin eta % 0-koa eta % 8-koa kobrezko euskarriarekin), kontuan hartuta kobrezko euskarriarekin LB1 eta LB2 kasuetan tenperatura ez dela 623 K-etik igo. Altzairuarekin laugarren entseguan lortutako emaitzak ere ildo beretik doaz: a_d -ren hazkunderak % 35-eko eta % 40-ko tenperatura igoera eragiten du eta U_d -ren murrizketak, berriz, % 1-ekoa eta % 5-ekoa.

Kobrearekin eginiko 2. eta 3. entseguetan, aldiz, alderantzizko efektua ikusten da, hau da, U_d txikitzeak a_d handitzeak baino tenperatura igoera handiagoa eragiten duela (batez beste % 20-koa eta % 7-koa, hurrenez hurren), agian marruskadura indarren eragin handiagoagatik.

Altzairuaren kasuan 2. eta 3. entseguetan 1.300 K eta 1.500 K tarteko balioak neurtu dira (grafitizazio tenperatura aise gaindituta) eta diamantea erabat hautsita dago 4-17. irudiko SEM argazkietan ikus daitekeenez. Kontrolik gabeko egoera, diamante eta artezarriaren arteko kontaktu azalerak aldaketa handiak jasaten baititu, apurketa eta higaduren ondorioz. Bestalde, tenperatura horiekin diamantearen propietate mekanikoak ere ahulduta daude (Luque et al., 2008); ondorioz ezin da U_d eta a_d aldagaien eraginari buruzko ondorio garbirik eman.



4-17. irudia: 600 iraganaldi ostean LB4 baldintzekin lanean aritutako diamantearen aurretiko, goitiko eta zehaztasun irudiak, hurrenez hurren.

Kobrezko euskarriarekin, berriz, 1., 4. eta 5. entseguetako lan baldintza batzuetan ez da pirometroaren neurketa balio minimoa lortu eta ezin da jakin zein izan den benetako temperatura; beraz, ezin da prozesu parametroek izan duten eraginaz ezer esan. Ziurtatu daitekeen bakarra da laugarren lan baldintzarekin (LB4) neurtutako temperatura denetan handiena dela, eta, horrek esan nahi du a_d eta S_d -ren handitzeak temperaturaren igoera eragiten dutela.

Orain arte eginiko entseguek diamantatze prozesuan kontsumitutako potentzia totala eta diamantagailuaren puntaren temperatura maila ezagutzeko balio izan dute, bestek beste, baina emaitza horiekin ezin da jakin kontsumitutako potentzia horretatik zein den diamantagailuan eta euskarrian zehar bero gisa barreiatzen den ehunekoak. Horretarako, 4.2.2.1. atalean azaltzen den elementu finitu bidezko azterketa egin da. Diamantagailuaren puntara barreiatutako bero kantitateen eta esperimentalki diamantagailuaren puntan neurtutako temperaturen emaitzak aztertuz ondorioztatuko da eroankortasun termiko handiagoko euskarria erabiltzeak termikoki abantailak dakartzan ala ez.

Azterketa hau egiteko, lehen entseguko baldintzak aukeratu dira, jarraian dauden hiru arrazoi nagusi hauengatik:

- Altzairuzko euskarriarekin neurtutako temperaturak grafitizazio temperaturaren gainetik daude kasu gehienetan (ikus 4-16. irudiko grafikoa) eta horrek diamantearen propietate mekanikoetan eragiten du. Elementu finitu bidezko modelo honen helburua ez da materialaren propietate aldaketa horien eragina aztertzea, baizik eta diamantatze prozesuan sortzen den beroa eta diamantagailuak jasaten duen temperatura kalkulatu dituen modelo termiko sinplifikatua definitzea. Beraz, temperatura maila txikiena duen entsegua aukeratu da, ahal den neurrian, propietate aldaketak sor ditzaketen temperatura altuak ekidinez.
- Kobrezko euskarriarekin eginiko probetetatik bigarrena eta hirugarrena izango lirateke egokienak azterketa hau egiteko, probatutako lan baldintza guztietan 623 K-etik gorako temperatura neurketak jaso direlako; baina, lehen baldintza ez da betetzen. Beraz, lehen eta laugarren baldintzen artean lehena aukeratu da, gutxienez bi neurketa badirelako 623 K-etik gorakoak.

- Entsegu esperimentalen azterketan ikusi ahal izan den bezala, zenbat eta diamantatze iraganaldi gehiago egin orduan eta handiagoa da diamantearen higadura maila (ikusi 4-17. irudia adibide gisa). Ikasketa honetarako garatutako elementu finitu bidezko modeloak ez du diamanteak jasaten duen higaduraren eboluzioa kontuan hartzen, eta, ondorioz, iraganaldi asko jasan ondoren, ez du balio higatuta legokeen diamantearen jokaera termikoa azaltzeko. Beraz, egindako entsegu eta modelo teorikoaren artean diamantearen higadurari dagokionez baliokidetasuna ahalik eta handiena izateko, 25 iraganalditako entseguak aukeratu dira, hots, teorikoki diamanteek higadura maila txikiena jasan dezaketen lan baldintza.

Hauk dira, beraz, definitutako entseguak azterketa termiko hau gauzatzeko. Jarraian, berriz, lortutako emaitzen azterketa dago

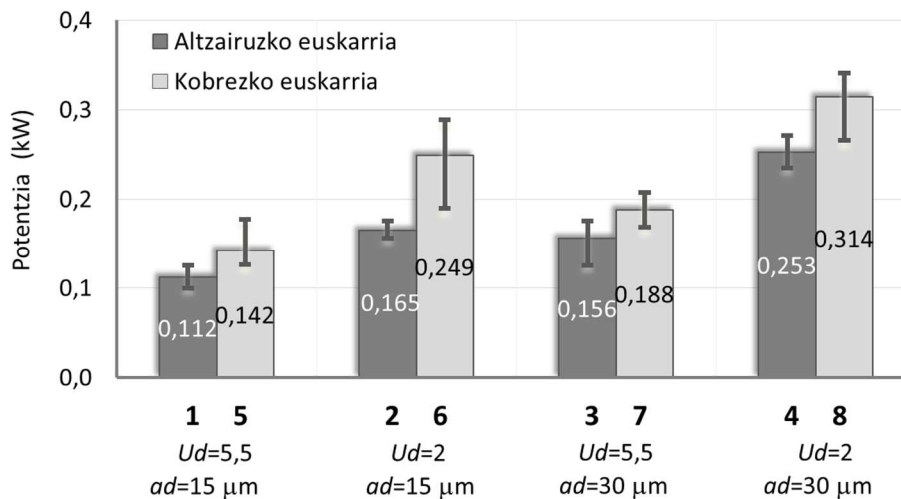
4-7. taula: Diamantatze prozesuko lan baldintzak.

Entsegu zenbakia	1	2	3	4	5	6	7	8
Euskarri materiala	Altzairua				Kobrea			
a_d (μm)	15	15	30	30	15	15	30	30
v_d (mm/min)	204	679	204	679	204	679	204	679
U_d	5,5	2	5,5	2	5,5	2	5,5	2
Hozgarria	EZ				EZ			

Potentzia neurketei dagokienez, altzairuzko nahiz kobrezko euskarriekin eginiko entseguetan lortutako emaitzetan garbi ikus daiteke (ikusi 4-18. irudiko grafikoa) prozesuko potentzia handitu egiten dela, bai a_d -ren handitzearekin (3-7. eta 4-8. entseguak 1-5. eta 2-6. entseguen konparatuta), bai U_d -ren txikiagotzearekin, edo S_d -ren handitzearekin (2-6. eta 4-8. entseguak 1-5. eta 3-7. entseguen konparatuta). Lan baldintza guztietan kobrezko euskarriarekin lortutako potentzia balioak altzairuzkoarekin lortutakoak baino handiagoak direla ere ikus daiteke (batez beste %24 handiagoak), aurreko entseguetan gertatu den bezala. Potentziaren emaitza horiek bat datoz Shih et al. (2001)-ek gauzatutako azterketarekin, hots, lauza motako diamantagailuarekin a_d eta S_d

handiekin lortutako indar tangentialak handiagoak dira, a_d eta S_d txikiekin lortutakoekin alderatuz.

Entsegu guztietan antzeko aldakortasun koefizienteen balioak neurtu dira, % 13 eta % 22 tartekoak; balio maximoa kobrezko euskarriarekin eginiko seigarren entseguan jaso da, % 30-ekoa. 4-18. irudiko grafikoa ikusita, esan liteke, dispertsio balio horiez gain, diamantatze prozesuen aldagaien araberrako potentzia balioen joera garbia dela.



4-18. irudia: Altzairuzko eta kobrezko euskarriak erabiliz diamantatze prozesuko potentzia balioak

Orain artean, oro har esan izan da potentziaren handitzea a_d eta S_d parametroen handitzeak eragiten duen talka maiztasunarekin lotuta dagoela. Eta Filho et al. (1999)-ek ere definitzen duten bezala, diamantagailuaren eta artezarriaren arteko A_d talka azaleraren hurbilketa a_d -ren eta S_d -ren arteko biderketa bidez kalkula daiteke (4-1. ekuazioa).

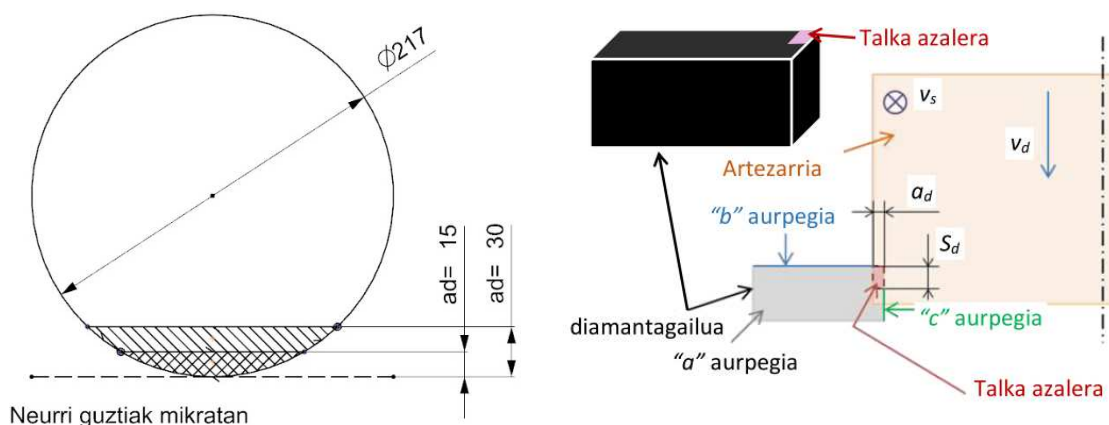
$$A_d = a_d \cdot S_d$$

4-1. ekuazioa

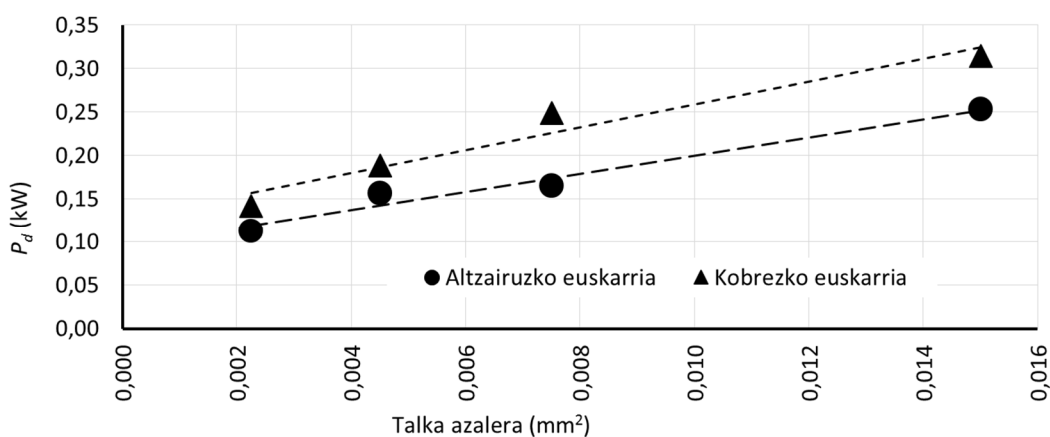
Alde batetik a_d parametroaren handitzeari dagokionez, potentzia igoera diamantagailuaren eta artezarriaren arteko talka azaleraren handitzearekin lotuta egon liteke (4-19. irudia). Entseguetan erabilitako a_d balioak oso txikiak dira, artezarriko ale urratzaileen diametroarekin alderatuta: 15-30 µm-ko sakonerak, 180-250 µm-ko ale urratzaileen diametroarekin alderatuta (70 ale tamaina). Beraz, esan liteke, beste inongo kalkulurik egin gabe, baldintza horietan nagusiki ale haustura edo marruskadura izango dela artezarriaren higadura mekanismo nagusia diamantatze prozesuan, ale ihesa edo lotura haustura baino.

Aztertutako kasu bakoitzerako talka azalera eta neurtutako potentziaren balioak grafikora eramanez gero, kontsumitutako potentziaren eta talka azaleraren artean benetan badela proportzionaltasunik ikus daiteke. Horrek esan nahi du, 4.1.2.2.1. atalean planteatutako zalantzari lotuta, aztertutako kasu hauetarako behintzat, a_d -k eta U_d -k era proportzionalan eragiten dutela diamantatze prozesuko potentzian.

Diamantatzea diamantagailuarekin artezarriaren zilindratze prozesua bezala azalduz gero, A_d talka azalera txirbilaren sekzioa bezala uler daiteke eta, ondorioz, ulergarria da, txirbil harroketazko prozesuetan gertatzen den bezalaxe, diamantatze prozesuan ere potentziaren eta txirbil sekzioaren artean proportzionaltasuna mantentzea.



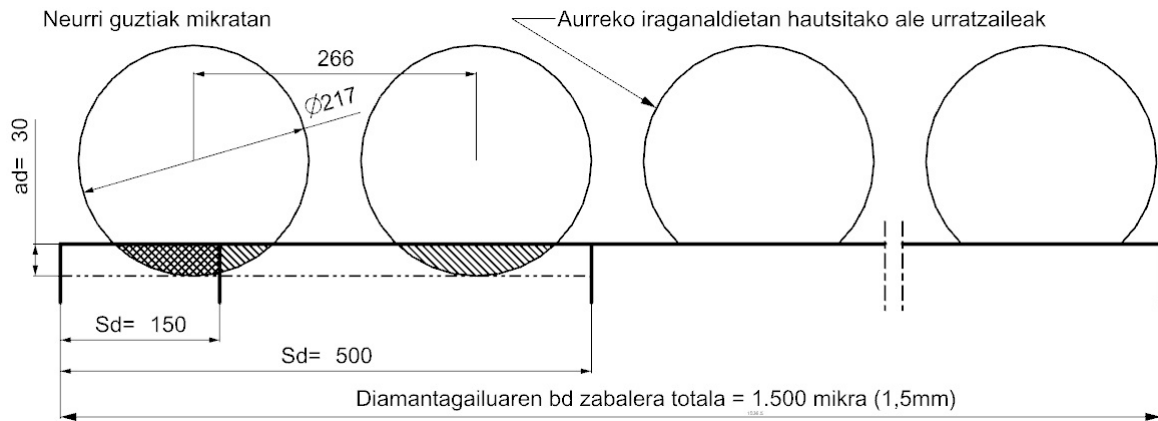
4-19. irudia: Diamantagailu eta artezarriaren arteko talka-azalera



4-20. irudia: Talka-azalera eta potentziaren arteko erlazioaren joera-kurba

Bestalde, eta S_d parametroaren handitzeari dagokionez (U_d -ren txikiagotzea), 4-21. irudian ageri den bezala diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talka kopurua igo egiten da eta, ondorioz, potentzia kontsumoak ere handiagoa behar du izan.

Kontuan izanik definitutako lan baldintzetan U_d -ren murrizketa (5,5-etik 2-ra) a_d -ren hazkundera ($15 \mu\text{m}$ -tik $30 \mu\text{m}$ -ra) baino handiagoa dela, 4-8. taulan ikus daitekeen bezala, U_d -ren murrizketaren eragina handiagoa da, potentzian a_d -ren hazkunderarekin konparatuta (batez beste % 62 eta % 38, hurrenez hurren).



4-21. irudia: Diamantagailuaren eta ale urratzaileen arteko talka kopurua handitzea S_d -ren eraginez.

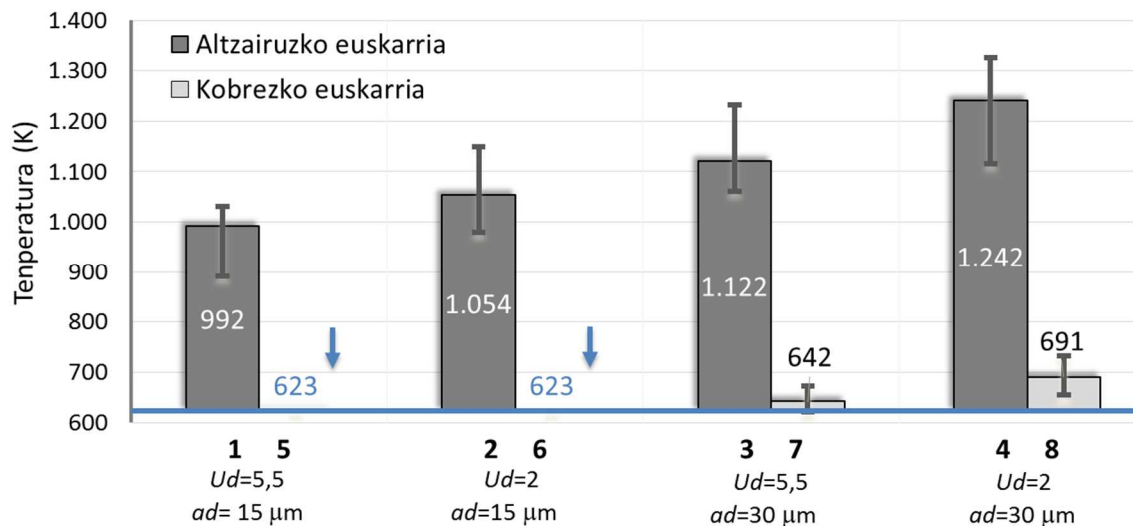
4-8. taula: Diamantatze prozesuko a_d eta U_d aldagaien eragina diamantatze potentzian.

Entseguak	$a_d=15 \mu\text{m}$	$a_d=30 \mu\text{m}$	$U_d=5,5$	$U_d=2$
	$U_d=5,5 \rightarrow 2$	$U_d=5,5 \rightarrow 2$	$a_d=15 \rightarrow 30$	$a_d=15 \rightarrow 30$
Altzairuzko euskarria	% 47	% 62	% 39	% 53
Kobrezko euskarria	% 75	% 67	% 33	% 26

Diamantagailuaren puntan neurtutako tenperaturak 4-16. grafikotik berreskuratuz gero, lehenik eta behin, esan behar da kobrezko euskarriarekin neurtutako tenperatura balioak altzairuzkoarekin neurtutakoak baino askoz ere txikiagoak direla (ikus 4-22. irudian); izan ere, kobrezko euskarriarekin eginiko 5. eta 6. entseguetan ($a_d = 15 \mu\text{m}$) neurketa gutxi batzuetan bakarrik gaintu da pirometroaren neurketa tarteko balio minimoa (623 K); beraz, bi entsegu hauetako batez besteko tenperatura 623 K-en jarri da. 7. eta 8. entseguetan, berriz, batez beste 642 K-eko eta 691 K-eko tenperatura balioak neurtu dira, maximo eta minimoen arteko 52 K-eko eta 79 K-eko anplitudearekin, hurrenez hurren.

Altzairuzko euskarriarekin, ordea, batez beste 992 K-eko eta 1.242 K-eko tenperaturak neurtu dira, diamantearen grafitizazio tenperaturaren gainetik daudenak. 4.3.2.1. atalean proba hauetan erabilitako diamanteen argazkietan ikus daitekeen bezala, ez dirudi diamanteak oso kaltetuak izan direnik (25 diamantatze iraganaldi baino ez dira izan).

Lan baldintza bakoitzarekin egindako 3 entseguak kontuan hartuta, altzairuzko euskarriarekin eginiko entseguetan kalkulaturako batez besteko aldakortasun koefizientea % 5-ekoa da, eta kobrezkoarekin, berriz, % 3-koa (7. eta 8. entseguak soilik kontuan izanik). Diamantatze prozesuan jasotako potentzia eta temperatura emaitzen azterketa estatistiko sakona egiteko gauzaturiko entsegu kopurua txikia izan arren, temperatura nahiz potentzia joerak aztertzeke baliozkotzat jotzen dira emaitza horiek.



4-22. irudia: Altzairuzko eta kobrezko euskarriak erabiliz diamantatze prozesuko temperatura balioak diamantagailuaren puntan neurtuak.

4-22. grafikoan argi ikusten da, halaber, temperatura balioak handitu egiten direla, bai a_d -ren handitzearekin, bai U_d -ren txikiagotzearekin. Baina, kasu honetan a_d -ren handitzearen eragina handiagoa da altzairuzko euskarriarekin eginiko entseguen emaitzak aztertuz gero: U_d txikiagotzeak batez besteko temperaturaren % 6-ko eta % 11-ko hazkundera eragiten du $a_d = 15 \mu\text{m}$ eta $a_d = 30 \mu\text{m}$ kasuetarako, eta a_d -ren handitzeak, oster, % 13 eta % 18-ko temperatura hazkundera eragiten du $U_d = 5,5$ eta $U_d = 2$ kasuetarako (ikusi 4-9. taulako temperaturaren portzentajezko hazkunderak; kobrezko euskarriarekin parentesi artean 623 K-eko neurketak erabili direlako kalkulurako). Beraz, 4.1.3. atalean proposaturiko eztabaidari erantzunez, esan liteke aztertutako kasu honetan behintzat, a_d aldagaiaren eragina handiagoa dela U_d aldagaiarena baino diamantatze prozesuan sortutako bero kantitatean.

4-9. taula: Diamantatze prozesuko a_d eta U_d aldagaien eragina diamantearen puntaren tenperaturan.

Entseguak	$a_d=15 \mu\text{m}$	$a_d=30 \mu\text{m}$	$U_d=5,5$	$U_d=2$
	$U_d=5,5 \rightarrow 2$	$U_d=5,5 \rightarrow 2$	$a_d=15 \rightarrow 30$	$a_d=15 \rightarrow 30$
Altzairuzko euskarria	% 6	% 11	% 13	% 18
Kobrezko euskarria	(% 0)	% 7	(% 3)	(% 11)

Ez emaitza horiek, ez 4-16. taulan azaldutakoak, ez datoz bat Linke eta Klocke (2010) beraien ikerketan lortutakoarekin, zeintzuek a_d -ren hazkundearekin tenperatura mailaren jaitsiera lortzen duten. Jaitsiera hori artezarriaren gainazaleko topografiaren sorrera mekanismoaren aldaketarekin erlazionatzen dute, a_d balio txikiekin aleen haustura eta marruskadura indarrak nagusi direla eta, bero energia handiagoa askatzen dela azalduz a_d balio handiekin konparatuta, non ale urratzaileen arteko lotura apurketak nagusi diren. Doktorego tesi honetan egindako entseguetan erabilitako lan baldintzak eta ale urratzaileen batez besteko tamaina kontuan hartuta (ikusi 4.1.3. atalean esandakoak eta 4-19. irudia), ez du zentzurik Linke eta Klocke-k (2010) esandakoak, a_d -ren balioak, aleen diametroarekin alderatuta, oso txikiak baitira.

Dena dela, azterketa termiko honen helburu nagusia ez da diamantatze aldagaien eragina aztertzea, ez diamantatze prozesuan sortutako bero kantitatean, ez potentzian, baizik eta altzairuak eta kobreak, diamantagailuaren euskarriko material gisa, diamantagailuan barreiatutako bero kantitatean izan dezaketen eragina aztertzea; izan ere, erabilitako materialaren eroankortasun termiko propietatea diamantatze prozesuko aldagai garrantzitsua izan liteke diamantagailuak jasaten dituen karga termikoak txikiagotzeko eta, ondorioz, higadura murrizteko.

4.2. DIAMANTATZE PROZESUAREN ELEMENTU FINITU BIDEZKO SIMULAZIO TERMIKOA

4.2.1. Sarrera

Diamantatze prozesua, artezketa bezalaxe, errendimendu oso txikiko prozesua da, energiaren ikuspuntutik. Txirbil harroketa tasa oso txikia izanik, sekulako energia sortzen

du, beste prozesu batzuekin alderatuz (fresaketa edo zilindraketa). Ia energia hori guztia bero moduan agertzen da, diamantagailuaren eta artezarriaren arteko talkaren eta marruskaduraren ondorioz (Pombo et al., 2011). Prozesuaren azterketa termikoak, lehenik eta behin, energia hau guztia artezarri, diamantagailu eta hozgarri (edo airea kasu honetan, hozgarririk gabe eginiko entseguetan) bidez nola barreiatzen den zehaztea eskatzen du. Ikerketa honetan, modelo teoriko eta entsegu esperimentaletan lortutako emaitzak konbinatuz, diamantagailura iristen den bero kantitatea definitzen da.

4.2.2. Diamanterantz barreiatutako bero kopuruaren kalkulu teorikoa

Lan baldintza bakoitzean eta euskarri mota bakoitzarekin diamantagailuan zehar barreiatutako bero fluxuaren aurretiazko azterketa egiteko, diamantatze prozesuaren elementu finitu bidezko modelo bat (ANSYS® softwarea), beroaren eroapen ekuazio orokorra (4-2. ekuazioa) eta fase esperimentalean lortutako potentzia eta temperatura balioak konbinatu dira; potentzia balioak modelo teorikoaren sarrera edo *input* gisa erabiliz, diamantagailuaren puntaren tenperatura teorikoak kalkulatu eta esperimentalki lortutakoekin konparatuta, diamantatze prozesuaren jokaera termikoa deskribatuko duen modelo teorikoa definitu da atal honetan.

4.2.2.1. Modelo termiko teorikoa

Diamantagailuaren eta artezarriaren arteko talka azalerari loturiko gertaera termikoa diamantagailuan definitutako A_d kontaktu azaleran aplikatutako bero iturri konstante eta finko batez modeliza daiteke. Azaleraren balio teorikoa 4-1. ekuazio bidez definitu da aurrez; baina, esperimentalki ere berrets liteke altzairuarekin egindako laugarren entseguan erabili den diamantagailuari eginiko SEM irudiaren bidez, 4-23. irudian ikus daitekeen bezala; higadura arrastoaren zabalera S_d aitzinamendu abiaduraren oso antzekoa dela ikus daiteke (NX CAD sistema bidez gauzatu da neurketa +/- 0,05 mm-ko doitasunarekin).

Behin A_d kontaktu edo talka azalera definituta, diamantagailuaren puntaren tenperaturaren kalkulu teorikoa egin daiteke beroaren kondukzio, konbekzio eta erradiazio

$$-k \cdot \left(\frac{\partial T_M}{\partial n} \right)_{azalera} = h \cdot (T_M - T_{ING}) \quad \text{4-3. ekuazioa}$$

Non:

- T_M (K) solidoaren gainazalaren temperatura,
- T_{ING} (K) ingurunekeo temperatura,
- h (W/m²·K) konbekziozko bero transmisio koefizientea,
- n kalkulurako erabilitako elementu finituen nodoa,
- $\frac{\partial T_M}{\partial n}$ (K) temperaturaren gradienteak n nodoan

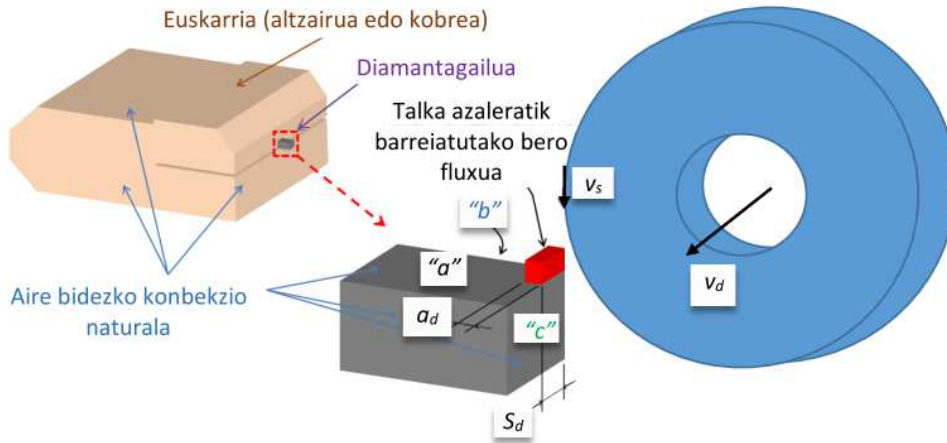
diren.

Konbekziozko bero transmisio koefizientea (h) materialaren, gainazalaren temperaturaren (T_M) eta ingurunekeo temperaturaren (T_{ING}) menpe dago, besteak beste. Erreferentzia bibliografikoak oinarri hartuta (Marinescu et al., 2013) h -ren balio eremua 10 W/(m²·K) eta 48 W/(m²·K) tartean finka liteke azterketa honen lan baldintzetarako. Edozein modutan, modelo termiko-matematikoaren h aldagaiarekiko sentiberatasuna aztertu da, eta lortutako emaitzak dio h -ren balio minimo eta maximoekin diamantagailuan (puntu berean) lortutako temperatura maximoen artean % 2-ko diferentzia baino ez dagoela; hori dela-eta, h -rako 20 W/(m²·K)-ko balioa zehaztu da (Marinescu et al., 2013).

Erradiazio bidezko bero transmisioari buruz beste lan batzuetan lortutako esperientziak kontuan hartuta (Doman et al., 2009; García et al., 2014), ez da kontuan izan modelo termikoan.

Azterketa honetan, kondukzio eta konbekziozko ekuazioez gain, elementu finitu bidezko modelo bat definitu da (4-25. irudia), non diamantagailuaren eta euskarriaren gorputz geometriak, konbekzio eta kondukzio propietateak, konbekzio naturaleko gainazalak eta diamantagailuaren eta artezariaren arteko talka azalera barreiatutako bero fluxua definitu diren.

Diamantagailuaren eta euskarriaren arteko kontaktua erabatekoa dela ziurtzat jo da, eta, beraz, bero fluxuak eta tenperatura balioak bien arteko mugan berdinak izan beharra dute, 4-4. eta 4-5. ekuazioek adierazten duten bezala.

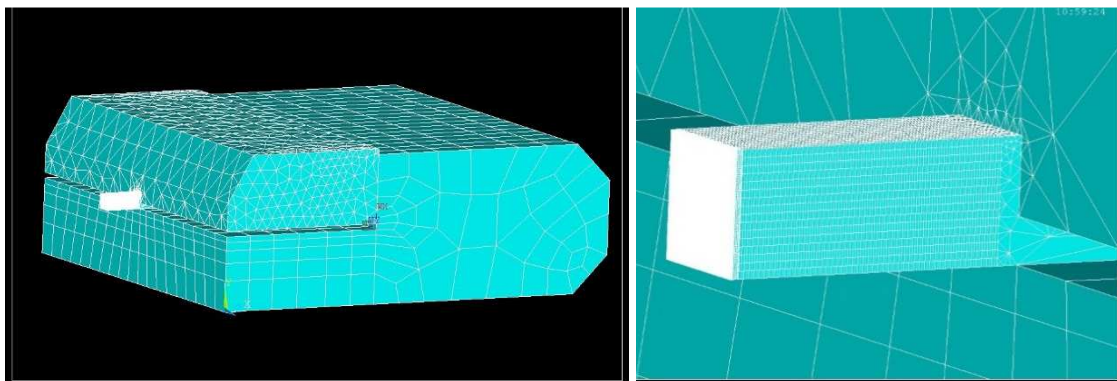


4-24. irudia: Elementu finitu bidezko modelo termikoa.

$$k_{diamantea} \cdot \left(\frac{\partial T_N}{\partial n} \right)_{diamantea} = k_{euskarria} \cdot \left(\frac{\partial T_N}{\partial n} \right)_{euskarria} \quad \text{4-4. ekuazioa}$$

$$T_n^{diamantea} = T_n^{euskarria} \quad \text{4-5. ekuazioa}$$

Diamantagailuaren elementu finitu bidezko modeloa sortzeko 8 nodo eta prisma formako *SOLID70* elementu mota erabili da (4-25. irudia), tenperatura izanik nodo bakoitzeko askatasun gradu bakarra; elementu mota hau oso egokia da finkoak zein iragankorrak diren arazo termikoak aztertzeko. Elementu finitu bidezko modeloekin lan egitean, beti aurkitu behar izaten da (gomendagarria izaten da, behintzat) lortutako emaitzen zehaztasunaren (batez ere, tenperatura gradiente handiko eremuetan) eta konputazio kostearen arteko ekilibrioak; kasu honetan ere egin da azterketa hau.



4-25. irudia: Diamantagailuaren eta euskarri sistemaren elementu finitu bidezko modeloa (ANSYS® softwarea).

Azkenik, material propietateei dagokienez, 4-3. eta 4-4. taulako altzairu eta kobreaken eroankortasun termiko balioak oinarri hartuz, 4-10. taulan eroankortasun termikoaren gerturatze kurba lineala eta bero ahalmen propietateak zehazten dira bi material horietarako. Horrez gainera, proba esperimentaletan erabilitako diamante motaren propietate termikoak ere zehazturik daude taula berean.

4-10. taula: Elementu finituen modeloan erabilitako materialen propietate termikoak (eFunda, 2016; Six Elements, 2016).

	k eroankortasun termikoa [W/m·K]	Bero ahalmena [J/Kg·K]
Altzairua	$k = -0,0602 T + 95,659$	460
Kobrea	$k = -0,0692 \cdot T + 421,56$	389
Diamantea	$1,53 \cdot 10^6 \cdot T^{-1,15}$	$-2,2 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 + 4,65 \cdot T - 664,2$

4.2.2.2. Diamantagailuan zehar barreatutako bero fluxuaren kalkulua

Behin elementu finitu bidezko modelo geometria, materialen propietateak, ingurune baldintzak eta karga termikoak guztiz definituta daudenean, kalkuluak gauzatu dira diamantean barrena barreatutako bero kantitatea kalkulatzeko. Diamantatze prozesuan kontsumitutako potentziatik (P_d), kopuru bat (P_b) bero gisa eta diamantagailuko A_d talka azaleratik barreatuko da. Bero fluxu hori uniforme dela aintzat hartuta, 4-6. ekuazioaren bidez diamantagailuari transferitutako P_b denbora unitateko bero fluxua eta R_d bero partizioaren parametroa definitu dira.

$$P_b = R_d \cdot P_d \quad \text{4-6. ekuazioa}$$

Non P_d simulazioko potentzia aldagaia den eta entsegu esperimentaleko potentzia balioak dituen, eta P_b diamanterako bero moduan barreatutako potentzia den, hots, prozesuko P_d potentzia totala eta R_d bero partizioaren parametroaren arteko biderketa.

Eginiko entsegu bakoitzerako R_d partizio parametroak kalkulatzeko esperimentalki lortutako potentzia balioak erabili dira (simulazioko P_d aldagaia) eta 0,5 - 1 tarteko R_d balioentzat P_b bero fluxua kalkulatu da. Jarraian, elementu finitu bidezko modeloa hartu eta, P_b sarrerako bero fluxu gisa definituz, tenperaturaren eboluzio teorikoa kalkulatu da.

R_d -ren azken balioak 4-7. ekuazioaren arabera teorikoki eta esperimentalki lortutako tenperaturen arteko e errorea minimizatzen dituztenak dira.

$$e(R_d) = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n \left(\frac{(T_{ESP})_i - (T_{TEO})_i}{(T_{ESP})_i} \right)^2}}{z} \quad \text{4-7. ekuazioa}$$

Non:

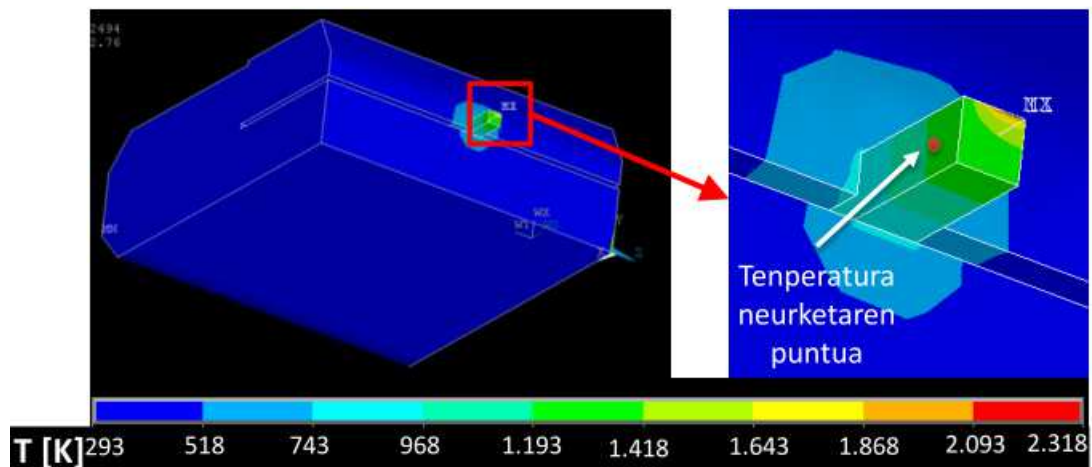
- T_{ESP} (K) esperimentalki pirometro bidez diamantagailuaren puntan neurtutako tenperatura,
- T_{TEO} (K) elementu finitu bidezko modeloa bidez diamantagailuaren puntan neurtutako tenperatura,
- z tenperaturaren neurtzea kopurua iraganaldi bakoitzean,
- i (s) tenperatura neurrien arteko periodoa (s), 0-tik hasi eta n arte, esperimentalki lortutako tenperatura seinalearen iraupenaren arabera. Ikerketa honetan 0,1 s-ko balioa erabili da i -rako (2., 4., 6., eta 8. entseguen iraupena 1,7 s izanik, $n = 17$ da, eta, 1., 3., 5., eta 7. entseguen iraupena 6,3 s eta $n = 63$),

diren.

Aurrez esan den bezala, egin den azterketa termiko hau atariko azterketa bat baino ez da, eroankortasun termiko desberdineko euskarriak erabiliz diamantearen puntan esperimentalki lortutako emaitza termikoak (tenperatura) berresteko. Diamantatze prozesuan kontsumitutako potentziatik (P_d) diamantera barreiatutako bero kantitatea (P_b bezala definitua) R_d bero partizio parametroaren menpe dago (4-6. ekuazioa), eta hori esperimentalki neurtutako tenperatura balioen menpe (ikusi 4-7. ekuazioa).

Elementu finitu bidezko simulazioaren emaitzak azaldu eta aztertzen hasi aurretik, komeni da erabilitako modelo termikoaren doitasun edo ziurgabetasun mailari buruzko gogoeta batzuk egitea. Lehenik eta behin, esan behar da R_d balioak zehazteko erabilitako tenperatura balioak talka azalerako bero fokutik aldendu samar dagoen puntuan neurtuak izan direla (ikusi 4-4. eta 4-7. irudiak), distantzia horretan tenperatura gradientea nahiko handia izanik, 225 K/mm inguru, 4-23. irudian altzairuzko euskarriarekin eginiko laugarren

entseguaren simulazio termikoan ikus daitezkeen bezala ($R_d = 0,54$). Temperatura neurtzeko kalkulu zehatzagoa egiteko, komenigarria litzateke diamante eta artezarriaren talka azaleratik gertuagoko beste puntu bat edo batzuk hartuko balira, baina pirometroarekin egitea ez da batere erraza, eta, termopare bidez, oso konplexua litzateke zuzenean diamantearen puntan kokatzea termoparearen muturrak; Coelho et al-ek (2000) bezala euskarrian egin beharko litzateke.



4-26. irudia: Diamantagailu puntaren temperatura neurtzeko elementu finitu bidezko simulazio bidez ($a_d=0,03$ mm, $v_{fd}=679$ mm/min, $R_d=0,54$) (ANSYS® softwarea).

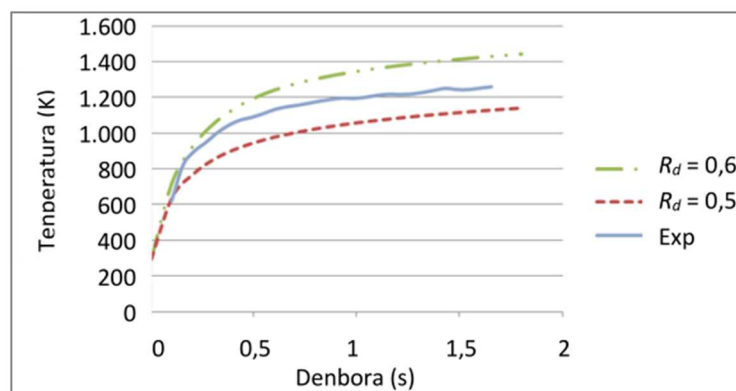
Horrez gainera, pirometroaren laser erakuslearen posizionamenduaren +/- 0,2 mm-ko ziurgabetasunak ere kontuan hartu behar dira, beste ziurgabetasun iturri baten gisan. Bestalde, diamante eta euskarriaren artean kontaktua erabatekotzat jo da simulazioan erabilitako modeloan 4-4. eta 4-5. ekuazioen bidez, eta, benetan ez da hori gertatzen, diamantearen eta euskarriko ahokalekuaren aurpegi guztiak ez baitira ziur aski erabat paraleloak eta elkarzutak beraien artean; ez da gauzatu neurtzeko zehatzik benetako azalera kontaktua zenbatekoa izan daitezkeen ebaluatzeko.

Diamante, altzairu eta kobreakin propietate termikoak bibliografian agertzen diren erreferentzietatik jasoak dira, eta, esperimentuetan lortutako emaitzak badira ere, ezin da ziurtatu zein neurritan datozen bat proba esperimentaletan erabilitako materialen propietateekin.

Azkenik, diamantearen eta artezarriaren arteko benetako kontaktu azalera diamantatze iraganaldien ondorioz higitzen da, eta, higidura hori txikia bada ere, aldagai bat gehiago da diamantatze prozesuan, modelo teorikoak kontuan hartzen ez duena.

4.2.2.3. Simulazio termikoaren emaitzak eta azterketa

Elementu finitu bidezko simulazioak egin ostean, temperatura teorikoaren kurba eboluzioak kalkulatu eta esperimentalki lortutakoekin konparatu dira R_d -ren balioak lortzeko. 4-27. irudian laugarren entsegurako (ikus 4-7. taula) lortutako emaitzak ikus daitezke; grafiko horretan antzeman daiteke diamantagailuaren puntaren temperatura eboluzioaren kurbak oso antzekoak direla, eta esperimentalki lortutako kurba R_d 0,5 eta 0,6 balioetarako simulazio bidez kalkulaturako kurben tartean dagoela, hots, R_d -ren balioa tarte horretan dagoela.



4-27. irudia: 4. entsegurako esperimentalki eta simulazio bidez lortutako temperatura eboluzioa R_d 0,5 eta 0,6 balioetarako.

Zortzi entseguetarako R_d -ren gutxi gorabeherako balioak 4-11. taulan daude laburbilduta. Kobrezko euskarriarekin egindako 5. eta 6. entseguetan kasik 623 K-etik gorako temperatura baliorik neurtu ez denez, ezin da inolako azterketa termikorik egin eta, horregatik, ez da R_d baliorik eman. Bestalde, diamantean barreiatutako P_b bero fluxuaren balioak ere eman dira taula horretan, prozesuan neurtutako P_d potentziaren eta bero partizioaren arteko biderketa gisa.

Taula honetan dakusagu (altzairuzko euskarriarekin eginiko entseguetan) R_d bero partizio balioak handiagoak direla a_d diamantatze sakonera balio txikietarako, % 97-koa eta % 93-koa $a_d = 15 \mu\text{m}$ kasurako, eta % 76-koa eta % 54-koa $a_d = 30 \mu\text{m}$ kasurako ($S_d = 0,15$ eta $S_d = 0,5$ mm/bira balioetarako, hurrenez hurren). Diamantatze balio txikiekin ale urratzaileen higadura mekanismo nagusia marruskadura eta deformazio plastikoa izateko probabilitatea handiagoa da eta, beraz, sortutako bero kantitateak ere handiagoa izan beharko luke. R_d bero partizioaren balio altuek diotena da prozesuan sortu den bero

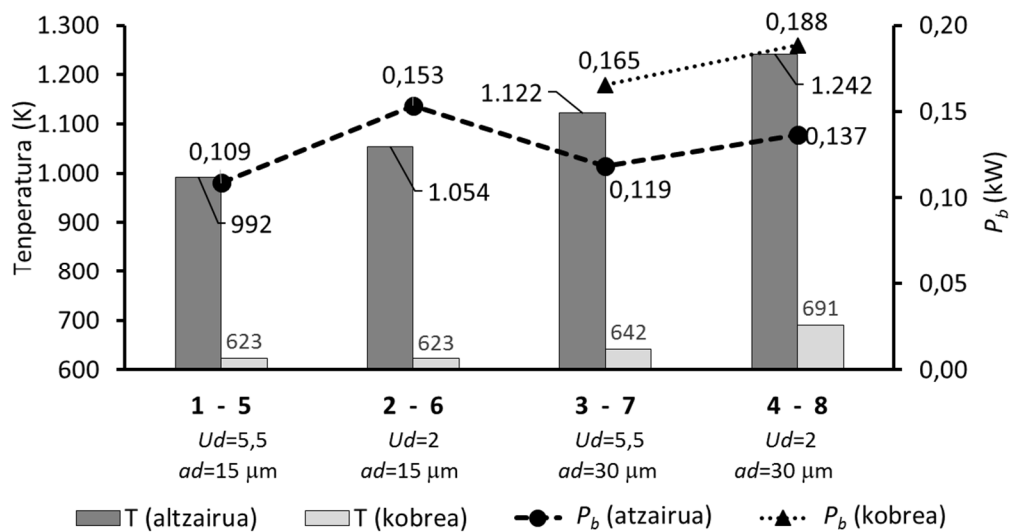
kantitate kasik guztia diamantean barrena bero forman barreiatzen dela; halere, balio horiek (0,97 eta 0,93) handiegiak dira, adierazi nahi baitu diamantatze prozesuan kontsumitutako potentzia ia guztia bero bilakatuta diamantean zehar barreiatu dela. Diamantatze sakonera $a_d = 30 \mu\text{m}$ denean, berriz, badirudi potentziaren zati bat, behintzat, ale urratzaileen higadura mekanismoan kontsumitu dela; beste bat, agian, ingurunera barreiatu den bero kantitatean; eta, % 76 eta % 54, berriz, diamantera barreiatutako beroan.

4-11. taula: 8 entsegetan elementu finitu bidezko modeloaren bidez lortutako emaitzak.

Entsegua	Altzairua				Kobrea			
	1	2	3	4	5	6	7	8
$a_d (\mu\text{m})$	15	15	30	30	15	15	30	30
$S_d (\text{mm/bira})$	0,15	0,5	0,15	0,5	0,15	0,5	0,15	0,5
$P_d (\text{kW})$	0,112	0,165	0,156	0,253	0,142	0,249	0,188	0,314
$T_{max} (\text{K})$	992	1.054	1.122	1.242	-----	-----	642	691
$R_d (\%)$	97	93	76	54	-----	-----	88	60
$P_b (\text{kW})$	0,109	0,153	0,119	0,137	-----	-----	0,165	0,188

Esanguratsua da, halaber, 2. entsegua 1. entseguarekin konparatuta, diamantera barreiatutako P_b potentzia (bero eran) % 40 handiagoa izanik (0,153 kW eta 0,109 kW, hurrenez hurren), tenperatura diferentzia soilik % 6,2-koa izatea (ikusi 4-28. irudiko grafikoa). Lehen entseguko aitzinamendu abiadura txikiagoa da eta, beraz, diamantatze iraganaldi bakoitzeko denbora gehiagoan daude kontaktuan diamantea eta artezarria (6,3 s $S_d = 0,15 \text{ mm/bira}$ aitzinamendu abiadurarekin eta 1,7 s $S_d = 0,5 \text{ mm/bira}$ abiadurarekin); ondorioz, kontsumitutako potentzia totala ere handiagoa da eta sortutako bero kantitatea ere bai. Azterketa bibliografikoan azaldu den bezala (Rowe, 2009; Wegener et al., 2011) aitzinamendu abiadura oso txikiekin lan egitean (U_d balio handiak), diamantearen higadura azkartu, ale urratzaileak kaltetu eta piezan gainazal erredurak sortzeko arrisku handia dago, diamantearen eta aleen arteko etengabeko kontaktuaren ondorioz. Entsegu hauetan erabilitako lan baldintzak kritikoak ez diren arren, lortutako emaitzen azalpenetako bat ildo honetatik joan liteke.

Kobrezko euskarriarekin ezin izan da 5. eta 6. entseguetarako R_d beroaren partizio parametrorik aurkitu, ez delako lortu benetako temperatura baliorik, baina baldintza bereko 3-7. eta 4-8. entseguetan antzeko balioak lortu direla esan liteke altzairu eta kobrezko euskarrietarako (% 76 eta % 54 altzairurako eta % 88 eta % 60 kobrerako). Kobrearen kasuan, halere, kontsumitutako potentzia handiagoa da, baita diamantetik barrena igarotako P_b bero kopurua ere, baina batez besteko temperatura maximoak, ordea, askoz txikiagoak dira; 7. eta 8. entseguetan (kobrezko euskarriarekin) diamantean barreiatutako P_b bero fluxua 3. eta 4. entseguetan (altzairuzko euskarriarekin) barreiatutakoa baino % 39 eta % 37 handiagoa da, eta temperatura, berriz, % 43 eta % 44 txikiagoa (4-28. irudia). Entsegu esperimentalak eta simulazio numerikoak konbinatuz lortutako emaitza horiek frogatzen dute kobrea diamantearen euskarri gisa erabiltzeak abantaila nabarmenak eskaini ditzakeela, diamantean aplikatutako karga termikoak murriztuz; zenbat eta eroankortasun termiko handiagoko materiala erabili euskarri moduan, orduan eta errazago barreiatuko da diamantatze prozesuan sortutako beroa euskarrian zehar makinaren egiturara.



4-28. irudia: 8 entseguetan neurtutako batez besteko T temperatura maximoak eta P_d diamantetik barreiatutako P_d bero fluxua.

4.3. LEHORREKO DIAMANTATZE PROZESU EKOLOGIKO BERRIA

4.3.1. Sarrera

Simulazio termikoaren azterketak aurrez esperimentalki lortutako emaitzak eta ondorioak sendotu ditu, hots, diamantearen euskarrian altzairuak baino eroankortasun termiko handiagoa duen materiala erabiliz gero, posible dela diamantagailuaren karga termikoa murriztu eta, ondorioz, diamantearen biziraupena luzatzea.

Azterketa termikoa hozgarri sistemarik gabeko lan baldintzetan egin da, diamantearen higadura azkartzeko helburuarekin eta proben iraupena laburtzeko asmoz. Baldintza horietan, euskarri gisa eroankortasun termiko handiko materialen erabilpenak, aukera zabaltzen al du industria mailan egungo hozgarri likidorik gabeko diamantatze prozesu ekologiko berria garatzeko?

2.5. atalean adierazi den bezala, askoz gehiago dira artezketa prozesu ekologikoagoa aurkitzeko gauzatutako ikerketak, diamantagailuaren inguruan eginikoekin alderatuta. Baina, oro har, prozesu ekologiko bat definitzeak makinatik hozgarri sistema kentzea dakar, ez baitu zentzurik artezketa hozgarririk gabe egiteak eta diamantatze zikloa beti bezala gauzatzeak, hots, hozgarri kantitate handiekin. Kapitulu honetan diamantatze prozesuan erabilitako hozgarria erabat kentzeko proposamena egingo da, euskarri gisa eroankortasun handiko materiala eta haize hotzeko hozgarri sistema konbinatuz.

Ez ekologikoki bakarrik, baizik eta teknikoki ere hozgarririk gabeko diamantatze prozesua, ohiko prozesuarekin (hozgarriarekin) alderatuta, efizientea den aztertzeko 4.1.2.1. ataleko entsegu esperimentalen diseinua eta lortutako emaitzak erreferentziazat hartuz, proba gehiago egin dira. Ondorengo paragrafoetan gauzatutako entsegu eta emaitzen azalpen guztiak erakusten dira.

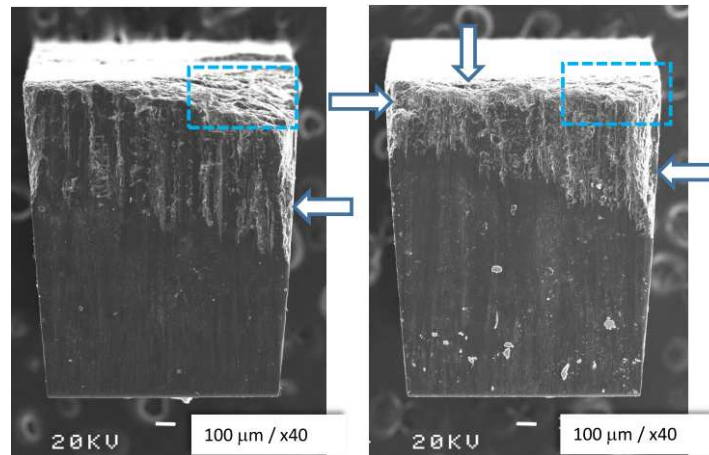
4.3.2. Industriari begirako hozgarririk gabeko diamantatze proposamena

Orain artean eginiko lanarekin baieztatu da euskarri gisa erabilitako materialaren eroankortasun termikoak baduela eragina diamanteak jasandako tenperatura maximoan eta diamantean zehar barreiatutako bero kantitatean. Kobrearen erabilpenarekin

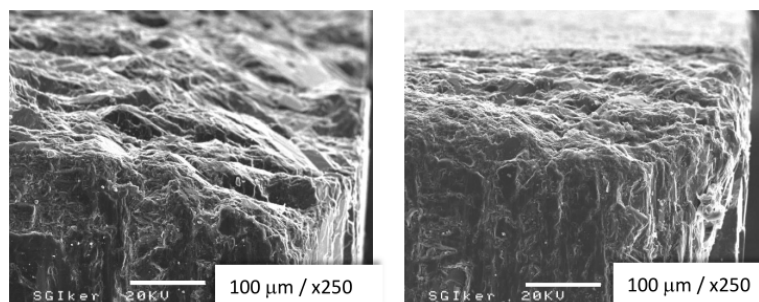
diamanteak jasandako tenperatura eta higadura maila askoz txikiagoak dira altzairuarekin jasandakoak baino. Dena dela, proposamenaren erabilpen industrialak aztertzeko, hozgarririk gabeko irtenbidea (kobrezko euskarriarekin) gaur egun industrian ohikoa den prozesuarekin konparatu beharra dago, hau da, altzairuzko euskarriarekin eta hozgarriarekin.

4.3.2.1. Entsegu esperimentalak

Beraz, altzairuzko euskarria, CBL70J7V489 artezarria eta % 4-an emultsionatutako Rhenus F-SYN100 hozgarria erabiliz 4-1. taulako 2. entseguarekin errepikatu da, bien artean lan baldintza kritikoak dituenak ($a_d = 30 \mu\text{m}$ eta $U_d = 2$). Pirometroa, hozgarriaren presentzian, ez da gai tenperatura neurtzeko, eta, beraz, ez da tenperatura daturik hartu entsegu hauetan; jasotako datuak potentziaren (4-31. irudia) eta diamantearen SEM bidezko higadura irudi grafikoak (4-29. irudia) izan dira.



4-29. irudia: Kobrezko euskarriarekin eta hozgarririk gabe erabilitako diamantearen eta altzairuzko euskarriarekin eta hozgarri likidoarekin erabilitako diamantearen SEM irudiak (ezkerrean eta eskuinean, hurrenez hurren).

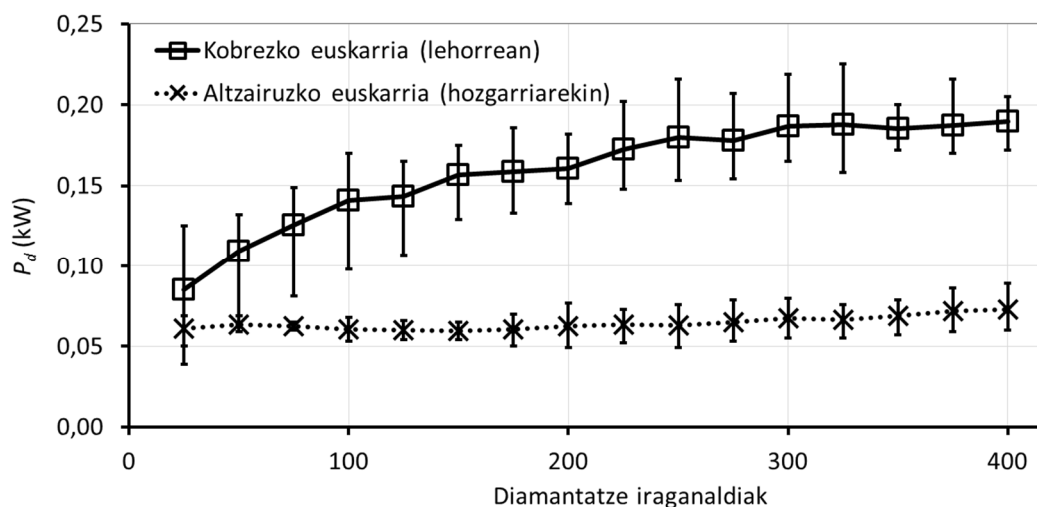


4-30. irudia: : 4-29 irudian aukeratutako azalaren SEM irudi handituak (kobrezko euskarriarekin ezkerrean eta altzairuzko euskarriarekin eskuinaldean).

Azterketa kuantitatiborik egin gabe, diamanteetan ikusitako higadura eta haustura mailari so eginez gero, esan liteke kobrezko zein altzairuzko euskarriarekin lan egin duten diamanteen higadura mekanikoak oso antzekoak direla, biak ere, nagusiki, diamantearen eta ale urratzaileen talka azalera inguruan finkatuta; baina, lehen kasuan higadura maila apur bat handiagoa dela esan liteke. Txostenaren sarreran eta azterketa orokorrean esan da diamantatze prozesua oso estokastikoa eta neurri baten aleatorioa ere badela, aldagai ugarik parte hartzen dutelako eta guztiak kontrolatzea oso zaila delako (artezarrien konposaketa, esate baterako); diamanteek jasandako higadura ez-uniformea izan liteke horren adibide.

Potentzia kurbak (4-31. irudia) dio hozgarriak bere funtzioa betetzen duela altzairuzko euskarriarekin lan egiten denean; batetik, hozgarriaren lubrifikatzaile funtzioaren eraginez, hozgarririk gabekoan baino balio txikiagoak neurtu direlako (ikusi 4-13. irudia), eta, bestetik, denbora osoan egonkor mantentzen delako 400 iraganaldietan. Horrek esan nahi du euskarriak ez duela dilatazio termikorik jasan eta, ondorioz, diamantearen punta denbora osoan makinaren kontrolak agindutako tokian mantendu dela (makinaren doitasunaren arabera).

Azken iraganaldietan kobrezko euskarriarekin neurtutako balioak altzairuzkoarekin neurtutakoak baino % 150 aldiz handiagoak izan dira, euskarriaren dilatazio termikoak eragiten duen diamantatze sakoneraren handitzearen eta, lubrifikatzailearen gabezia, marruskadura indarren handitzearen ondorioz.

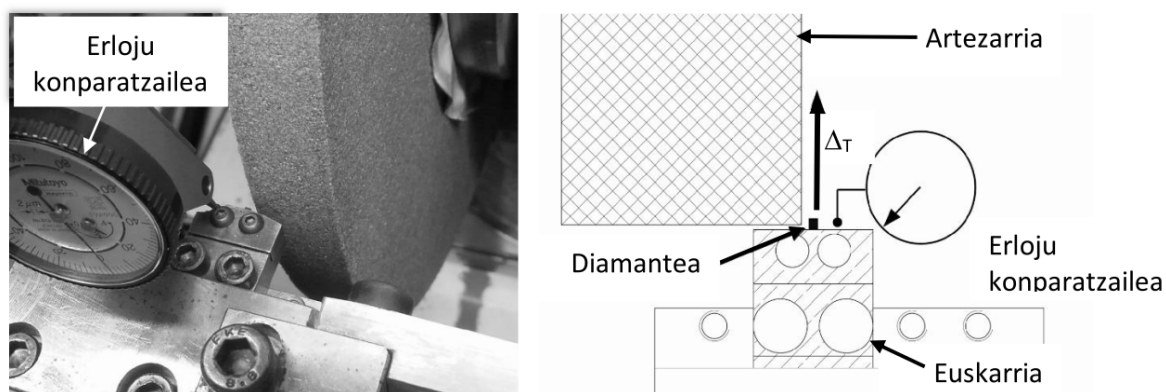


4-31. irudia: Kobrezko euskarria eta hozgarririk gabe eta altzairuzko euskarria eta hozgarri likidoarekin neurtutako potentzia maximoen batezbestekoa.

Potentzia neurketen dispersioari buruz, kobrezko euskarriari dagokion kurbaren azterketaren 4.1.3. atalean egin da (ikusi 4-13. irudia). Altzairuzko euskarriarekin eta ohiko hozgarri sistemarekin jasotako potentzia balioei dagokienez, berriz, batez besteko aldakortasun koefizientea % 14-koa izanik, entsegu guztietan neurtutako balio maximoaren eta minimoaren arteko diferentzia 0,04 kW-ekoa da, benetan balio oso txikia.

4.3.2.2. Kobrezko euskarriaren dilatazio termikoak

Entsegu hauetan erabilitako altzairuzko eta kobrezko euskarriek jasandako dilatazio termikoak diamantatze prozesuaren doitasunean izan dezakeen eragina aztertzeko, 3 μm -ko doitasuneko Mitutoyo etxeko erloju konparatzaile bat erabiliz, diamantearen puntaren Δ_T desplazamendua neurtu da 4-1. taulako 2. lan baldintzak erabiliz (ikusi 4-32. irudia).



4-32. irudia: Euskarriaren dilatazio termikoen neurketa erloju konparatzaile bidez.

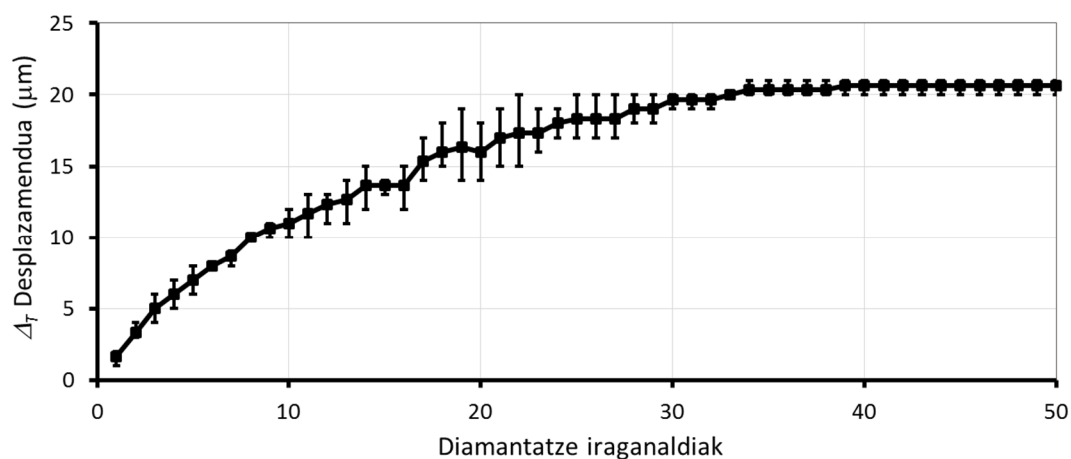
Argitaratutako ikerketa batzuen arabera (Chen et al., 2002; Denkena et al., 2005; Klocke eta Linke, 2008; Mochida et al., 2009) 10 diamantatze iraganaldirekin nahikoa da artezarriaren zorrozketara egokia gauzatzeko, beti ere hozgarri sistema erabiliz. Atal honetan, ordea, 50 iraganaldi gauzatu dira, bata bestearen jarraian, diamante eta euskarriaren egonkortasun termikoa aztertzeko.

Hiru aldiz errepikatu da entsegua eta lortu den Δ_T desplazamendu termikoaren eboluzioa 4-33. irudian ikus daiteke kobrezko euskarria erabili den kasurako. Nabaria da euskarriaren dilatazio termikoa handitzen dela iraganaldi kopuruarekin batera. Batez besteko balioari kasu eginez, 30 iraganaldi igaro ostean, egonkortasun termikoa lortzen dela esan liteke, 20 μm -ko desplazamenduarekin. 10 iraganaldiren ostean, berriz, 11 μm -ko desplazamendua

neurtu da; iraganaldi bakoitzeko diamantatze sakonera 30 μm -koa dela kontuan izanik, desplazamendu balio horiek onartezinak dira, eta, esan behar da hozgarririk gabeko diamantatze sistema hau ez dela teknikoki inolaz ere bideragarria. Dilatazio termikoen eraginez diamantatutako benetako sakonera programatutakoa baino handiagoa da, eta, makinaren kontrolak ez du diferentzia hau kontuan izaten. Ondorioz, diamantatze ziklo berria egiterakoan, derrigorrezkoa da harriaren eta diamantearen arteko zeroak edo erreferentziak berriro ere definitzea.

Aipatu beharra dago, era berean, proba bakoitzaren ostean, euskarria hoztean, erloju konparatzailearen orratza berriro ere 0 baliora bueltatu dela kasu guztietan; hau da, nolabait, prozesua errepikakorra dela esan liteke. Bestalde, errepikatutako probetan neurtutako desplazamendu balioen batez besteko dispersioa 2 μm -koa izan da, eta maximoa 5 μm -koa.

Proba berdinean, altzairuzko euskarria eta hozgarri sistema erabiliz (4-35. irudia) 1 μm -ko desplazamendu maximoa neurtu da 10 iraganaldi ondoren eta 2 μm -koa 50 iraganaldiren ostean (neurketa aparailuaren doitasuna 3 μm -koa dela kontuan izanik).



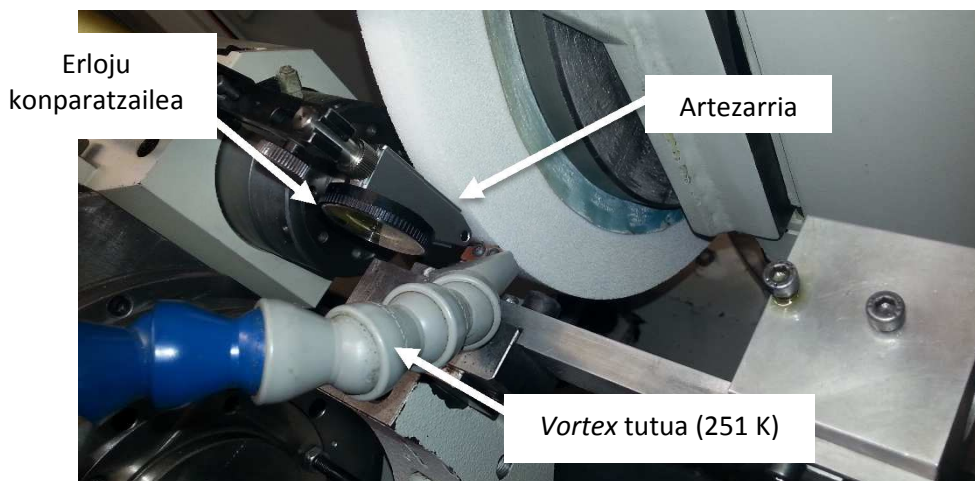
4-33. irudia: Kobrezko euskarrian eta hozgarririk gabe, diamantearen puntan neurtutako desplazamendua mikratan.

Ondorio gisa, esan liteke kobrezko euskarriarekin hozgarririk gabeko konponbidea bideragarria dela, diamanteak jasaten duen higadura maila txikia kontuan izanik, baina ez doitasun aldetik, dilatazio termikoen ondorioz. Beraz, hozgarri sistemaren bat edo beste beharrezkoa da diamantatze prozesuan sortzen den beroa barreiatzeko, eta diamantean eta euskarrian eraginik ez izateko.

4.3.2.3. Diamantatze prozesuaren doitasuna lortzeko haize hotzeko hozgarria

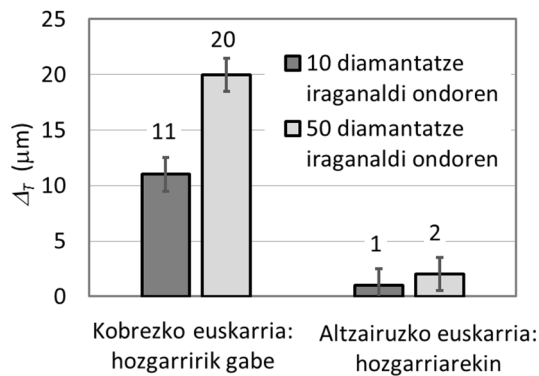
Kobrea bezalako eroankortasun termiko handiko material batez diseinatutako diamante euskarri batek hozgarri sistema bat behar du doitasunezko diamantatze prozesua gauzatzeko, kobreaken dilatazio termiko koefiziente altua kontuan izanik. Bestalde, artezketa prozesu ekologikoa definitzeko, egungo likido lubrikatzaileen kontsumoa gutxitu edo hutseratu beharra dago. Ikerketa honetan *Vortex* tutu bidez sortutako haize hotzeko hozgarri sistema erabiltzea erabaki da (251 K-etan dagoen haize fluxua) diamantatze prozesuan sortutako bero kantitatea diamantagailutik eta euskarritik at barreiatzeko.

Aurreko entseguan egin den bezala, oraingoan ere diamantearen puntaren desplazamendua neurtu da erloju konparatzaile bidez (50 iraganalditako 5 proba egin dira) eta oraingoan erlojuaren orratzak ez du 2 μm -ko diferentzia baino gehiago markatu (ikusi 4-36. irudia), hots, altzairuzko euskarria eta ohiko hozgarri sistema erabiliz neurtutako desplazamendu maila bera neurtu da. Beraz, esan liteke hozgarri sistema egokia izan litekeela industrializazio prozesu batetarako doitasun maila aldetik.

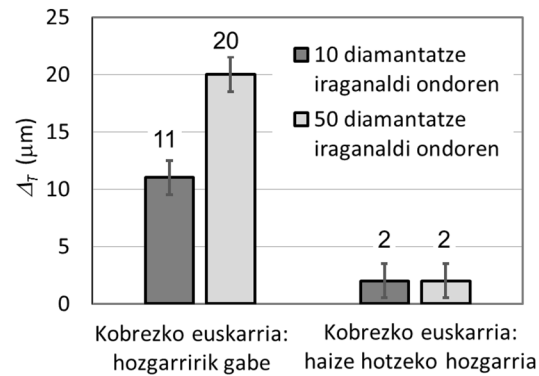


4-34. irudia: Diamantatze prozesua haize hotzeko hozgarri sistemarekin (*Vortex* tutua)

Kostu aldetik *Vortex* tutu sistema 300 €-an eros daiteke eta instalakuntza ez da batere zaila. Kontsumo aldetik 6 bar-etara dagoen haize sarea baino ez da behar.



4-35. irudia: Kobrezko euskarrian hozgarririk gabe eta altzairuzko euskarrian hozgarri likidoarekin neurtutako diamantearen Δr batez besteko desplazamenduak.

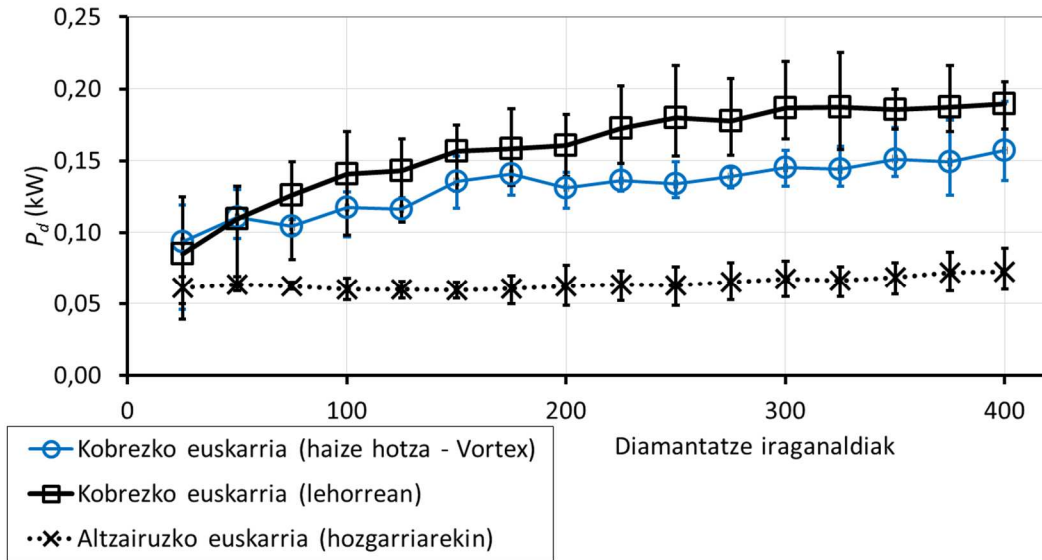


4-36. irudia: Kobrezko euskarrian hozgarririk gabe eta altzairuzko euskarrian hozgarri likidoarekin neurtutako diamantearen Δr batez besteko desplazamenduak.

Haize hotzeko fluxuarekin neurtutako potentzia balioei so eginez gero (ikusi 4-37. irudia), potentzia balioa zertxobait txikiagotu dela antzeman daiteke, lehorreko baldintzan neurtutakoekin konparatuta (batez beste, % 16), alde batetik, dilatazio termikoen gutxitzearen eta, bestetik, haizeak daraman lubrikatzaile kantitate txikiaren eraginez, ziur aski. Horrez gainera, kurbaren joera nahiko laua da, hau da, ez dago aurreko kasuetan ikusi den adinako menpekotasunik potentziaren eboluzioaren eta diamantatze iraganaldi kopuruaren artean (entseguak iraun duen denboran behintzat), eta prozesuaren egonkortasun maila altua da; % 4-ko aldakortasun koefizientea neurtu da entsegu guztiko balioak kontuan hartuz. Halere, hozgarri likidoak eskaintzen duen lubrifikatze maila askoz handiagoa da eta, horregatik, ohiko baldintzetan altzairuzko euskarriarekin eginiko diamantatze probetan neurtutako potentzia balioak txikiagoa izaten jarraitzen du, batez beste %50.

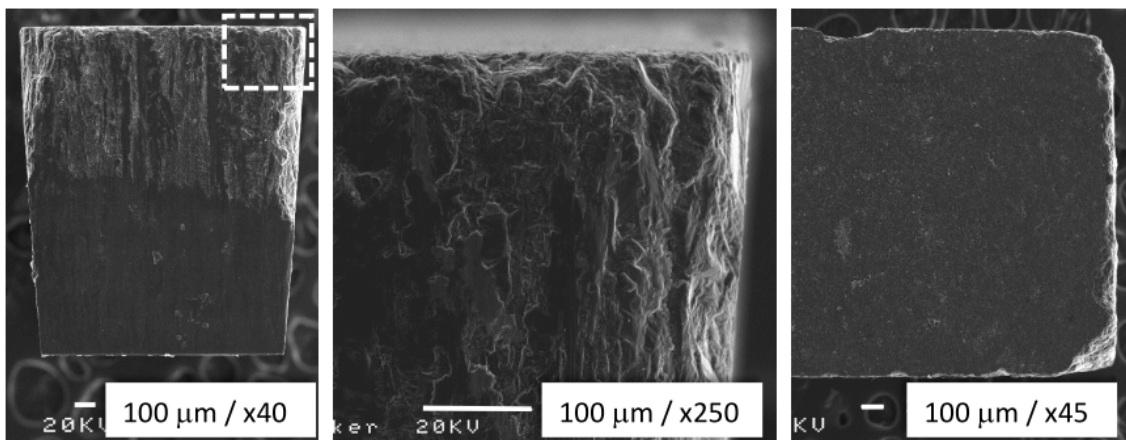
Portzentajetan potentzia kontsumo aldea oso handia izan arren, balio absolutuan ez da horrela gertatzen, baldintza hauetan neurtutako potentzia maila oso txikia baita (0,05 eta 0,15 kW artean). Ohiko hozgarri likidoko eta haize hotzeko hozgarri sistemen erabilpenen arteko benetako energia kontsumoa alderatzeko, artezarriaren kontsumo elektrikoa ez ezik, sistema horiek eragindako beste energia kontsumo batzuk ere kontuan hartu behar dira, hala nola, hozgarri likidoak ponpatzeko motorrak, hozgarri likidoak birziklatzera eramateko garraioen kontsumoa, hozgarri likidoen garbiketa eta mantentzeko makineria, etab. (Sanchez et al., 2010). Denak aintzat hartuz gero, ez dago inongo zalantzarik, energia

kontsumoaren ikuspuntutik, diamantatze prozesua askoz ere ekologikoagoa dela haize hotzeko hozgarri sistema erabilita. Interesgarria litzateke, ekonomikoki eta ekologikoki, sakon aztertzea zer nolako eragina izango lukeen artezketa prozesuan lehorreko hozgarri sistema erabiltzeak.



4-37. irudia: Kobrezko euskarrian hozgarririk gabe, kobrezko euskarrian haize hotzeko hozgarriarekin eta altzairuzko euskarrian hozgarri likidoarekin neurtutako potentzia maximoen batezbestekoak.

Azkenik, entsegu hauetan erabilitako diamanteari eginiko SEM irudiak aztertuz gero (4-38. irudia), ondoriozta liteke diamanteak jasandako higadura maila txikia dela; ez behintzat altzairuzko euskarrian eta hozgarri likidoarekin diamanteek jasandako higadura maila baino handiagoa (ikusi 4-29. eta 4-30. irudiak).



4-38. irudia: Kobrezko euskarria eta haize hotzeko hozgarri sistema erabiliz frogatutako diamantearen SEM irudiak, aurretiko irudia (ezkerraldean), aurretiko irudi handitua (erdialdean) eta goitiko irudia (eskuinaldean).

Beraz, azken ondorioetara pasatu aurretik, esan liteke proposatutako diamantatze metodoak prozesu ekologikoaren eta diamantearen bizi iraupenaren ikuspuntutik betetzen duela doktorego tesi honetan planteatutako helburuetako bat, hots, artezketa prozesu ekologikoa definitzea, diamante prozesuko hozgarri likidoaren erabilpena erabat gabetuz.

5.Kapitulua

Ondorioak, ekarpenak eta etorkizuneko ikerketa ildoak

5. ONDORIOAK, EKARPENAK ETA ETORKIZUNEKO IKERKETA ILDOAK

5.1. ONDORIOAK

Doktoretza tesi honen bidez, diamantatze prozesuak artezketan duen benetako garrantzia nabarmendu nahi izan da, bereziki artezketaren teknologian diharduen komunitate zientifikoan oso gutxi landu diren bi esparruri dagokienez: karga termiko eta mekanikoen eraginez diamanteak izaten duen higaduraren eboluzioa eta ohikoa den hozgarri sistema likidorik gabeko diamantatze prozesuaren azterketa termikoa. Diamantatze prozesuan eragiten duten aldagaiak ugariak izanik (a_d diamantatze sakonera, U_d gainezarpen ratioa, diamantearen materiala eta puntaren geometria, hozgarri sistema, ale urratzaileen tamaina eta gogortasuna, etab.), eta horietako bakoitzak diamantatze prozesuaren errendimenduan nola eragiten duen zehazten duten lege edo formularik ez dagoenez, ikerketa osoa hainbat lan baldintzatan egindako proba esperimentaletan oinarritu da, ikerketarako metodo inductiboa aplikatuta: entseguen diseinua lortu nahi den helburuaren arabera, entseguen gauzatzea, datuen eskuratzea, horien azterketa eta ondorioen aurkezpena. Hurrengo atalean azaltzen den bezala, etorkizuneko ikerketa ildo gisa proposatzen da esperimentalki lortutako emaitza eta ondorioak (batzuk, behintzat) edozein kasutarako (ez soilik probatutako lan baldintzetarako) baliagarri egingo dituen modelo termiko-mekaniko baten garapena gauzatzea.

Hurrengo puntuetan, egindako lanaren ondorio garrantzitsuenak azaltzen dira:

- I. Artezketeta prozesua da, oraindik ere, balio erantsi handiko piezetan gainazal akabera ona eta dimentsio eta geometria perdoi estuak bermatzen dituen prozesu egokiena hainbat eta hainbat sektoretan (optika, aeronautika, energia sorgailu, etab.); hori dela eta, artezketaren arloko ikerketa kopuruak gora egiten jarraitzen du. Diamantatze prozesuari dagokionez, ordea, azken urteotako argitalpen kopuruak gora egin duen arren, oraindik ere oso urriak dira, eta badago zer ikertu diamantatze prozesuaren inguruan.

- II. Argi ikusi da artezketa bidez lortutako piezaren kalitatea eta artezketa prozesuaren beraren errendimendua diamantatze prozesua definitzen duten hainbat aldagairen baitan daudela (Chen eta Rowe, 1996a; Wegener et al., 2011). Ondorioz, artezarriko ale urratzaileen higadura zaintzea bezain garrantzitsua da diamantearen eta ale urratzaileen arteko talken ondorioz diamanteak jasaten dituen higadura eta hausturak zaintzea.
- III. Diamantearen biziraupenaren bukaera eta artezarria zorrozteko diamantatze ziklo optimoa kalkulatzeko, besteak beste, sentso-re mota bat baino gehiago erabili izan dira garatutako ikerketetan, baina, guztien artean, soinu igorpen sentso-reak izan dira erabilienak, besteekin alderatuz eskaintzen dituzten abantailak kontuan izanik: makinaren bibrazio eta kanpo zaraten frekuentzia baino askoz goragoko lan frekuentzia tartea (50-1.000 kHz), sentikortasun maila handia energia aldaketa txikiekin lan egiteko, merkeak, txikiak, etab.
- IV. Asko ez diren arren, egin izan dira hiruzpalau azterketa diamantearen biziraupenaren amaiera zehazteko. Horiek neurona sare artifizial edo logika lausoko ereduak sortu dituzte diamantatze prozesuan jasotako soinu igorpen eta potentzia seinaleak sarrerako informazio gisa erabiliz. Ikerketa horietan, diamantearen hiru higadura egoera desberdin baino ez dira erabiltzen erreferentzia gisa sortutako modelorako: berria, erdi higatua eta erabat suntsitua, baina ez da diamantearen higaduraren eboluzioa aztertzen prozesu osoan.
- V. Mota bereko lau diamante naturalen azterketa topografikoa egin da, eta ikusi da, itxuraz behintzat, badela alderik batetik bestera geometriaren uniformetasun, gainazal akabera eta pitzaduren presentziari dagokionez. Aurrez akabera okerreneko diamantagailuarekin (D2) lortutako higadura eta haustura maila denen arteko handiena izan da (0,438 mm²-ko punta higadura azalera % 600-eko hazkundearekin); akabera itxura oneneko diamantearekin (D1) lortutakoa, ordea, higadura maila txikienekoa izan da (0,339 mm²-ko azalera % 280-ko hazkundearekin). Esan daiteke, beraz, diamanteek hasieran erakusten duten kalitatea beraien biziraupenaren adierazgarria dela.

- VI. Lau diamantagailuetan esperimentalki neurtutako b_d aldagaiaren balioa, uneoro, Marinescu et al.-ek (2007) diamante puntako azaleraren gehieneko diametroarentzat finkatutako 0,6 mm balioaren gainetik dago.
- VII. Neurtutako aldagai guztien artean, diamantatze prozesuko potentzia kontsumoaren eboluzioak azaltzen du hobekien diamantearen higaduraren bilakaera, bi kurbek joera oso antzekoa baitute: hasieran, igoera fase bat erakusten dute eta, jarraian, kurbaren nolabaiteko egonkortasun fase bat, diamantearen puntan higadura aztarna nabariak eta hausturak gertatzen direnean; izan ere, mota bereko lau diamantagailuekin lortutako potentzia eta higadura azalera kurben arteko zatidurak 0,4 - 0,6 tartean daude. Horrek esan nahi du bi aldagai horiek zuzeneko lotura dutela, batetik, eta bestetik, egindako entseguek errepikakortasun maila ona erakusten dutela.
- VIII. Filho et al.-ek (1999) ondorioztatu zuten diamantatze prozesuko S_d eta a_d parametroak aldatuz diamantearen eta artezarriaren arteko talka azalera eta, ondorioz, horien arteko talka kopurua ere aldatu egiten zirela. Prozesuan neurtutako soinu igorpen seinalearen edukia talka kopuruarekiko proportzionala zela frogatu zuten, entsegu esperimentalen bidez. Kasu honetan, ondorioztatu da soinu igorpen seinalearen edukia diamantearen eta artezarriaren arteko kontaktu azalera jasaten duen higaduraren menpe dagoela, eta $S_d \cdot a_d$ azalera jasandako aldaketak soinu igorpen seinaleak erakusten dituela.
- IX. Diamantatze prozesuan jazotzen diren hainbat gertakari oso zailak dira modelo mekaniko eta termikoen bidez modelizatzen; besteak beste, diamantean gertatzen diren higadura eta hausturak eta diamantearen eta forma aleatorioko ale urratzaileen arteko talkak. Ondorioz, diamantearen higaduraren eboluzioa eta diamantatze prozesuaren azterketa termikoa entsegu esperimentaletan oinarritu da, nagusiki. Lan baldintza konkretu batzuetan egindako diamantatze prozesuetatik jasotako informazioa aztertu ondoren (diamantearen puntaren tenperatura, soinu igorpen eta diamantatze potentzia seinaleak, higadura azalera, piezaren gainazaleko zimurtasun balioak etab.), diamanteen biziraupenaren amaiera zehazten duen kurba adierazle bat definitu da, zeinak punta balio batzuk erakusten dituen diamantearen puntan higadura eta haustura nabariak gertatzen direnean. Diamanteen higaduraren inguruko ikerketa

erreferentzia gisa hartuta, onartu da diamantearen biziraupenaren amaiera diamantearen puntaren higadura azaleraren bigarren fasea (hazkunde lineala) bukatzen denean gertatzen dela (Marinescu et al., 2013).

- X. Kurba adierazle hori kalkulatu da soinu igorpen eta diamantatze prozesuko potentzia seinaleen azken bost balioen aldakortasun koefizienteen alderantzizkoen biderkadura emaitzekin. Kurba adierazlearen epe laburreko eta luzeko joerak identifikatzeko, azken 5 balioak erabiltzea erabaki da, eta, kontutan izanik entseguetan balio bakoitzak 25 diamantatze iraganaldiko zikloa ordezkatzeko duela, ulergarria da kurba adierazlearen punta balioak, kasu gehienetan, azalera kurbako bigarren fasearen amaierarekiko desfasea erakustea.
- XI. Metodologia bera aplikatu da beste hiru lan baldintzetan egindako entseguetan, eta lortutako ondorioak aurrekoen oso antzekoak izan dira.
- XII. Ekologikoki, ingurunearekiko kalteak murrizten dituen bestelako diamantatze prozesu bat definitu da, ohiko sistema hozgarririk gabea. Aitzitik, entseguetan erabilitako lubrifikatzailearik gabeko haize hotzeko hozgarriarekin neurtutako batez besteko kontsumo potentzia % 104 handiagoa da ohiko prozesuaren aldean, eta, beraz, efizientzia energetiko txikiagoko prozesua bilakatzen da. Halere, esan beharra dago altzairuzko eta kobrezko euskarriekin egindako entsegu horietan jasotako potentzia kontsumo maila oso txikia izan dela, eta, ondorioz, potentzia alde hori ez dela kezagarria.
- XIII. Lehorreko baldintzetan egindako diamantatze prozesuan diamanteek jasandako higadurak eta hausturek diamantearen eta ale urratzaileen arteko talken ondorioz sortutako bero kantitatean dute jatorria, nagusiki. Bero horrek diamantean sortzen duen kalte termikoa minimizatzeko, euskarri gisa eroankortasun termiko handiko materiala erabiltzea proposatu da; kasu honetan, kobrea. Entsegu guztietan, altzairuzko euskarriarekin neurtutako diamantearen puntaren tenperaturak handiagoak izan dira kobrezko euskarriarekin neurtutakoen aldean, batez beste % 34 (% 47-ko diferentzia maximoa eta % 23-ko minimoa). Altzairuzko euskarriarekin, 815-1.531 K arteko tenperatura maximoak neurtu dira, eta kobrezkoarekin, berriz, 623 K (pirometroaren neurketako tarteko balio minimoa) eta 1.095 K arteko balioak.

- XIV. Altzairuzko euskarriarekin egindako diamantatze entsegu batzuetan, lan baldintza gogorrenekin egindakoetan, diamantearen grafitizazio tenperatura erraz gainditu da diamantearen puntan (973 K). Diamanteari eginiko SEM irudiek, itxuraz behintzat, grafitizazio aztarna garbiak erakusten dituzten arren, X izpien difrakzio bidezko azterketek ez dute halakorik baieztatu.
- XV. Bistakoa da, beraz, altzairuzko euskarriarekin erabilitako diamanteek baldintza gogorragotan lan egin dutela, horiek jasandako higadura, haustura eta tenperatura maila handiagoei erreparatuta. Kontsumitutako potentziari dagokionez, ordea, kobrezko euskarriarekin egindako entseguetan balio handiagoak jaso dira; alde hori askoz nabariagoa da lan baldintza gogorretan eginiko entseguetan, non kobrezko euskarriarekin batez beste % 75 potentzia balio handiagoak neurtu diren. Batetik, altzairuzko euskarriarekin neurtutako 1.000 K-etik gorako tenperaturek diamantearen propietate mekanikoen % 30-eko murrizketa eragin dezakete (Luque et al., 2008), diamantatze prozesuko potentzia gutxituz, eta, bestalde, kobreaken dilatazio termiko koefiziente handiagoa dela eta, euskarriaren dilatazio handiagoak diamantatze sakoneraren handitzea eragiten du, prozesuko potentzia areagotuta.
- XVI. Kobrezko zein altzairuzko euskarriak erabiliz, diamantatze prozesuan diamantean zehar bero moduan barreiatzen den kontsumitutako potentziaren portzentajea (bero partizioa) oso antzekoa da. Balio absolutuan, ordea, kobrezkoarekin barreiatutako bero kantitatea altzairuzkoarekin barreiatutakoa baino % 39 handiagoa da, eta diamantearen puntan neurtutako tenperatura, berriz, % 44 txikiagoa. Hori guztia gertatzen da kobreak altzairuaren aldean duen eroankortasun termiko balio handiaren eraginez (366 W/m·K eta 42 W/m·K, hurrenez hurren, 800 K-eko tenperaturan). Beraz, kobreaken dilatazio termikoak kontrolatuz gero, esan daiteke kobrea euskarriako material gisa erabiltzea proposamen egokia dela diamanteak jasaten duen karga termikoa murrizteko.
- XVII. Kobrezko euskarriarekin, behar-beharrezkoa da hozte sistemaren bat erabiltzea euskarriaren dilatazio termikoak minimizatzeko. 10 eta 50 diamantatze iraganaldiko entseguetan, diamantearen puntaren 11 μm eta 20 μm -ko desplazamenduak neurtu

dira, hurrenez hurren. *Vortex* tutu bidezko sistema hozgarriarekin, gehienez 2 μm -ko desplazamenduak neurtu dira.

- XVIII. Aurretik esan dugu doktoretza tesi honetan eginiko ikerketa ia osoa lan baldintza desberdinetan egindako proba esperimentaletan oinarritu dela eta, erakutsi den bezala, diamantatze prozesua hobeto ulertzen lagun dezaketen emaitza oso interesgarriak lortu dira. Dena dela, ez da ahaztu behar entseguak esperimentalki egiteko tresneriak, balioen irakurketak egiteko erremintek eta ikertzaileak berak egindako akatsen batuketak nolabaiteko ziurgabetasuna ematen diotela lortutako emaitzei eta ondorioei (zehaztasuna diamantatze prozesuan zeroak egiteko orduan, CAD bidezko higadura neurketak, etab.). Batzuk besteak baino zailagoak dira kuantifikatzeko, baina lan honetan guztiak hartu dira kontuan.

5.2. EKARPENAK

Laburbilduta, hauek dira doktoretza tesi honek egindako ekarpen nagusiak:

- I. **Punta bakarreko diamantagailuaren hasierako forma geometrikoak eta gainazalaren itxurak diamantearen higaduran izan dezaketen eragina aztertu da.** Ez bakarrik diamantearen puntaren erradioak edo zorrozetasunak (beste ikerketa batzuetan egin den bezala), baita diamanteak (diamante naturala, kasu honetan) hasieran duen forma geometrikoak eta horren uniformetasunak, gainazal akaberak eta pitzadurek diamantearen higaduraren eboluzioan izan dezaketen eragina ere aztertzeke, ausaz hautatutako erreferentzia bereko lau diamantagailu hartu eta lan baldintza bereko diamantatze eta artezketa entseguak gauzatu dira; diamanteen higaduraren inguruko erreferentzia bibliografikoen artean, ez da aurkitu diamantearen higaduraren eboluzioa aztertzen duen erreferentziarik. Aurrez aipatutako diamantearen kalitate irizpideen arabera, kalitate txarreneko diamantearekin neurtu dira diamantearen puntaren higadura azalera handi eta ezegonkorrenak, diamantatze potentzia eta artezketako energia espezifikoko balio handienak, diamantagailuaren eta artezarriaren arteko kontaktu luzera balio handienak eta, oro har, parametro horien guztien bilakaera ezegonkorrenak

(entseguek iraun duten artean). Beraz, baieztatu daiteke diamantearen kalitate txarra prozesuaren ezegonkortasun maila handiarekin lotuta dagoela.

- II. **Diamanteen biziraupenaren amaiera zehazten duen metodologia bat proposatu da, diamantatze prozesuan jasotako potentzia eta soinu igorpen seinaleak elkartzen dituen balio estatistiko baten bidez.** Diamantagailuaren biziraupenaren amaiera diamantagailuaren puntaren higadura azaleraren eboluzio kurba bigarren fasearen amaierara iristen denean gertatzen dela oinarri hartuta, egoera hori noiz antzemateko funtzio estatistiko bat definitu da. Funtzio estatistiko horrek, diamantatze prozesuko iraganaldi bakoitzeko potentzia eta soinu igorpen seinaleen *RMS* balioak kalkulatu eta azken iraganaldietako balioak (azkeneko 5-ak) kontutan hartuta, bi parametro horien aldakortasun koefiziente balioen biderkaduraren alderantzizkoa kalkulatu du. Diamantatze ziklo bakoitzeko balio bat kalkulatu da eta, horrela, kurba adierazlea deritzona osatu da; kurba horrek punta balio nabariak erakusten ditu, eta horiek bat datoz higadura kurbako bigarren fasearen amaierarekin. Beraz, definitutako kurba adierazlea erabilgarria izan daiteke diamantearen biziraupenaren amaieraz ohartzeko.
- III. **Lehorreko diamantatze prozesu ekologiko berritzaile bat garatu da, diamantearen euskarri gisa eroankortasun handiko materiala erabiliz eta haize hotzeko sistema hozgarria aplikatuz.** Jakina da, eta horretarako ez da esperimendu asko egin behar, euskarri gisa altzairuak baino eroankortasun handiagoa duen material bat erabiliz gero, diamantatze prozesuko beroa hobeto barreiatuko dela euskarrian zehar eta diamanteak jasango duen karga termikoa txikiagoa izango dela. Baina diamantatze prozesuan askatzen den energia guztia diamantearen eta ale urratzaileen arteko talken zuzeneko ondorioa izanik, energia hori teorikoki kalkulatzeko oso konplexua da, besteak beste, diamantatze prozesua oso aleatorioa delako; horretarako, entsegu esperimentaletan oinarritu beharra dago. Horrez gainera, kobreak (entseguetan erabilitako materiala) dilatazio termiko koefizientea altzairuarena baino handiagoa da, eta horrek euskarriaren dilatazio termikoa eta, ondorioz, diamantatze sakonera handitzen ditu, prozesuko tenperatura eta potentzia igoarazita. *Vortex* tutu bidezko haize hotzeko korrantearekin zaindu da euskarriaren dilatazioa, eta lehorreko baldintzetan egindako diamantatze prozesua ohiko sistema hozgarriarekin egindako

diamantatze prozesuaren parekoa izatea lortu da: dilatazio termiko kontrolatua, diamantearen higadura maila oso antzekoa eta kontsumitutako potentzia maila antzekoa eta egonkorra.

- IV. **Diamantatze prozesuan askatutako energia guztitik, diamantagailuan zehar barreiatutako bero kantitatea kalkulatzeko modelo teoriko-esperimentalak garatu da.** Diamantatze prozesuan diamantearen eta artezarriaren arteko talken eraginez kontsumitutako potentzia eta kontaktu azaleratik oso gertuko puntu batean neurtutako tenperatura balioak oinarri, modelo teoriko-termiko bat garatu da, inguruneko baldintza egokiak aplikatuz (konbektzio eta kondukzio koefizienteak, diamantearen eta euskarriaren materiala eta geometria, etab.) diamanterantz barreiatzen den bero kantitatea kalkulatzeko.

5.3. ETORKIZUNeko IKERKETA ILDOAK

Azkenik, doktoretza tesi honetan egindako ikerketa lanaren ildotik, jarraian etorkizunerako planteatzen diren beste ikerketa proposamen batzuk azaltzen dira:

- I. **Diamantearen biziraupena zehazteko prozesu automatizatuaren garapena.** Doktoretza tesi honetan, entsegu esperimentaletan oinarritutako metodologia bat garatu da diamanteen biziraupenaren amaiera zehazteko; metodologia horren automatizazioa ekarpen garrantzitsua izango litzateke industria mailan, diamantea aldatzeko edo zorrotzeko erabakia prozesuaren aldagaien menpe egongo bailitzateke, eta ez langilearen esperientziaren menpe. Horretarako, makina soinu igorpen eta potentzia neurgailuekin sensorizatu eta seinaleak prozesatzeko tresneria elektronikoa atxikitu beharko litzateke, diamantearen higadura zehaztuko duen programarekin.
- II. **Diamantagailu birakarien azterketa.** Industrian diamantagailu birakarien erabilera handia denez (brotxa ekoizpenean, adibidez), mota horretako diamantagailuen higaduraren bilakaera aztertzea eta prozesu ekologikoa planteatzea proposatzen da.
- III. **Epe laburreko kurba adierazlearen azterketa.** Aurrez esan den bezala, diamantearen biziraupenaren amaiera zehazteko, 5 soinu igorpen eta potentzia seinaleren balioak

erabili dira, 25 iraganaldiko ziklo bakoitzeko balio bakarra. Etorkizuneko ikerketa gisa, diamantatze ziklo laburragoak (5-10 iraganaldi) gauzatu eta iraganaldi guztietako potentzia eta soinu igorpen seinaleak prozesatzea proposatzen da, diamantearen hausturaren epe oso laburreko iragarpena egiteko.

- IV. **Diamantearen azterketa termikoa egiteko modelo termiko-mekaniko baten garapena.** Alde batetik, doktoretza tesi honetan lortutako emaitzak eta ondorioak berresteko, eta, bestetik, edozein lan baldintzatan gauzatutako diamantatze prozesuen azterketa termikoa egiteko modelo termiko-mekaniko bat garatzea proposatzen da.
- V. **Lehorreko diamantatze prozesua balioztatzea arteztutako piezetan.** Doktoretza tesi honetan egindako lanarekin ondorioztatu da kobrezko euskarria eta *Vortex* tutu bidezko haize hotzeko hozte sistema aplikatuz diamantearen higadura maila ohiko hozte sistema eta euskarriak erabiliz lortutakoaren oso antzekoa dela; horrez gainera, prozesuko potentzia kontsumo mailak ere oso antzekoak dira, eta euskarriaren dilatazio termikoa kontrolpean dago (ez da diamantearen puntaren desplazamendurik gertatzen). Etorkizuneko ikerketa ildoak litzateke proposaturiko diamantatze prozesu horrek arteztutako piezan duen eragina aztertzea, orain arte ez baita egin. Lortutako emaitzen arabera, beste sistema hozgarri ekologiko batzuekin ere probak egitea proposatzen da, ohiko diamantatze prozesuen pareko errendimendua edo hobea lortzeko helburuarekin.
- VI. **Haize hotzeko korrontearekin lehorreko baldintzetan diamantatzeko diamantagailuaren diseinu industrialak garatzea.** Hiru aldagai nagusi hartu beharko lirateke kontuan diamantagailuaren diseinurako. Lehenik eta behin, fabrikazio kostua, euskarri gisa erabili beharreko materialak baldintzatuta, neurri handi batean (fabrikazio prozesuaz gain); eroankortasun termiko balio handiena duten materialak kobrea, urrea eta zilarra izanik, zentzuzkoena izango litzateke kobrea hautatzea. Bigarrenik, diamantagailuaren propietate mekaniko eta termikoak: mekanikoki, agian diamantearen beraren propietateak garrantzitsuagoak izango lirateke, eta termikoki dilatazio termikoak minimizatu beharko lirateke (kobreak dilatazio termiko koefizientea urre eta zilarraren artean dago). Azkenik, lehorreko sistema

hozgarriaren konfigurazioa garatu beharko litzateke: probetan egin den bezala, tutu bidez haize hotza bota euskarri, diamante eta artezarriaren ingurura, edo, bestela, euskarriaren gorputz barrenean hozte sistema bat garatzea.

- VII. **Beste sistema hozgarri ekologiko batzuen erabilera diamantatze prozesuan.** Kontuan izanik, ohiko diamantatze prozesuaren aldean, *Vortex* tutu bidezko haize hotzeko korrontearekin % 104 igo dela potentzia kontsumoa, diamantatze prozesuan lehorreko baldintzetan edo lubrifikatzaile kantitate txikiko beste teknologia batzuen erabilera ikertzea proposatzen da, diamantatze prozesuko makinaren kontsumoa murrizteko asmoz.

BIBLIOGRAFIA

- Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., 2012. Monitoring of Grinding Burn by Acoustic Emission, in: Sikorski, W. (Arg.), Acoustic Emission. InTech, or. 341–364.
- Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., Oliveira, J.F.G., 2002. A method for burning detection in grinding process using acoustic emission and effective electrical power. *CIRP J. Manuf. Syst.* 31, 253–257.
- Aguiar, P.R., Serni, P.J., Bianchi, E.C., Dotto, F.R., 2004. In-process grinding monitoring by acoustic emission. *2004 IEEE Int. Conf. Acoust. Speech, Signal Process.* 5, 1–4.
- Aguiar, P.R., Souza, A.G.O., Bianchi, E.C., Leite, R.L., Romano, F., 2009. Monitoring the dressing operation in the grinding process. *Int. J. Mach. Mach. Mater.* 5, 4–22.
- Ambhore, N., Kamble, D., Chinchankar, S., Wayal, V., 2015. Tool condition monitoring system: A review. *Mater. Today Proc.* 2, 3419–3428.
- Barczak, L.M., Batako, A.D.L., Morgan, M.N., 2010. A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 50, 977–985.
- Ben Fredj, N., Sidhom, H., Braham, C., 2006. Ground surface improvement of the austenitic stainless steel AISI 304 using cryogenic cooling. *Surf. Coatings Technol.* 200, 4846–4860.
- Brinksmeier, E., Brockhoff, T., Walter, A., 1997. Minimalmengenschmierung und Trockenbearbeitung beim Schleifen. *Härterei-Technische Mitteilungen - HTM* 52 3, 166–170.
- Brinksmeier, E., Çinar, M., 1995. Characterization of Dressing Processes by Determination of the Collision Number of the Abrasive Grits. *Ann. Cirp* 44, 299–304.
- Byrne, G., Dornfeld, D.A., Inasaki, I., Ketteler, G., König, K., Teti, R., 1995. Tool Condition Monitoring (TCM) - The Status of research and Industrial Application. *Anna* 44, 541–567.
- Chen, S., Jen, Y.W., 2000. Data fusion neural network for tool condition monitoring in CNC milling machining. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 40, 381–400.
- Chen, X., 1995. Strategy for Selection of Grinding Wheel Dressing Conditions. John Moores Univ. Liverpool, U.K.
- Chen, X., Rowe, W.B., 1996a. Analysis and simulation of the grinding process. Part I: Generation of

- the grinding wheel surface. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 36, 871–882.
- Chen, X., Rowe, W.B., 1996b. Analysis and simulation of the grinding process. Part II: Mechanics of grinding. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 36, 883–896.
- Chen, X., Rowe, W.B., Cai, R., 2002. Precision grinding using CBN wheels. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 42, 585–593.
- Chen, X., Rowe, W.B., Mills, B., Allanson, D.R., 1998. Analysis and simulation of the grinding process. Part IV: Effects of wheel wear. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 38, 41–49.
- Chen, X., Rowe, W.B., Mills, B., Allanson, D.R., 1996. Analysis and simulation of the grinding process. Part III: Comparison with experiment. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 36, 897–906.
- Coelho, R.T., 1991. A study experiment of the depth of dressing of rebolos in the rectification of precision using the ground disc method., Dissertation (Master in Mechanical Engineering).
- Coelho, R.T., Oliveira, J.F.G., Campos, G.P., 2000. Experimental and theoretical study of the temperature distribution on diamond dressing tools for precision grinding. *Abrasives Mag.* 7–15.
- Denkena, B., Jacobsen, J., Kramer, N., 2005. Dressing Monitoring by Acoustic Emission. *Key Eng. Mater.* 291–292, 195–200.
- Dimla, D.E., 2002. The correlation of vibration signal features to cutting tool wear in a metal turning operation. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 19, 705–713.
- Doman, D.A., Warkentin, A., Bauer, R., 2009. Finite element modeling approaches in grinding. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 49, 109–116.
- Dotto, F.R., Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., Serni, P.J., Thomazella, R., 2006. Automatic system for thermal damage detection in manufacturing process with internet monitoring. *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.* 28, 153–160.
- Dr. Kaiser, 2016. Dressing of Grinding wheels [WWW Document]. URL www.drkaiser.com
- eFunda, 2016. Altzairuaren eroankortasun termikoa tenperaturaren funtzio gisa. <http://www.efunda.com/>.
- Emel, E., Kanatey-Asibu, E., 1988. Tool failure monitoring in turning by pattern recognition analysis of AE signals. *J. Eng. Ind.* 110, 137–145.

- Filho, N.M., Coelho, R.T., Oliveira, J.F.G., 1999. Analysis of dressing performance using single crystal diamond dressers. *Ind. Diam. Rev.* 133–142.
- Fratila, D., 2009. Evaluation of near-dry machining effects on gear milling process efficiency. *J. Clean. Prod.* 17, 839–845.
- García, E., 2014. Improving friction and wear conditions in grinding. Practical application and fundamental study. Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea.
- García, E., Méresse, D., Pombo, I., Harmand, S., Sánchez, J.A., 2014. Identification of heat partition in grinding related to process parameters, using the inverse heat flux conduction model. *Appl. Therm. Eng.* 66, 122–130.
- García, E., Pombo, I., Sanchez, J.A., Ortega, N., Izquierdo, B., Plaza, S., Marquinez, J.I., Heinzl, C., Mourek, D., 2013. Reduction of oil and gas consumption in grinding technology using high pour-point lubricants. *J. Clean. Prod.* 51, 99–108.
- Graf, W., 2011. Creep-feed and surface grinding.
- Gurrutxaga, K., Martinez-de-Gurereñu, A., Arizti, F., 2012. Altzairuen mikroegitura eta textura karakterizatzeko teknika magnetiko ez-suntsitzaileak. *Mater. Zient. Teknol. I. Kongresua.*
- Habrat, W., Batsch, A., Porzycki, J., 2005. Monitoring of the single-point diamond dresser wear. *Arch. Civ. Mech. Eng.* V, 13–18.
- Hadad, M., Tawakoli, T., Sadeghi, M.H., Sadeghi, B., 2012. Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 54–55, 10–17.
- Hassui, A., Diniz, A.E., 2003. Correlating surface roughness and vibration on plunge cylindrical grinding of steel. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 43, 855–862.
- Hassui, A., Diniz, A.E., Oliveira, J.F.G., Felipe, J., Gomes, J.J.F., 1998. Experimental evaluation on grinding wheel wear through vibration and acoustic emission. *Wear* 217, 7–14.
- Inasaki, I., Okamura, K., 1985. Monitoring of Dressing and Grinding Processes with Acoustic Emission Signals. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 34, 277–280.
- Incropera, F.P., De Witt, D.P., 1990. *Fundamentals of heat and mass transfer.*, Third. ed. School of Mechanical Engineering, Purdue University.

- Irani, R.A., Bauer, R.J., Warkentin, A., 2005. A review of cutting fluid application in the grinding process. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 45, 1696–1705.
- Jackson, M.J., Khangar, A., Chen, X., Robinson, G.M., Venkatesh, V.C., Dahotre, N.B., 2007. Laser cleaning and dressing of vitrified grinding wheels. *J. Mater. Process. Technol.* 185, 17–23.
- Jemielniak, K., 2000. Some aspects of AE application in tool condition monitoring. *Ultrasonics* 38, 604–608.
- Karpuschewski, B., Wehmeier, M., Inasaki, I., 2000. Grinding Monitoring System Based on Power and Acoustic Emission Sensors. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 49, 235–240.
- Klocke, F., Barth, S., Wrobel, C., Weiß, M., Mattfeld, P., Brakhage, K., Rom, M., 2016. Modelling of the Grinding Wheel Structure Depending on the Volumetric Composition. *Procedia CIRP* 46, 276–280.
- Klocke, F., Eisenblatter, G., 1997. Dry cutting. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 46, 519–526.
- Klocke, F., Leung, S., Karpuschewski, B., Webster, J., 2015a. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 64, 581–604.
- Klocke, F., Linke, B., 2008. Mechanisms in the generation of grinding wheel topography by dressing. *Prod. Eng.* 2, 157–163.
- Klocke, F., Thiermann, J., Mattfeld, P., 2015b. Influence of the dressing process on grinding wheel wear. *Prod. Eng. - Res. Dev.* 9, 563–8.
- Koshy, P., Ives, L.K., Jahanmir, S., 1999. Simulation of diamond-ground surfaces 39, 1451–1470.
- Krajnik, P., Drazumeric, R., Meyer, B., Kopac, J., Klocke, F., 2007. Advanced Regulating Wheel Dressing in Throughfeed Centreless Grinding, in: 40th CIRP International Manufacturing Systems Seminar.
- Lee, D.E., Hwang, I., Valente, C.M.O., Oliveira, J.F.G., Dornfeld, D.A., 2006. Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 46, 176–188.
- Lee, P.H., Lee, S.W., 2011. Experimental characterization of micro-grinding process using compressed chilly air. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 51, 201–209.
- Linke, B., 2008. Dressing process model for vitrified bonded grinding wheels. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 57, 345–348.

-
- Linke, B., 2007. Mechanisms in dressing of vitrified bonded grinding wheels (Wirkmechanismen beim Abrichten keramisch gebundener Schleifscheiben). Doctoral Thesis, RWTH Aachen University.
- Linke, B., Klocke, F., 2010. Temperatures and wear mechanisms in dressing of vitrified bonded grinding wheels. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 50, 552–558.
- Liu, Y., Warkentin, A., Bauer, R., Gong, Y., 2013. Investigation of different grain shapes and dressing to predict surface roughness in grinding using kinematic simulations. *Precis. Eng.* 37, 758–764.
- Luque, A., Aldazabal, J., J.M., M.-E., Gil, J., 2008. Propiedades termo-elásticas y de fractura de diversas estructuras de carbono simuladas mediante dinámica molecular. *An. Mecánica la Fract.* 2, 474–479.
- Malkin, S., Guo, C., 2008. *Grinding Technology - Theory and Applications of Machining with Abrasives*. Industrial Press - New York.
- Malkin, S., Guo, C., 2007. Thermal Analysis of Grinding. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 56, 760–782.
- Mao, C., Tang, X., Zou, H., Huang, X., Zhou, Z., 2012. Investigation of Grinding Characteristic using Nanofluid Minimum Quantity Lubrication. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 13, 1745–1752.
- Marinescu, I.D., Hitchiner, M., Uhlmann, E., Rowe, W.B., Inasaki, I., 2007. *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. Taylor & Francis.
- Marinescu, I.D., Rowe, W.B., Dimitrov, B., Ohmori, H., 2013. *Tribology of Abrasive Machining Processes*, Second. ed.
- Marinescu, I.D., Rowe, W.B., Dimitrov, B., Ohmori, H., 2004. *Tribology of Abrasive Machining Processes*, *Tribology of Abrasive Machining Processes*. Elsevier.
- Martins, C., Aguiar, P.R., Frech, A., Bianchi, E.C., 2014. Tool Condition Monitoring of Single-Point Dresser Using Acoustic Emission and Neural Networks Models. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 63, 667–679.
- Messer, J., 1983. *Abrichten konventioneller Schleifscheiben mit stehenden Werk-zeugen*. RWTH Aachen.
- Minke, E., 1988. *Grundlagen der Verschleissausbildung an nicht-rotierenden Abrichtschneiden zum Einsatz an Konventionellen Schleifwerkzeugen*. PhD-Thesis, Universität Bremen.

- Miranda, H.I., Rocha, C. a., Oliveira, P., Martins, C., Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., 2015. Monitoring Single-point Dressers Using Fuzzy Models. *Procedia CIRP* 33, 281–286.
- Mochida, Y., Kubo, A., Tamaki, J., Nishioka, T., 2009. Estimation of Grinding Wheel Performance by Dressing Force Measurement. *Adv. Mater. Res.* 76–78, 155–160.
- Moia, D.F.G., Thomazella, I.H., Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., 2011. Monitoring the dressing operation by acoustic emission and electrical power, in: *Proceedings of COBEM*. Natal, RN, Brazil.
- Moia, D.F.G., Thomazella, I.H., Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., Martins, C., Marchi, M., 2014. Tool condition monitoring of aluminum oxide grinding wheel in dressing operation using acoustic emission and neural networks. *J. Brazilian Soc. Mech. Sci. Eng.* 37, 627–640.
- Morgan, M.N., Jackson, A.R., Wu, H., Baines-Jones, V., Batako, A., Rowe, W.B., 2008. Optimisation of fluid application in grinding. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 57, 363–366.
- Moritomo, S., 1980. Dressing of vitrified Borazon wheel and grinding. *Tool Eng.* 24, 73–79.
- Nakajima, T., Uno, Y., Tachibana, T., 1990. Some problems in single point diamond dressing. Effect of dresser wear and dressing condition on grinding results. *J. Jpn. Soc. Abras. Technol.* 34, 21.
- Nguyen, T., Zhang, L., 2003. An assessment of the applicability of cold air and oil mist in surface grinding. *J. Mater. Process. Tech.* 140, 224–230.
- Oliveira, J.F.G., Dornfeld, D.A., Winter, B., 1994. Dimensional Characterization of Grinding Wheel Surface through Acoustic Emission. *Ann. Cirp* 43, 291–294.
- Pombo, I., Izquierdo, B., Ortega, N., Plaza, S., Sanchez, J.A., 2011. Fabricación de Alto Rendimiento: Rectificado.
- Prateepasen, A., Au, Y.H.J., Jones, B.E., 2001. Acoustic emission and vibration for tool wear monitoring in single-point machining using belief network. *IMTC 2001. Proc. 18th IEEE Instrum. Meas. Technol. Conf.* 3, 1541–1546.
- Pusavec, F., Krajnik, P., Kopac, J., 2010a. Transitioning to sustainable production - Part I: application on machining technologies. *J. Clean. Prod.* 18, 174–184.
- Pusavec, F., Kramar, D., Krajnik, P., Kopac, J., 2010b. Transitioning to sustainable production - Part II: Evaluation of sustainable machining technologies. *J. Clean. Prod.* 18, 1211–1221.
- Rowe, W.B., 2014. *Principles of Modern Grinding Technology*, Second. ed. Elsevier Inc.

-
- Rowe, W.B., 2009. Grinding wheel dressing, in: *Principles of Modern Grinding Technology*. William Andrew, Boston, or. 59–78.
- Rowe, W.B., Chen, X., Mills, B., 1995. Towards an adaptative strategy for dressing in grinding operation. *Proc. Thirty-First Int. Matador Conf.* 415–420.
- Sagarda, A.A., Grigorev, V.M., Zakharov, V.P., 1988. Effect of cooling on the wear resistance of a diamond tool in machining grinding wheels. *Sov. J. Superhard Mater.* 10, 46–50.
- Sanchez, J.A., Pombo, I., Alberdi, R., Izquierdo, B., Ortega, N., Plaza, S., Martinez-Toledano, J., 2010. Machining evaluation of a hybrid MQL-CO₂ grinding technology. *J. Clean. Prod.* 18, 1840–1849.
- Santa-Aho, S., Vippola, M., Sorsa, A., Latokartano, J., Lindgren, M., Leiviskä, K., Lepistö, T., 2012. Development of Barkhausen noise calibration blocks for reliable grinding burn detection. *J. Mater. Process. Technol.* 212, 408–416.
- Sheiko, M.N., 2007. Abrasive wear of individual grits in diamond rollers and sticks and its relation to the overall tool wear in dressing operations. *J. Superhard Mater.* 29, 369–374.
- Shen, B., Malshe, A.P., Shih, A.J., 2008. Performance of novel MoS₂ nanoparticles based grinding fluids in minimum quantity lubrication grinding. *Trans. NAMRI/SME* 36, 357–364.
- Shih, A.J., Akemon, J.L., 2001. Wear of the blade diamond tools in truing vitreous bond grinding wheels Part I. Wear measurement and results. *Wear* 250, 587–592.
- Shih, A.J., Clark, W.I., Akemon, J.L., 2001. Wear of the blade diamond tools in truing vitreous bond grinding wheels Part II. Truing and grinding forces and wear mechanism. *Wear* 250–251, 593–603.
- Six Elements, 2016. Diamantearen propietate termikoak. <http://www.e6.com>.
- Snoeys, R., Maris, M., Peters, J., 1978. Thermally induced damage in grinding. *Ann. Cirp* 27, 571–581.
- Tawakoli, T., Hadad, M.J., Sadeghi, M.H., Daneshi, A., Stöckert, S., Rasifard, A., 2009. An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication-MQL grinding. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 49, 924–932.
- Tawakoli, T., Rasifard, A., 2011. Dressing of Grinding Wheels, in: Jackson, M.J., Davim, J.P. (Arg.), *Machining with Abrasives*. Springer-Verlag, or. 181–244.

- Telle, R., 2015. Properties of Ceramics, in: Handbook of Ceramics Grinding and Polishing (Second Edition). Applied Science Publishers, or. 1–49.
- Tkhagapsoev, G., Khapachev, B.S., 1987. Diamond wear in dressing abrasive wheels. *Sov. J. Superhard Mater.* 9, 38–44.
- Tkhagapsoev, G., Shkhanukov, M., Khapachev, B.S., Abregov, M., 1983. Determination of contact temperature in dressing diamond abrasive wheels with a diamond tool. *Sverkhtverdye Mater.* 5, 44–48.
- Tsai, M., Jian, S., 2012. Development of a micro-graphite impregnated grinding wheel. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 56, 94–101.
- Volker, B., 2004. Diamonds are a Scientist's Best Friend, in: *Forum Forschung 2003/2004*, Universität Duisburg-Essen.
- Wang, J., Wang, L., Li, G., Zhou, G., 2005. Prediction of surface roughness in cylindrical traverse grinding based on ALS algorithm. *Proc. Fourth Int. Conf. Mach. Learn. Cybern. Guangzhou*, 549–554.
- Wegener, K., Hoffmeister, H.-W., Karpuschewski, B., Kuster, F., Hahmann, W.-C., Rabiey, M., 2011. Conditioning and monitoring of grinding wheels. *CIRP Ann. - Manuf. Technol.* 60, 757–777.
- Wehmeier, M., Inasaki, I., 2002. Investigation and utilization of the acoustic emission signal for monitoring the dressing process. *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.* 216, 543–553.
- Wörner, E., Wild, C., Müller-Sebert, W., Locher, R., Koidl, P., 1996. Thermal conductivity of CVD diamond films: high-precision, temperature-resolved measurements. *Diam. Relat. Mater.* 5, 688–692.
- Xue, L., Naghdy, F., Cook, C., 2002. Monitoring of wheel dressing operations for precision grinding. *2002 IEEE Int. Conf. Ind. Technol. 2002. IEEE ICIT '02.* 2, 1296–1299.
- Young, H.T., Chen, D.J., 2005. Online dressing of profile grinding wheels. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 27, 883–888.
- Zan, T., Wang, M., Fei, R., Yang, J., XU, H., 2004. Identification of diamond dresser blunt using SPC and AE technique in grinding processes., in: *7th International Conference on Progress of Machining Technology.* or. 264–268.
- Zhang, C., Shin, Y.C., 2003. Wear of diamond dresser in laser assisted truing and dressing of vitrified

- CBN wheels. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 43, 41–49.
- Zhang, D., Li, C., Zhang, Y., Jia, D., Zhang, X., 2015. Experimental research on the energy ratio coefficient and specific grinding energy in nanoparticle jet MQL grinding. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* 78, 1275–1288.
- Zhang, S., Li, J.F., Wang, Y.W., 2012. Tool life and cutting forces in end milling Inconel 718 under dry and minimum quantity cooling lubrication cutting conditions. *J. Clean. Prod.* 32, 81–87.
- Zhang, Y., Li, C., Jia, D., Zhang, D., Zhang, X., 2015a. Experimental evaluation of MoS₂ nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil. *J. Clean. Prod.* 87, 930–940.
- Zhang, Y., Li, C., Jia, D., Zhang, D., Zhang, X., 2015b. Experimental evaluation of the lubrication performance of MoS₂/CNT nanofluid for minimal quantity lubrication in Ni-based alloy grinding. *Int. J. Mach. Tools Manuf.* 99, 19–33.
- Zhou, J.-H., Pang, C.K., Zhong, Z.-W., Lewis, F.L., 2011. Tool Wear Monitoring Using Acoustic Emissions by Dominant-Feature Identification. *IEEE Trans. Instrum. Meas.* 60, 547–559.

