

Doktorego Tesia

EGITURA AERONAUTIKOAK: FIDAGARRITASUN GORENEKO LASER-SOLDADURAREN KONTZEPTU BERRIA

Iñigo Hernando Arriandiagak
aurkeztua

Ingeniaritza Mekanikoa Saila

Euskal Herriko Unibertsitatea

Industria Ingeniaritza Doktore
titulua eskuratzeko

Jon Iñaki Arrizubieta Arrate
Aitzol Lamikiz Mentxaka

Doktoreek zuzendua

2019ko azaroa

Amari

Eskerrak

Eskerrak EHUri, tesia gauzatzeko emandako bekagatik.

Era berean, saileko nire lankide guztiei, zuen alboan asko ikasi eta gozatu baitut.

Eta nola ez, Aitzoli eta Iñakiri, proiektu hau aurrera eramaten laguntzeagatik.

Aurkibidea

I	KAPITULUA. SARRERA.....	21
I.1.	TESTUINGURUA.....	21
I.2.	HELBURUAK.....	25
I.3.	MEMORIAREN ANTOLAKETA	25
II	KAPITULUA. LASER-TEKNOLOGIA	29
II.1.	LASERRAREN OINARRIZKO OSAGIAK	29
II.2.	LASER-ARGIAREN AZALPEN FISIKOA	30
II.2.1.	Berezko igorpena	31
II.2.2.	Xurgapena	31
II.2.3.	Estimulaturiko igorpena.....	32
II.3.	LASER TEKNOLOGIAREN HASTAPENAK	32
II.4.	LASER MOTAK	43
II.4.1.	Gasezko laserrak	43
II.4.2.	Excimer laserra.....	47
II.4.3.	Egoera solidozko laserra	48
II.4.4.	Koloratzailezko laserra	54
II.4.5.	Elektroi askeko laserra	54
II.4.6.	Efizientzia eta aplikazioak	55
II.5.	LASER-SORTAREN KALITATEA	57
II.6.	LASERRAREN OINARRIZKO PARAMETROAK.....	60
II.7.	SOLDATZE-PROZESUA ETA TEKNIKAK	62
II.7.1.	TIG soldadura	64
II.7.2.	PAW soldadura.....	65
II.7.3.	EBW soldadura	67
II.7.4.	Laser soldadura	69
II.7.5.	Tekniken arteko alderaketa	75
II.8.	SOLDADURAREN GEOMETRIA ETA AKATSAK.....	77
II.9.	ESKANERRAK ETA OPTIKA MUGIKORRAK	79
II.9.1.	Eskanerren funtzionamendua.....	79
II.9.2.	Wobble teknika	81
III	INDUSTRIA AERONAUTIKOA ETA SOLDADURA.....	85
III.1.	SARRERA.....	85
III.2.	TURBINAK ETA TAIL BEARING HOUSING.....	86

III.2.1.	Turbinaren funtzionamendua	86
III.2.2.	Presio Baxuko Turbina	88
III.2.3.	Tail Bearing Housing – TBH - Atzealdeko euste-egitura	89
III.3.	ALEAZIOAK MOTORE AERONAUTIKOETAN	93
III.3.1.	Motoreetako materialak	93
III.3.2.	Inconel 718: propietateak eta aplikazioak	94
III.3.3.	Ezaugarri nagusiak.....	94
III.4.	TBHaren GUNE SOLDATUAK.....	98
III.4.1.	Baoen loturak	99
III.4.2.	Heldulekuen arteko loturak.....	100
III.4.3.	Kanpo-eraztunaren loturak: zirkunferentzialak eta axialak	101
III.4.4.	Konoaren loturak.....	101
III.5.	LASER SOLDADURARAKO MAKINERIA.....	102
IV	EREDUTZEAREN EBOLUZIOA.....	107
IV.1.	EREDUAK LASER BIDEZKO SOLDADURAN.....	107
IV.1.1.	Ereduetan kontuan hartu beharrekoak.....	108
IV.2.	EREDUAK ETA BERAIEIEN BEHARRA HISTORIAN ZEHAR	110
IV.2.1.	Ereduen eboluzioa.....	110
IV.2.2.	Ereduen garapenaren irakurketa	135
V	GARATUTAKO EREDUA.....	139
V.1.	BERO-TRANSMISIOA.....	140
V.1.1.	Energia-banaketa.....	140
V.1.2.	Carlaw-Jaeger.....	141
V.2.	FOURIERREN TRANSFORMATUA	143
V.3.	WOBBLE.....	144
V.4.	BARNERATUTAKO FAKTOREAK.....	146
V.4.1.	Azalera-faktorea	146
V.4.2.	Denbora-faktorea	149
V.5.	HIRU DIMENSIOKO SARETZA ETA PUNTUZ PUNTUKO ANALISIA	155
V.6.	KONBEKZIOA.....	155
V.7.	JARAUNTSITAKO TENPERATURA-EREMUA ETA PROPIETATEEN UNEKO ALDAKETA	156
V.8.	IRAGANKORTASUNA ETA EGOERA EGONKORRA	159
V.9.	ROSENTHAL	160
VI	EREDUAREN BALIOZTATzea	167
VI.1.	INCONEL 718®: PROPIETATEAK ETA PIEZEN NEURRIAK.....	167
VI.2.	MEKANIZAZIO-ZENTROA: KONDIA AKTINOS 500®	170

VI.3.	ERABILITAKO LASER-MAKINERIA: ROFIN FL 010 [®]	171
VI.4.	ESKANERRA: hurrySCAN25 [®]	174
VI.5.	ESKANERRAREN ZENBAKIZKO KONTROLA: VLM [®]	176
VI.6.	XAFLEN EUSTE-SISTEMA: BARAILA.....	177
VI.7.	HOZTE-MAKINERIA: KKT KRAUS OLB 5 [®]	178
VI.8.	BABES-GASAREN HORNITZE-SISTEMA	179
VI.9.	PROBETEN PRESTAKETA.....	180
VI.9.1.	SOLDADURA-KORDOIEN EBAKETA: REMET TR 100 EVOLUTION [®]	180
VI.9.2.	KAPSULATZEA: REMET IPA 40 EVOLUTION [®]	182
VI.9.3.	PROBETEN LEUNTZEA: REMET LS1 [®]	183
VI.9.4.	ERASO KIMIKOA: MARBLE.....	184
VI.10.	PROBETEN NEURKETA.....	184
VI.10.1.	PROFIL GEOMETRIKOA: LEICA Z6 APO [®] eta LEICA DFC 295 [®]	184
VI.10.2.	MIKROEGITURA: Nikon OPTIPHOT 100 [®] eta Infinity 1 [®] ; Leica DCM3D [®]	185
VI.11.	TENPERATURAREN NEURKETA: IGAR 12-LO [®]	187
VII	EMAITZAK ETA EREDUAREN BALIOZTATZEA	191
VII.1.	Bestelako faktoreen eraginaren azterketa.....	197
VII.1.1.	Foku-posizioaren eraginaren azterketa	197
VII.1.2.	Babes-gasaren eraginaren azterketa	200
VII.1.3.	Piezen arteko tartea edo <i>gap</i> efektuaren azterketa	201
VII.2.	Profil geometrikoen analisisa sarrera-parametroen arabera.....	202
VII.2.1.	Soldadura-kordoiaren zabalera	202
VII.2.2.	Soldadura-kordoiaren sakonera	206
VII.3.	Temperaturaren eta mikroegituraren azterketa.....	210
VII.3.1.	Dendriten hazkundera.....	210
VII.3.2.	Ereduaren eta pirometroaren neurketen arteko alderaketa.....	213
VII.4.	Ereduaren kostu konputazionala	218
VIII	ONDORIOAK ETA ETORKIZUNEN LERROAK	221
VIII.1.1.	Ondorioak.....	221
VIII.1.2.	Etorkizuneko lerroak	221
IX	BIBLIOGRAFIA.....	225

IRUDIAK

Irudia I.1: Airbus: mundu mailako urteko hegaldien trafikoa.....	22
Irudia I.2: Boeing: urteko bidaiariak (milioika).....	22
Irudia I.3: Boeing: mundu mailako hegazkin kopurua	23
Irudia I.4: Rolls Royce: hegazkin ekoizpena 2018an.	23
Irudia I.5: Rolls Royce: fabrikatutako hegazkin kopurua 2015etik.	24
Irudia I.6: ScienceDirect aldizkariko inpaktu kopurua (Laser welding, Inconel 718, Inconel 625)	24
Irudia II.1: Laserraren oinarrizko osagaien eskema.	30
Irudia II.2: Atomo bateko energia-mailak.....	30
Irudia II.3: Erradiazio-prozesuak bi energia-mailatako sistemetan: a) berezkoa; b) xurgapena; c) estimulaturikoa.....	31
Irudia II.4: Goulden idazkia, “laser” hitza lehen aldiz agertu zenekoa.	36
Irudia II.5: Maserraren eskema: 2.929.922 patentea [Schawlow, 1960]	37
Irudia II.6: Zuntzeko laser-anplifikadorea [Koester, 1964].....	39
Irudia II.7: Laserraren industriaren diru-sarrerak eta 2019ko iragarpena [Strategies Unlimited, 2019].....	41
Irudia II.8: Laser mota ezberdinen urteko energia-kostua eta eraginkortasun-energetikoa [Trumpf, 2018].....	42
Irudia II.9: Laserraren industriaren banaketa [Strategies Unlimited, 2019].....	42
Irudia II.10: Txinako laser industrialen eta sistemen kostua [Strategies Unlimited, 2019]	42
Irudia II.11: Sentsoreen diru-sarrerak [Strategies Unlimited, 2019]	43
Irudia II.12: Karbono dioxidoaren bibrazio-moduak.....	44
Irudia II.13: a) Fluxu geldoko laserra b) Zeharkako fluxuko laserra c) Fluxu azkarreko eta zeharkako laserra [Steen, 2010]	45
Irudia II.14: Karbono monoxido eta nitrogeno molekulen energia-mailak	46
Irudia II.15: Helio-neoizko laserraren eskema	46
Irudia II.16: Helioaren eta neoiairen energia-mailak eta uhin luzerak	47
Irudia II.17: Excimer laserraren oinarrizko eskema [Steen, 2010].....	47
Irudia II.18: Excimer laserren igorpenen energia-mailak [Steen, 2010]	48
Irudia II.19: Neodimioaren energia-mailak.....	50
Irudia II.20: Nd:YAG laserraren oinarrizko eskema [Steen, 2010]	51
Irudia II.21: Nd:glass laserren pultsuen itxura (a) eta Nd:YAG laserrena	51
Irudia II.22: Diskozko laserraren oinarrizko eskema [Steen, 2010]	53
Irudia II.23: Zuntzeko laserraren oinarrizko eskema [Steen, 2010]	53
Irudia II.24: Koloratzailezko laserraren oinarrizko eskema [Steen, 2010]	54
Irudia II.25: Koloratzailezko laser ezberdinen uhin-luzerak [Steen, 2010]	54
Irudia II.26: Elektroi askeko laserraren oinarrizko eskema [Steen, 2010]	55
Irudia II.27: Modu gaussiarraren banaketa energetikoa	57
Irudia II.28: Top-Hat moduaren banaketa energetikoa	57
Irudia II.29: Banaketa energetiko toroidala	58
Irudia II.30: Multimoduaren banaketa energetikoa	58
Irudia II.31: Laser-sortaren diametroa	58
Irudia II.32: Laserraren eskema optikoa	59
Irudia II.33: BPP eta M^2 parametroen grafika laser ezberdinentzat.....	60
Irudia II.34: Prozesu ezberdinen potentzia-dentsitatea eta interakzio-denbora [Steen, 2010].	61

Irudia II.35: Xurgapen-mailaren eta uhin-luzeraren arteko erlazioa laser ezberdinentzat	61
Irudia II.36: Bero-ekarpenaren eta potentzia-dentsitatearen arteko erlazioa gasezko, arkuzko eta potentzia handiko laserrentzat	63
Irudia II.37: Soldadura-kordioa, termikoki eragindako gunea eta oinarritzko materiala	64
Irudia II.38: TIG soldaduraren oinarritzko eskema	65
Irudia II.39: PAW soldaduraren oinarritzko eskema	66
Irudia II.40: PAW (a) eta TIG (b) teknikak sortutako arkuen xehetasuna	66
Irudia II.41: EBW soldaduraren oinarritzko eskema	67
Irudia II.42: Elektro-sortak eragindako galda-bainuaren eta <i>keyhole</i> aren xehetasuna	68
Irudia II.43: EBW makineria eta modulua (Sciaky)	69
Irudia II.44: Laser-sortak eragindako <i>keyhole</i> aren xehetasuna [Swift-Hook, 1973]	70
Irudia II.45: Soldadura mota ezberdinak itxuraren arabera	72
Irudia II.46: Laserrak sortutako <i>keyhole</i> aren eskema [Dowden, 2001].....	73
Irudia II.47: Laser-soldadura sakonaren eskema [He, 2018]	73
Irudia II.48: <i>Keyhole</i> an zehar gertatutako islatzeen eta xurgatzeen xehetasuna [Cho, 2006]...	74
Irudia II.49: Laser-sortak eragindako barrunbeen xehetasuna eta energia-balantzea [He, 2018]	74
Irudia II.50: Laser-makineria: roboten eta laserren arteko akoplatzea (a: KUKA; b: Trumpf) ...	76
Irudia II.51: Soldadura-kordioaren gunek: koroa, horputza eta sustraia	77
Irudia II.52: Irtengunearen irudi sinplifikatua.....	77
Irudia II.53: Ahurtasunaren irudi sinplifikatua.....	78
Irudia II.54: Hozkadaren irudi sinplifikatua	78
Irudia II.55: Urtze-gabezia puruaren xehetasuna	78
Irudia II.56: Urtze-gabezia irekiaren xehetasuna.....	79
Irudia II.57: Inklusio ez-metalikoek eragindako urtze-gabeziaren xehetasuna.....	79
Irudia II.58: Eskanerraren oinarritzko eskema.....	80
Irudia II.59: Galvanometroan ispiluen xehetasuna	80
Irudia II.60: Optika mugikorraren makineria.....	81
Irudia II.61: Laserraren <i>spot</i> ak azalera handiagoa erasotzeko estrategiak.....	81
Irudia II.62: Higidura trokoidalaren oinarritzko eskema.....	82
Irudia II.63: Aluminioaren eta kuprearen arteko soldadurak wobble-teknika erabiliz	82
Irudia III.1: Bi ataleko turbina: presio altukoa eta baxukoa [Rolls Royce, 1986].....	86
Irudia III.2: Turbinaren etapen xehetasuna: estatorea eta errotorea	87
Irudia III.3: Hiru ataleko turbina: presio altukoa, erdi-mailakoa eta baxukoa [Rolls Royce, 1986]	87
Irudia III.4: Presio baxuko turbina	88
Irudia III.5: TBHaren kokapena	89
Irudia III.6: TBHaren atalak	91
Irudia III.7: TBHaren atalen xehetasunak	91
Irudia III.8: TBHaren irudia Ansys programan (ITP Aero)	92
Irudia III.9: Motore aeronautikoaren materialak [Spittle, 2003].....	93
Irudia III.10: Inconel 718 soldadura eta fase ezberdinen agerpena: a) Soldaduraren barnealdea zeharkako norabideko tentsiogunean; b) Soldaduraren muga zeharkako norabideko tentsiogunean; c) Soldaduraren barnealdea luzerako norabideko tentsiogunean; d) Soldaduraren muga luzerako norabideko tentsiogunean [Qu, 2012].....	97
Irudia III.11: TBHaren atal ezberdinen soldadura gunek (ITP Aero)	98
Irudia III.12: TBHaren bao estrukturalen soldadura gunek	100
Irudia III.13: TBHaren <i>Lug</i> edo heldulekuen soldadura gunek	100

Irudia III.14: TBHaren kanpo-eraztunaren soldadura axialen eta erradialen guneak	101
Irudia III.15: TBHaren baoen beheko guneen eta konoaren arteko soldadura guneak	101
Irudia III.16: Ardatz anitzeko soldadura-robotak (KUKA, Trumpf).....	103
Irudia III.17: Bi dimentsiodun soldadura-makineria (Bergmann Steffen).....	103
Irudia IV.1: Eredu iragarleak kalkulaturako profilarren eta probetaren arteko alderaketa [Hernando, 2018]	108
Irudia IV.2: Planoek mugaturako solidoaren eskema [Rosenthal, 1946].....	112
Irudia IV.3: Pieza mehearen ertzetik doan bero-iturri mugikorrek sortutako tenperatura-distribuzioaren eskema [Rosenthal, 1946]	113
Irudia IV.4: Ertzeko soldadura ezberdinen tenperatura-distribuzioen eskemak [Rosenthal, 1946]	114
Irudia IV.5: Tope-loturako saiakuntza ezberdinen tenperatura-distribuzioen eskemak [Rosenthal, 1946]	114
Irudia IV.6: Altzairuan egindako tope-soldaduren tenperatura-distribuzioen eskemak: a) Pieza mehea; b) Pieza lodia [Rosenthal, 1946]	115
Irudia IV.7: Disko itxuradun bero-iturriaren eskema [Pavelic, 1969]	116
Irudia IV.8: EBW (a) eta laser-soldaduraren (b) alderaketa emaitza enpiriko eta teorikoen artean	117
Irudia IV.9: Dioxidozko laserren bidez bero-iturri ezberdinek sortutako isotermak [Arata, 1974]	118
Irudia IV.10: Dimentsiorik gabeko gainazaleko tenperatura-distribuzioa [Mazumder, 1980] ..	119
Irudia IV.11: Iragarritako eta enpirikoki neurtutako urtutako guneak [Mazumder, 1980]	121
Irudia IV.12: Elipsoide bikoitzaren bero-iturria [Mazumder, 1980].....	122
Irudia IV.13: a) <i>Keyhole</i> ko hormaren elementu baten oreka termikoa; b) <i>Keyhole</i> aren sakoneraren kalkulua [Bonollo, 1993].....	123
Irudia IV.14: Soldadura esperimentalen eta modeloaren bidez iragarritako arteko alderaketa [Bonollo, 1993]	124
Irudia IV.15: Laser-soldaduran gertatuako xurgatze-prozesuen fluxu-diagrama [Kaplan, 1994]	124
Irudia IV.16: Bi dimentsioko <i>keyhole</i> konikoaren eskema [Lankalapalli, 1996].....	125
Irudia IV.17: Infinituki meheak diren zilindroen eskema <i>keyhole</i> konikoa eredutzeko [Lankalapalli, 1996].....	125
Irudia IV.18: Soldaduren geometrien eta isotermen arteko alderaketak: a) <i>Keyhole</i> zilindrikoarentzat; b) <i>Keyhole</i> konikoarentzat [Lankalapalli, 1996]	126
Irudia IV.19: Galda-bainuaren neurketa esperimentalaren eta iragarritakoaren arteko alderaketa, kondukzioa eta Marangoni-efektua kontuan harturik [Sudnik, 2000].....	126
Irudia IV.20: Barrunbe konikoan gertatutako islatzeen eskema [Lee, 2002]	127
Irudia IV.21: Hiru dimentsioko <i>keyhole</i> aren diagrama, barneko islatzeak eta Fresnel xurgapena aintzat harturik [Jin, 2012]	128
Irudia IV.22: Elementu finituetako saretze ezberdinak tenperatura-eremua kalkulatzeko [Zhang, 2004].....	129
Irudia IV.23: Bero-iturri mugikorraren eredutzea Goldaken elipsoide bikoitza eta elementu finituak uztartuz [Gery, 2005]	130
Irudia IV.24: Gainazaleko bero-iturri gaussiarra sakoneran zeharreko konikoarekin uztarketa eta entsegu enpirikoekiko alderaketa [Spina, 2007]	130
Irudia IV.25: Disko itxurako banaketa gaussiarra gehi <i>keyhole</i> konikoa [Kazemi, 2009].....	131
Irudia IV.26: Bero-iturri konikoa gehi esfera hutsaren eredua [Zain-ul-Abdein, 2009].....	132

Irudia IV.27: Kono moztua oinarritzat duten energia-banaketak: a) Soila; b) Elipsoide bikoitza gehituz; c) Oskol zilindrikoa gehituz [Chukkan, 2015]	133
Irudia IV.28: Elipsoide bikoitza, gorputz gaussiar birakorra eta kono moztua uztartzen dituen eredua [Jiang, 2016]	134
Irudia IV.29: Stefanen problemaren eskema.....	134
Irudia IV.30: Bero-iturri gaussiarra, Fresnelen islatzeak eta Marangoni-efektua uztartzen dituen eredua [Lange, 2018]	135
Irudia IV.31: Bero-gradiente eta galda-bainuaren profila abiadura ezberdinekin [Coelho, 2018]	135
Irudia V.1: Energiaren banaketa zirkular homogeneoa azalerako	140
Irudia V.2: Bero-iturriaren mugimendua denboran zehar	143
Irudia V.3: Energiaren banaketa zirkular homogeneoaren Fourierren transformatua	144
Irudia V.4: <i>Wobble</i> -higidura trokoidalak eratutako oinarritzko irudia	146
Irudia V.5: <i>Wobble</i> -teknikaren bidez deskribaturiko ibilbidearen diagrama	146
Irudia V.6: <i>Wobble</i> -eraztun ideala eta azalera zirkularren aldeko alderaketa.....	147
Irudia V.7: Idealizaturiko eta ereduturiko laser-sorten ibilbideen alderaketa	148
Irudia V.8: <i>Wobble</i> -eraztun idealaren eskema eta <i>spot</i> aren kokapena	149
Irudia V.9: <i>Wobble</i> -higiduran zehar gertaturiko bero-transmisioen eskema: kanporanzko eta barruranzko bero-galerak	150
Irudia V.10: Zirkulu bete bat eta bi lortzeko eraztunen eskema	150
Irudia V.11: Soldadura-kordoia lortzeko eraztunen eskema.....	151
Irudia V.12: Oinarritzko soldadura-kordoi minimoa lortzeko eraztunen eskema	151
Irudia V.13: Azalera oblongoa lortzeko eraztunen eskema.....	152
Irudia V.14: <i>Wobble</i> -higidurak eraturiko azalera oblongoa	152
Irudia V.15: Oinarritzko eraztunaren eta hurrengoaren arteko mozketak	153
Irudia V.16: Ereduan erabilitako eta errealitatean hurbildutako azalera zirkularren erkatzea.	154
Irudia V.17: Kondukzioaren, difusibitatearen eta absortibitatearen aldaketaren adibidea denboran zehar garatutako ereduan	156
Irudia V.18: Propietate-eremu aldakorrak denboran zehar: a) Eroankortasuna; b) Difusibitatea; c) Absortibitatea (350 W, 3 mm·s ⁻¹ eta <i>wobble</i> diametroa 1 mm)	158
Irudia V.19: Tenperatura-eremu aldakorrak denboran zehar piezaren gainazalean, egoera egonkorra lortu arte (350 W, 3 mm·s ⁻¹ eta <i>wobble</i> diametroa 1 mm)	159
Irudia V.20: Tenperatura-eremu egonkorraren adibidea garatutako ereduan (350 W, 3 mm·s ⁻¹ eta <i>wobble</i> diametroa 1 mm).....	160
Irudia V.21: Rosenthalen eredua: monopoloen eskema	161
Irudia V.22: Rosenthalen eredua: dipoloen eskema	162
Irudia V.23: Rosenthalen eredua: kuadripoloen eskema	162
Irudia VI.1: Ereduan barneratutako dentsitatearen eta bero espezifikokoaren diagrama tenperaturaren arabera (marra etena: luzatutako propietateak)	169
Irudia VI.2: Ereduan barneratutako eroankortasun eta difusibitate termikoaren diagrama tenperaturaren arabera (marra etena: luzatutako propietateak)	169
Irudia VI.3: Ereduan barneratutako absortibitatearen diagrama tenperaturaren arabera	169
Irudia VI.4: Kondia Aktinos 500 mekanizazio-zentroa	170
Irudia VI.5: Rofin FL 010 laserraren modulua	173
Irudia VI.6: Rofin FL 010 laserraren parametroak zehazteko pantaila	173
Irudia VI.7: hurrySCAN 25 eskanerra	174
Irudia VI.8: VLM zenbakizko kontrola.....	177

Irudia VI.9: Piezak eusteko baraila.....	177
Irudia VI.10: Tentsio-kontzentrazio faktore estatikoa: a) Barailarekin; b) Baraila barik	178
Irudia VI.11: KKT Kraus OLB 5 hozte-makineria	178
Irudia VI.12: Babes-gasaren hornitze-sistemaren eskema	179
Irudia VI.13: Babes-gasaren hornitze-sistema	180
Irudia VI.14: Remet TR100 Evolution zerra metalografikoa	180
Irudia VI.15: ATM mozketa-disko zirkularra	181
Irudia VI.16: Remet IPA 40 Evolution kapsulatze-zentroa	182
Irudia VI.17: Remet LS1 leuntze-zentroa	183
Irudia VI.18: Leica Z6 APO mikroskopia eta Leica DFC 295 kamera digitala.....	184
Irudia VI.19: Nikon OPTIHOT 100 mikroskopia	186
Irudia VI.20: IGARr 12-LO pirometroa.....	187
Irudia VII.1: 5. probeta.....	193
Irudia VII.2: 10. probeta.....	194
Irudia VII.3: 21. probeta.....	195
Irudia VII.4: 30. probeta.....	196
Irudia VII.5: Aluminioan (a), grafitoan (b) eta paperean (c) eginiko entseguak foku-posizioa zehazteko.....	198
Irudia VII.6: Foku-posizioaren eta <i>spot</i> aren tamainaren diagrama.....	199
Irudia VII.7: Foku-posizioaren eta potentzia-dentsitatearen diagrama	200
Irudia VII.8: Denbora-faktorearen diagrama prozesuan eragina duten hainbat parametroren menpe.....	204
Irudia VII.9: Eredututako egoera egonkorreko temperatura-eremua eta galda-bainuaren tamaina (1533 K)	205
Irudia VII.10: Eredututako egoera egonkorreko temperatura-eremua eta galda-bainuaren tamaina (1533 K): zeharkako sekzioak	206
Irudia VII.11: Eredututako temperatura-eremua materialaren barne-mugimenduak aintzat harturik.....	208
Irudia VII.12: <i>Mushy zone</i> aren azterketa (500 W; 3 mm·s ⁻¹ ; <i>wobble</i> diametroa = 1 mm).....	209
Irudia VII.13: Iragarritako eta enpirikoki neurturiko <i>mushy zone</i> aren azterketa	209
Irudia VII.14: Ereduen sakoneraren kalkulua atalka: a) Inolako polorik kontuan hartu gabe; b) Monopoloa kontuan harturik; c) Monopolo eta dipoloa kontuan harturik; d) Monopolo, dipolo eta kuadripoloak kontuan harturik; e) Entseguaren zeharkako profila (500 W; 7 mm·s ⁻¹ ; <i>wobble</i> diametroa = 1 mm)	209
Irudia VII.15: Dendriten neurketarako gunek: G1 eta G2.....	211
Irudia VII.16: G1 gunea: 10X, 20X, 50X eta 100X (350 W 3 mm·s ⁻¹)	211
Irudia VII.17: G1 guneko dendriten arteko distantzia (350 W 3 mm·s ⁻¹).....	212
Irudia VII.18: G2 gunea: 10X, 20X, 50X eta 100X (350 W 3 mm·s ⁻¹)	212
Irudia VII.19: G2 guneko dendriten arteko distantzia (350 W 3 mm·s ⁻¹).....	213
Irudia VII.20: Pirometroaren neurketen diagrama (D=1 mm)	214
Irudia VII.21: Neurketa priometrikoa <i>smoothing</i> -teknika aplikatu ostean.....	215
Irudia VII.22: Solidotze-gradienteen gunearen xehetasuna	215
Irudia VII.23: Ereduek iragarritako xehetasuna: G0, G1 eta G2 guneen temperatura eta solidotze-tartearen distantzia	216

TAULAK

Taula II.1: Gas-nahastura ezberdinen uhin-luzerak excimer laserretan [Steen, 2010]	47
Taula II.2: Egoera solidozko laserren ezaugarriak	49
Taula II.3: Erdieroalezko laser nagusienak eta beraien uhin-luzerak	52
Taula II.4: Laser industrialen efizientzia kuantikoa eta elektrikoa	55
Taula II.5: Laser industrialen aplikazioak	56
Taula II.6: Soldatze-tekniken elkartze-koefizientea [Steen, 2010]	75
Taula II.7: Laser-, <i>EBW</i> - eta <i>TIG</i> -tekniken ezaugarri nagusien alderaketa (<i>V</i> : ona; <i>X</i> : kaskarra)	76
Taula III.1: Hasteloy X eta Inconel 718 aleazioen propietateen alderaketa [Mills, 2002]	94
Taula III.2: Inconel 718 aleazioaren konposizio kimikoa hurrengo arauen arabera: AMS (Aerospace Material Specifications) eta MSRR (Material Specifications of Rolls Royce)	95
Taula III.3: <i>TBH</i> aren atal ezberdinen soldadura guneak: <i>Lug</i> : heldulekuak; <i>BCV</i> : <i>Bottom Core</i> <i>Vane</i> ; <i>ROF</i> : <i>Rear Outer Flange</i> (ikus Irudia III.11)	99
Taula V.1: Kalkulatoriko tenperaturak eta beraien erlazioa aurreko urratseko propietateekin	157
Taula V.2: Propietateen uneko aldakuntza progresio linealaren bidez	157
Taula V.3: Propietateen finkatzea behin lurruntze-tenperatura erdietsita	158
Taula VI.1: Erabilitako Inconel 718 aleazioaren konposizio kimikoa (pisuzko %) [Haynes, 2015]	167
Taula VI.2: Inconel 718 aleazioaren propietateak <i>liquidus</i> -tenperaturara arte [Mills, 2002]	168
Taula VI.3: Inconel 718 aleazioaren propietateen luzapen hurbildua <i>liquidus</i> -tenperaturatik aurrera	168
Taula VI.4: Kondia Aktinos 500 mekanizazio-zentroaren espezifikazioak	171
Taula VI.5: Rofin FL 010 laserraren moduluaren espezifikazioak	172
Taula VI.6: hurrySCAN 25 eskanerraren espezifikazioak	175
Taula VI.7: KKT Kraus OLB 5 hozte-makinariaren espezifikazioak	178
Taula VI.8: Ar2x babesgasaren espezifikazioak	179
Taula VI.9: Remet TR100 Evolution zerra metalografikoaren espezifikazioak	181
Taula VI.10: ATM mozketak-disko zirkularren espezifikazioak	181
Taula VI.11: ATM erretxina fenolikoaren espezifikazioak	182
Taula VI.12: Remet IPA 40 Evolution kapsulatze-zentroaren espezifikazioak	182
Taula VI.13: Akasel leuntze-diskoaren espezifikazioak	183
Taula VI.14: Remet LS1 leuntze-zentroaren espezifikazioak	183
Taula VI.15: Marble soluzioaren espezifikazioak	184
Taula VI.16: Leica Z6 APO mikroskopioaren eta Leica DFC 295 kamera digitalaren espezifikazioak	185
Taula VI.17: Nikon OPTIHOT 100 mikroskopioaren espezifikazioak	185
Taula VI.18: Leica DCM3D mikroskopioaren espezifikazioak	186
Taula VI.19: IGARr 12-LO pirometroaren espezifikazioak	187
Taula VII.1: Burututako entseguak eta erabilitako parametroak	192
Taula VII.2: 1 -6 entseguen zeharkako sekzioak. Bakoitzaren aldamenen saiakuntzaren baldintzak zehazten dira, potentzia, aitzinapen-abiadura eta argoi-emia	192
Taula VII.3: 7-12 entseguen zeharkako sekzioak	193
Taula VII.4: 13-16 entseguen zeharkako sekzioak	194
Taula VII.5: 17A eta 17B entseguen zeharkako sekzioak	195
Taula VII.6: 18-24 entseguen zeharkako sekzioak	195

Taula VII.7: 25-32 entseguen zeharkako sekzioak	196
Taula VII.8: 33, 43, 45 eta 47 entseguen zeharkako sekzioak	197
Taula VII.9: 42, 44, 46 eta 48 entseguen zeharkako sekzioak	197
Taula VII.10: 41, 38, 39 eta 40 entseguen zeharkako sekzioak	197
Taula VII.11: 34, 35, 36 eta 37 entseguen zeharkako sekzioak	197
Taula VII.12: 49, 50, 51 eta 52 entseguen zeharkako sekzioak	197
Taula VII.13: Grafitoan eginiko entseguak: foku-posizioaren eta <i>spot</i> aren tamainaren erlazioa	199
Taula VII.14: Babes-gasaren eragina aztertzeko entseguak (450 W)	201
Taula VII.15: <i>Gap</i> aren eragina aztertzeko entseguak (450 W)	202
Taula VII.16: Entseguen eta ereduak iragarritako irudien zabalaren erkatzea eta errorea	203
Taula VII.17: Entseguen multzokatzea antzerako denbora-faktoreen arabera.....	204
Taula VII.18: Entseguen eta ereduak iragarritako irudien sakoneraren erkatzea eta errorea	208
Taula VII.19: Inconel 718 aleazioaren erreakzio-tenperaturak [Antonsson, 2005].....	210
Taula VII.20: Dendriten arteko distantziak (D=1 mm)	213
Taula VII.21: Neurturiko solidotze-gradienteak gainazalean (D=1 mm).....	215
Taula VII.22: Ereduak iragarritako solidotze-gradienteak gainazalean (D=1 mm)	216
Taula VII.23: Ereduak iragarritako irudietako bigarren mailako dendriten arteko distantzia ..	217
Taula VII.24: Pirometroarekin eta ereduak iragarritako tenperaturen arteko alderaketa gainazalean	217
Taula VII.25: Bigarren mailako dendriten arteko distantzia: probeten eta ereduak iragarritako irudien arteko erkatzea	218
Taula VII.26: Ereduaren kostu konputazionala saretzearen arabera (15 denbora-urrats harturik).....	218

NOMENKLATURA

Ikurra	Unitateak	Azalpena
(x,y,z)	[m]	Tenperatura lortzen den puntuaren koordinatuak
$(\xi,\eta,\zeta); (x',y',z')$	[m]	Laser-sortaren zentruaren posizioa
Q'_{ξ}	[-]	Dipolo-koefizientea X norabidean
$Q''_{\xi\xi}$	[-]	Kuadripolo-koefizientea X norabidean
$Q''_{\eta\eta}$	[-]	Kuadripolo-koefizientea Y norabidean
$Q''_{\zeta\zeta}$	[-]	Kuadripolo-koefizientea Z norabidean
T_0	[K]	Tenperatura-eremua denbora-urratsaren hasieran
t'	[s]	Hasierako denbora-unea
$\Delta x, \Delta y$	[m]	Elementu bakoitzaren neurria x eta y ardatzetan
A	[-]	Absortibitatea
d	[m]	Xaflaren lodiera
d_s	[m]	<i>Spot</i> aren diametroa
d_w	[m]	<i>Wobble</i> -higiduraren diametroa
$\text{erf}(a)$	[-]	Errore-funtzioa
$I(x',y')$	[W·m ⁻²]	Intentsitate-funtzioa
k	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	Eroankortasuna
L_{in}	[m]	Ibilbide partzialen batuketa
P_{real}	[W]	Laserraren potentzia erreala
P_{sim}	[W]	Simulazioan kontuan harturiko potentzia
R	[m]	Aztertutako puntuaren eta laser-sortaren arteko distantzia
S_{factor}	[-]	Azalera-faktorea
S_h	[m ²]	Lasersortak eratutako irudiaren barneko azalera
t_{factor}	[-]	Denbora-faktorea
t_{in}	[s]	<i>Spot</i> ak <i>wobble</i> higidurak sortutako zirkulua betetzeko behar duen denbora
t_{step}	[s]	Denbora-urratsa
v_f	[mm·s ⁻¹]	Laser-sortaren aitzinapen-abiadura
v_p	[mm·s ⁻¹]	Laser-sortaren abiadura periferikoa
$W(x-x',y-y',z-z')$	[K·W ⁻¹]	Bero iturri puntual bat lan-pieza erdi-infinitu baten gainazalean higitzeko koefizientea
α	[m ² ·s]	Difusibitatea
T	[K]	Denbora-urratseko tenperatura-eremua
t	[s]	Tenperatura-eremua kalkulatzeko denbora-unea

I Kapitulua. Sarrera

I KAPITULUA. SARRERA

I.1. TESTUINGURUA

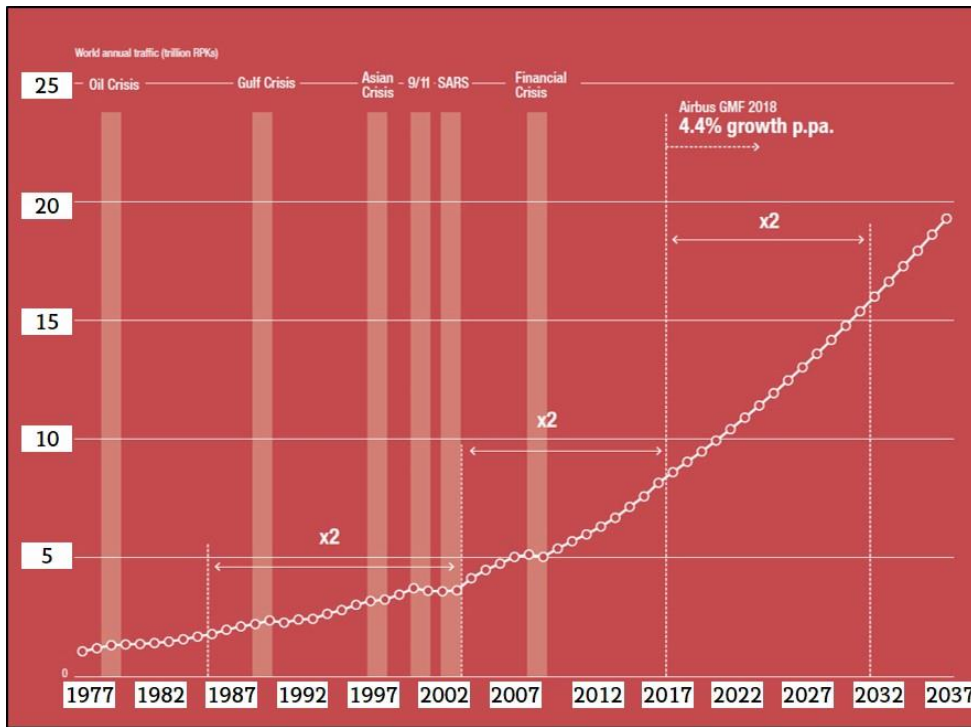
Dokumentu honetan laser soldadura bidez landutako nikel aleaziozko piezen ikuspegi integral bat aurkezten da: garatutako iragarpen-modelo bat oinarritzat harturik, industrian aplikazio zuzena izango luketen entseguen emaitzak eta ondorioak uztartzen dira. Tokian tokiko makinerien mugak aintzat hartuz eta moldakortasun handia eskaintzen duten ispiluez osaturiko eskanerra erabiliz, industria aeronautikoan hedaturik dauden nikel-kromo aleaziozko piezen soldadurarako tresna trinko bat sortu da. Horretarako, hegazkinen turbinen eraketarako erabiliak diren atalak aztertu egin dira, beraien geometria eta konposizio kimikoa garatutako zenbakizko ereduaren barneratuz, sarrera parametro arabera emaitza ezberdinak iragarri. Potentzia, aitzinapen abiadura, fokua-ren posizioa edo mugimendu estrategia ezarri, zeharkako profilak eta mikroegitura lortu ahal izateko bero transmisiorako ekuazioak inplementatu dira, modelo analitiko batetik abiatuz amaierako situazio batera heltzeko asmoz. Modeloaren balioztatzea hainbat entseguen bidez erdietsi da.

Lan hau Euskal Herriko Unibertsitateko Mekanika Saileko instalazioetan burutu da, ikerketa zientifiko batetik abiatuz euskal industrian estrategikotzat jotzen den aeronautika arloan probestua izan dadin. Egun balio erantsi handiko piezak sortzeko dauden soldadura teknika ezberdinak kontuan izanda, laser soldadurari alternatiba integral bat eskaintzeko asmoz gauzatu da lan hau. Hortaz gain, garatutako metodologia eta modelo ez dira bide hertsia bat, bero iturriak erabiltzen dituzten beste soldadura teknikekin egokitu eta bateratu baitaitezke.

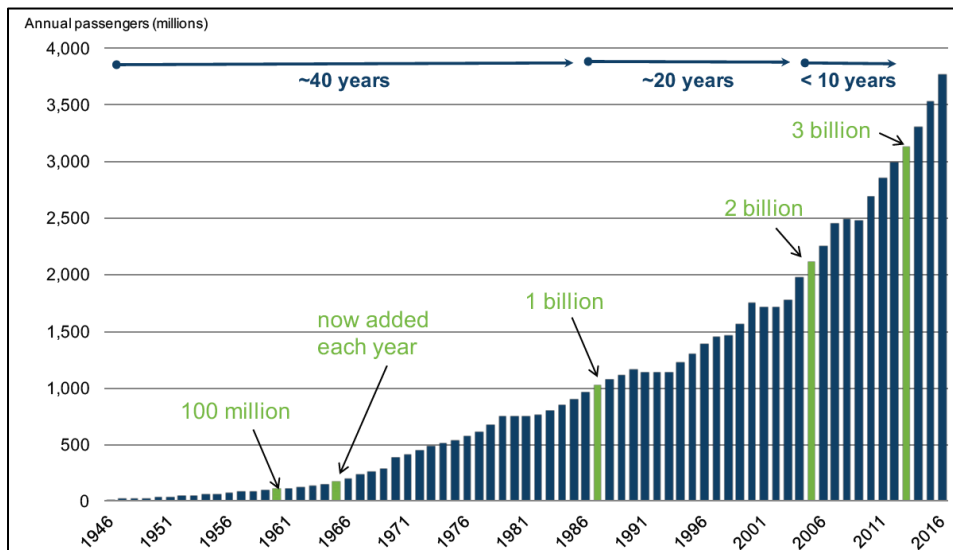
Laser bidezko fabrikazioaren inpaktu ekonomikoari erreparatuz, 2015 urteko merkatuko lehen, bigarren eta hirugarren mailako BPG globaletik 64 mila milioi euro arlo honetatik ekarriak izan ziren. Ekipamenduei dagokienez, merkatuan 13 mila milioi euroko fluxua sorrarazi zen, batez ere, Europa eta Ekialde Urrunaren arteko mugimenduari esker, Txina laser-produktuen kontsumitzaile nagusia delarik [Lawrence, 2017].

Aipatutako laser industriarekin lotura zuzena du aeronautikaren sektoreak. Sektore horrek mundu mailako gas isurpenen % 2 sortzen du, eta ondorioz, atal haundiago baten osagai izango diren pieza ezberdinak elkartzerako orduan, helburu nagusietako bat hegazkinen pisu totala aurrezteka izango da, erregaiek sortutako kutsatze maila hori ahalik eta gehien murrizteko [Alexopoulos, 2016]. Hau da, torloju, zirindola edo errematxeen tekniken orde, soldadura bitarteko loturak bilatzen dira, gehiegizko material hori saihestuz. Horretarako, aeronautika arloko superaleazioak elkartzeko, laser bidezko soldadura ahalmen handiko teknika egokia da. Era berean, abioiek hegaldietan zehar pairatzen dituzten baldintza gogorren aurka ezaugarri mekaniko zehatzak ziurtatu beharko dituzte soldatutako guneek. Ere mu hauen kritikotasun maila kontuan izanik (materialak urtu eta solidotu ostean propietate mekanikoen aldaketa bat gertatzen baita), soldatze prozesuaren azterketa eta sakontzea ezinbestekoa izango da balio erantsi handiko piezak lortu ahal izateko. Hegaldi luzeetako abioien motoreek kostu totalaren % 40 bere gain hartzen dute [Zapirain, 2011], nikel-kromo aleazioak bertan erabilitako osagai nagusietakoak direlarik. Beraz, garatutako modelo Inconel® 718 bezalako aleazioen inplementazioa bilatu da, emaitza zientifikoetatik aplikazio industrialetara zuzenean igaro ahal izateko.

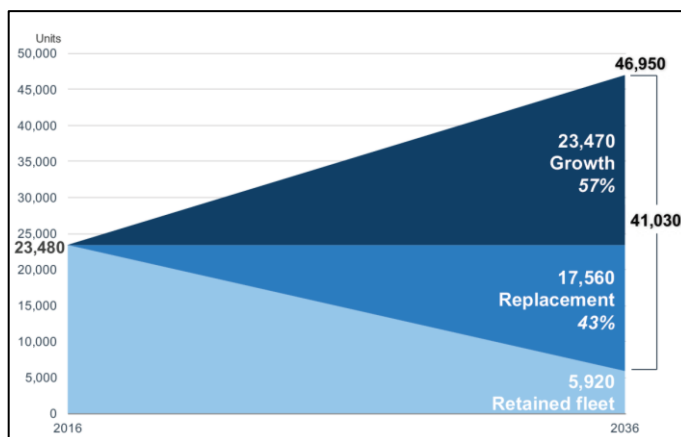
Industriaren egoerari dagokionez, aipatu beharra dago aeronautikaren arloak ondo eutsi diela historian zehar gertatutako gorabehera ekonomikoetara, petrolioaren krisia, Golkoko Gerra edo 2008ko krisi finantzieroa kasu. Horien ostean, XXI. Mendean hasieratik hegaldien trafikoa 2,3 aldiz hazi izana industria horren osasun ekonomikoaren adierazle argia da. Gainera, hurrengo hamabost urteetan kopuru hau bikoiztea aurreikusten da, 2037 arte urtero % 4,4ko hazkundea eta 4 mila milioi dolarreko eskari metatua izanik (ikus Irudia I.1)[Airbus, 2018]. Egun, urtero 3,7 mila milioi bidaiari eta 23.480 abioi daude indarrean, 2036an azken zenbaki hau 46.950 izango dela aurreikusiz (ikus Irudia I.2) [Boeing, 2017].



Irudia I.1: Airbus: mundu mailako urteko hegaldien trafikoa



Irudia I.2: Boeing: urteko bidaiariak (milioika)

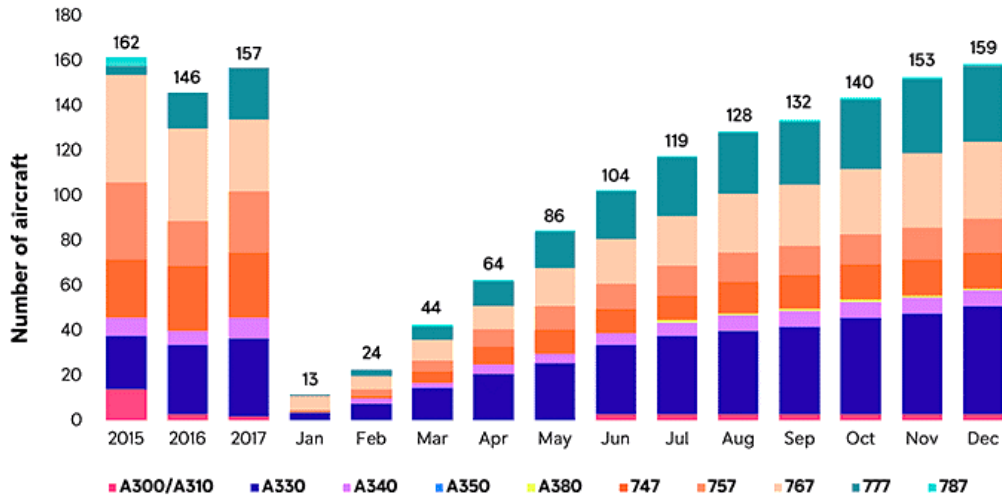


Irudia I.3: Boeing: mundu mailako hegazkin kopurua

Motorren Ekipamendu Originalen Fabrikatzaileen artean (*Original Equipment manufacturer – OEM*), Rolls Royce izan zen ekoizpenetan aitzindari 2018. urtean, fuselaje handiko 57 hegazkinetarako produktuak ekoiztuz (merkatuko % 36). Gailendutako modeloen artean, A330 eta Boeing 777 izan ziren nagusi. Rolls Roycen atzetik, Pratt & Whitney (P&W) agertu zen, 50 hegazkinetarako ekoiztiz. Hirugarren postuan, General Electrics (GE), 45 abioientzat osagaiak fabrikatuz. Azkenik, CFM eta EA enpresak agertzen dira, produkzio urriarekin (ikus Irudia I.4) [Rolls Royce, 2019].

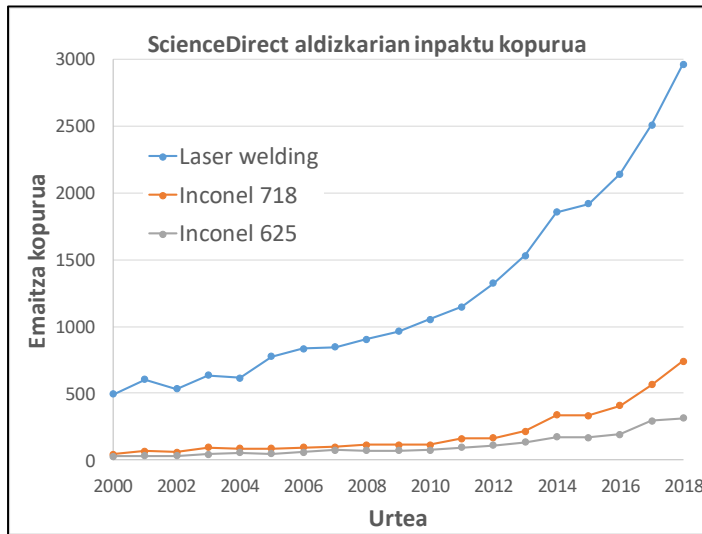
OEM	A330		A340		777		787		767		747		757		A300/A310		A380		Total	
Rolls-Royce	24	-4	0	=	18	+5	1	+1	0	-2	0	-1	13	-10			1	+1	57	-5
GE	3	=			13	+3	0	=	21	-5	7	-2			1	-1			45	-4
P&W	21	+17			3	+3			13	+9	9	-10	2	-2	2	+2			50	+29
CFM			7	-2															7	-2
EA																	0	=	0	=
Total	48	+13	7	-2	34	+11	1	+1	34	+2	16	-13	15	-12	3	+1	1	+1	159	+2

Irudia I.4: Rolls Royce: hegazkin ekoizpena 2018an.



Irudia I.5: Rolls Royce: fabrikatutako hegazkin kopurua 2015etik.

Aldizkari zientifikoei dagokienez, are eta zabaldiago daude nikel-kromo aleazioen eta laser bidezko soldaduraren inguruko artikulua [ScienceDirect, 2019], aeronautikaren eta laserraren industria geraldiki garaietan daudenaren seinale. Burututako lan honek arlo zientifikoa garrantziko aurrerapen bat ekar dezakeelakoan, balio erantsi handiko produktuak sortzeko erabili ahal izateko asmoarekin ere garatu egin da.



Irudia I.6: ScienceDirect aldizkariko inpaktu kopurua (Laser welding, Inconel 718, Inconel 625)

Gauzak horrela, lan honek industria aeronautikako osagaien laser bidezko soldadura barneratzen du. Garrantzi zientifiko eta industrialak duen arloa da hau, non simulazio-tresnen garapenak prozesu horren fidagarritasuna eta sendotasuna bermatzen duen.

I.2. HELBURUAK

Lan honetako helburu nagusia laser bidezko soldadura prozesua simulatzen duen modelo integral bat garatzea izan da. Tresna honek, sarrera-parametro jakin batzuk izanda, nikel-kromo superaleazioen soldatzea nolakoa izango den iragartzea du xedetzat. Bero transmisioaren ekuazioak erabiliz, laserraren jarrera eta piezekiko eraginari buruzko informazioa lortuko dugu, prozesu honen ulertzean sakonduz. Era berean, soldatze prozesua aurrera eramateko egon daitezkeen mugak kontuan izanik, batez ere makineriaekin lotura dutenak (potentzia maximoa edo spot diametroa), modelo honetan aitzinapen mugimendu lineala mugimendu zirkularrarekin uztartzen da, wobble teknika erabiliz. Hau da, piezen arteko sestrarekin bat eginez eta kordoiaren norabidea jarraituko duen higiduraz gain, modelo honek spot batek azalera handiago bat bildu ahal izateko sor ditzakeen mugimendu zirkularrak kontuan izango ditu.

Lan honetan planteatutako helburuak hurrengo puntuetan laburbiltzen dira:

- a. Inconel 718[®] aleaziozko piezen laser bidezko soldaduraren bideragarritasuna aztertzea eta sarrera-parametro ezberdinak erabiliz, onargarritzat eman daitezkeen soldadurak identifikatzea.
- b. Potentzia, aitzinapen abiadura, fokuaen posizioa edota babes-atmosfera sortzeko gasen emaria doitzuz eta behatze mikroskopikoaren laguntzaz, aldagai egoki horien tarte bat sortzea, bakoitzari emaitza ezberdin bat esleituz.
- c. Lortutako profil geometrikoa (soldaketa-kordoiaren zabalera eta sakonera), eremu termikoa edo mikroegiturari buruzko informazio eta datu iturri anitz bat sortzea.
- d. Eredu analitiko iragarle bat garatzea, bero iturri batetik abiatuz, gai izango dena entsegu enpirikoekin bat etortzea, simulazioen eta errealtatearen arteko errorea ahalik eta txikiena izatea lortuz. Horretarako, eremu termikoen azterketa bat eginik, materialaren fase aldaketak kontuan hartuko dira, gune urtuak zeintzuk izango diren zehazteko.
- e. *Wobble*-teknikaren ezaugarrien azterketa eta ereduarekiko bateragarritasuna garatzea.
- f. Burututako entseguak industria aeronautikoan egun erabiltzen diren piezen neurriekin bat datozen heinean, lan honen aplikagarritasun zuzena bermatzea, ikuspegi zientifiko hertsia batetaz gain.

I.3. MEMORIAREN ANTOLAKETA

Lan hau ondoren deskribatuko diren kapituluetan antolatu da:

II. Kapituluan laser soldaduraren artearen egoera aztertzen da, soldatze-teknika horren eboluzioa, egungo egoera eta etorkizunera begirako aurreikuspenak azalduz. Electron Beam Welding (*EBW*), Tungsten Inert Gas Welding (*TIG*) edo Plasma Arc Welding (*PAW*) bezalako beste teknika batzuekiko konparaketa eginez, laserrak eskaintzen dituen indarguneak eta

balioaniztasuna azpimarratzen dira, erabiltzen diren laser makineria mota ezberdinak zehaztuz. Era berean, soldaduretan ager daitezkeen ohiko akatsak aurkezten dira. Bestalde, optika mugikorren eta eskanerren funtzionamendua azaltzen da.

III. Kapituluan industria aeronautikoaren egoera aztertzen da, hegazkinetan eta bere osagaietan aurki daitezkeen gune soldatuak azalduz. Gas turbinen osagaien artean nikel-kromo aleazioak nagusi diren heinean, motoreetako Tail bearing Housing (TBH) atalen azalpen bat egiten da kapitulu honetan, beraien fabrikazio eta diseinuaren garrantziaren maila azpimarratuz. Nikel basedun superaleazioen erabilgarritasun eta erabilpenaren analisi bat burutuz, Inconel 718® materialaren laser bidezko soldatzearen egokitasun eta ahalmena aztertzen dira, egun erabiltzen diren beste elkartzeko metodoekin alderatuz (*EBW*, *PAW* edo *TIG*). Era berean, laser soldaduran erabilitako makineria izango da aztergai kapitulu honetan, zelula mota ezberdinen sailkapen bat eginez.

IV. Kapituluan modelo iragarleek historian zehar izan duten garapenean sakonduz, hauen beharra eta egokitasuna analizatzen dira. Zenbakizko eredu eta eredu analitikoaren arteko diferentziak eta bakoitzaren alde ahul eta indartsuak nabarmenduz, egungo ordenagailuek eskaintzen duten gaitasunaz balioetako diren tresna hauen ahalmena aztertzen da. Lan honi dagokionez, soldadura kordioek izango duten amaierako itxura iragartzeko erabiliak izan diren teknikei buruz hitz egiten da. Bero-transmisioaren ekuazio klasikoetatik abiatuz, denbora eta propietate mekanikoen aldaketetan oinarrituriko modeloa azaltzen da.

V. Kapituluan garatutako eredu iragarlea azaltzen da. Bero-transmisioaren ekuazioak aplikatuz, *wobble*-teknika bidez aplikaturiko energiaren azterketa analizatzen da, entsegu enpiriko eta zenbakizko ereduak barneratu behar duenaren arteko erlazio zuzen bat ezarriz. Energiaren erlazio hau, eroankortasun termikoa, konbekzioa eta galerak inplementatuz, prozesuan zeharreko propietateen aldaketa azaltzen da. Bestalde, erabilitako *wobble* teknikaren aitzinapen eta biraketa abiaduren arteko erlazioaren garapena ere deskribatzen da.

VI. Kapituluan entsegu enpirikoak nola burutu diren azaltzen da. Bertan, Inconel 718® piezen propietateak aurkezten dira. Erabilitako makineriari dagokionez, laserra, eskanerra, hozte-sistema, babes-gasaren hornitze-sistema, eta erabilitako pirometroa azaltzen dira. Era berean, probeten prestaketa eta neurketa nola burutu den azaltzen da.

VII. Kapituluan. Sarrera-parametroen tarte baliagarrietatik abiatuz, gas turbinetan erabilgarri liratekeen soldadura mota ezberdinak azaltzen dira, horiek lortzeko beharrezkoak diren sarrera-parametro konbinaketa ezberdinak zehaztuz (*wobble*aren diametroa, potentzia edota soldatze-abiadura). horrez gain, foku-posizioaren eta babes-gasaren eragina aztertzen dira. Ereduaren beharra eta baliagarritasuna behatzen dira, tresna trinko honen aplikagarritasuna onartuz industriari dagokionez. Probeten emaitzak aztertzeko, bakoitzaren itxura eta zeharkako profil geometrikoaren neurriak kontuan hartuz, sarrera-parametroen arabera lortutako datu-basea azaltzen da. Era berean, sarrera-parametroen arabera mikroegituraren azterketa burutzen da baita ere, non pirometro baten neurketak kontuan harturik, dendriten formazioa aztertuko den.

VIII. Kapituluan lan honen ondorioak deskribatzen dira. Gainera, etorkizunera begirako azterlerroak zehazten dira.

II. Kapitulua. Laser-teknologia

II KAPITULUA. LASER-TEKNOLOGIA

Atal honetan laser-teknologiaren ikuspegi integrala azaltzen da: laserraren sorreratik hasita, historian zehar izandako garapena eta aurrerapen garrantzitsuenak azpimarratuz, piezak batzeko laser-soldadura teknikaren aplikazioak eta ezaugarriak deskribatzen dira. Gainera, beste soldatze-teknikak aztertzen dira, *Electron Beam Welding (EBW)*, *Tungsten Inert Gas Welding (TIG)* edo *Plasma Arc Welding (PAW)* kasu. Azken hauek laserrarekin alderatuz, honen balioaniztasuna eta azken urteotako eboluzioan sakontzen da, aeronautikan erabat hedaturik dauden nikel oinarriko superaleazioen soldaketarako egokitasuna ikertuz. Era berean, egun merkatuan dauden laser-makineria mota ezberdinak sailkatuko dira, bakoitzaren ezaugarriak zerrendatuz.

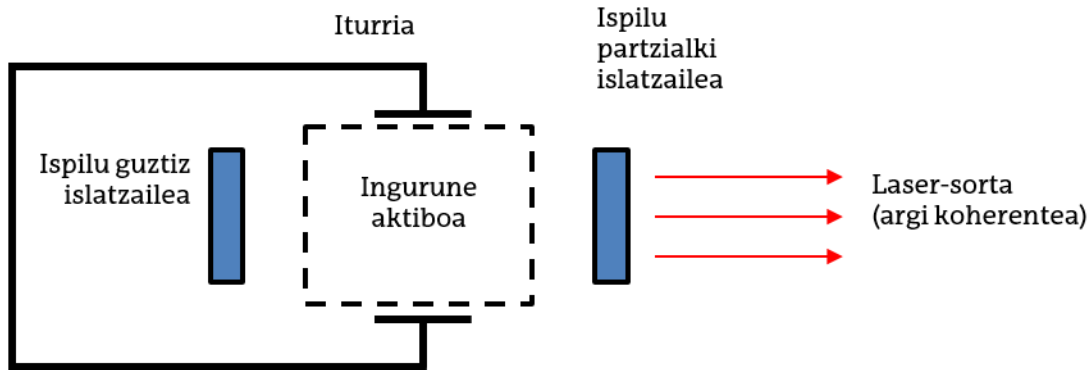
II.1. LASERRAREN OINARRIZKO OSAGAIAK

Laserra argia amplifikatzeko eta igortzeko sistema da. Gailuak argi hori era koherentean igortzea ahalbidetzen du, hau da, maiztasun eta fase bereko uhinak sortzen ditu. Beste argiekin erkatuz, laserraren energia azalera txiki batean kontzentra daiteke, zehaztasun handiko bero-iturri lez lan egin dezakeelarik. Horri esker, laserrak hainbat aplikazio industrial ditu eta materialak lantzeko erreminta baliagarria izanik, leunketa, tenplaketa edo soldadura bezalako prozesuak aurrera eramateko gai da.

Laser batek hurrengo hiru osagarriak izan behar ditu:

1. **Ingurune aktiboa:** argia amplifikatzeko helburua du. Era anitzetan egon daiteke: solidoa, likidoa, gasa edo plasma. Halaber, erabilitako materialen artean, hurrengoak aurki daitezke: errubia, neodimioa kristal solidoekin (Nd:glass) eta Nd:YAG, koloratzaile organikoak, helio neoia (He-Ne), karbono dioxidoa (CO₂), argoia (Ar) eta nitrogenoa (N₂).
2. **Iturria:** ponpaketa bidez ingurune aktiboa kitzikatu eta energia-mailen arteko alderantzikatzea eragiten du. Edozein energia-iturri erabil daiteke ingurune aktiboa eszitatzeko. Ohikoenak hurrengoak dira: flash-lanparak (argi ez-koherentea), beste laser baten igorpena (argi koherentea), elektroiak (sorta bidez edo korrante zuzenean), erreakzio kimikoak, ioi-sortak eta X izpiak. Lortutako potentzia ingurune aktiboaren kantitatearekiko eta ponpaketa-iturriarekiko proportzionala izango da, bilatu nahi den emaitza bata ala bestea kontrolatuz eskura daitekeelarik.
3. **Erresonadore optikoa:** *feedback* edo atzeraelikadura optikoa bermatu eta populazio-alderantzikatzea sustatzeko barrunbea da. Alderantzikatutakoan, sistemaren goiko energia-mailan beheko energia-mailan baino atomo gehiago egongo dira, lehenak eszaturik eta bigarrenak kitzikatu gabe. Ingurune aktiboak sortutako argia atzera eta aurrera mugiarazten du erresonadoreak, ingurunearen ardatzarekiko paralelo. Prozesu hau hainbat alditan errepikatzen da, argia amplifikatzen doalarik. Amplifikazio honek emandako irabaziaz sistemaren galerak berdintzen dituen unean, atalase-egoeran aurkituko da erresonadorea. Hortik aurrera, argiak erresonadorearen muturren artean amplifikatzen jarraitzen baldin badu, erradiazioaren igorpen estimatuaren bidezko argiaren amplifikazioa lor daiteke. Erresonadorearen alde batean % 100 islatzaile den ispilu bat dago, beste aldean soilik zati txiki bat irteten uzten duen ispilu bat dagoelarik. Beraz, barrunbe honetan gertatzen den prozesuak ingurune aktiboa kitzikatzeko balio

du, ponpaketa iturriak egiten duen lanari gehituz. Azken finean, erresonadore optikoa argi-uhin monokromatiko eta norabide bakarrekota sortzearen arduraduna da.



Irudia II.1: Laserraren oinarriko osagaien eskema.

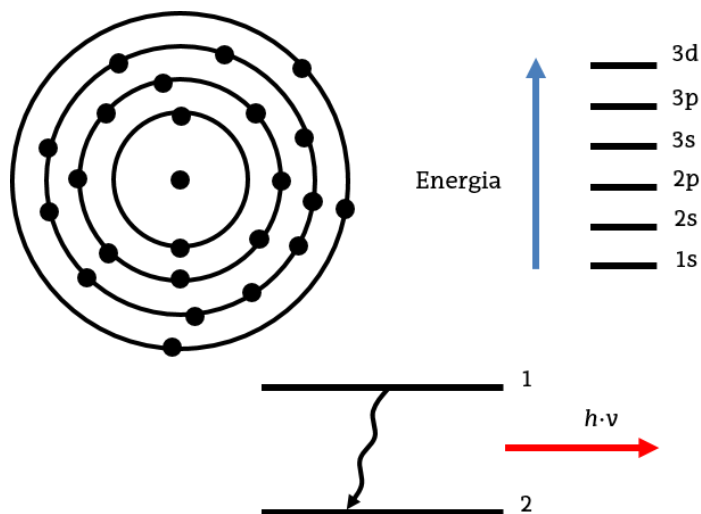
II.2. LASER-ARGIAREN AZALPEN FISIKOA

Ingurune aktiboa, iturria eta erresonadore optikoa lanean era egokian jarriz gero, ingurune aktiboaren atomoek eta molekulek iturriaren eremu elektromagnetikoarekin elkarlanean hasten dira. Sistema atomikoan, ioiak, atomoak eta molekulak energia-maila ezberdinetan kokatzen dira. Maila hauek beraien energia ezaugarriagatik sailkatzen dira, laser teknologia eramanda, kitzikapen-maila lez izenda daitezkeelarik.

Atomo batek E_1 eta E_2 energia-maila ezberdinen artean trantsizio bat burutzen badu, fotoi bat xurgatu edo igorriko du prozesu horretan, fotoi horren energia-aldaketa ν_{12} maiztasunaren eta Plancken h konstantearen bidez kalkulatu delarik:

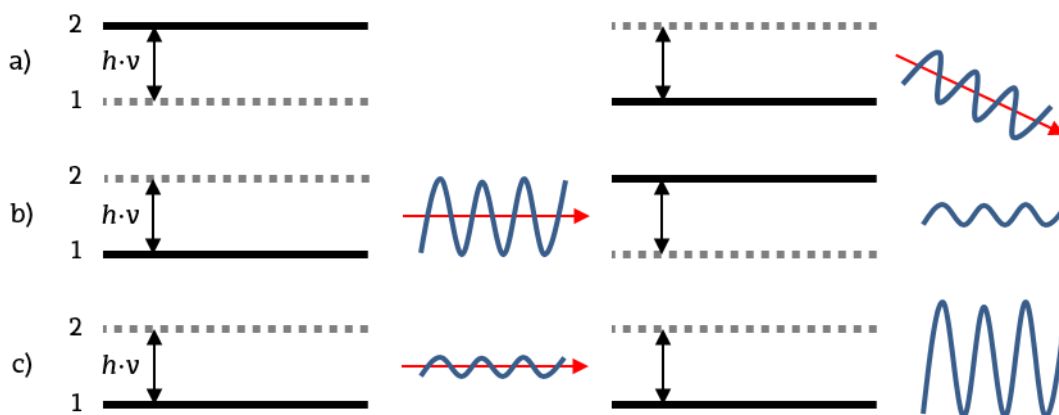
$$h \cdot \nu = |E_1 - E_2| \quad [1]$$

Bada, behe energia-maila batean aurkitzen diren ioiek, atomoek edo molekulek fotoiak xurga ditzakete goiko energia-maila batera igo ahal izateko. Hala ere, xurgapena ez da gerta daitekeen fenomeno bakarra.



Irudia II.2: Atomo bateko energia-mailak.

Partikula atomikoek eta eremu elektromagnetikoek elkarri eragiten ziotenean hiru aukera ezberdin sailkatu zituen Einsteinek: igorpen espontaneo (A_{21}), xurgapena (B_{12}) edo estimulaturiko igorpena (B_{21}), non A_{ij} eta B_{ij} Einsteinen konstanteak diren, bi energia-mailen arteko trantsizioa azalduko dutelarik.



Irudia II.3: Erradiazio-prozesuak bi energia-mailatako sistemetan: a) berezkoa; b) xurgapena; c) estimulaturikoa

Laser baten bideragarritasuna eta igorpen estimulatu bidez sor daitekeen argiaren anplifikazioa hurrengo elementuen arteko erlazioa ezarri ondoriozta daiteke: arestian aipaturiko hiru prozesuak, Einsteinen A_{ij} eta B_{ij} koefizienteak, gorputz beltz baten erradiazioa gertatzeko inguru-baldintzak eta molekulen bitzta luzapena dira, hurrenez hurren [Verdeyeyn, 1981].

II.2.1. Berezko igorpena

Atomo batek goiko energia-maila batetik behekoa trantsizioa egiten duenean, energiaren askatzea ausazko norabidean igortzen den fotoi baten bidez azaltzen (edozein norabidetan igor daiteke fotoia, kanpo eragin batek norabide zehatz batean igortzeko behartzen ez badu). Berezko prozesu honetan askaturiko energia N_2 bigarren energia-mailako (E_2) populazio-dentsitatea eta A_{21} Einsteinen koefizienteagatik eraikia dago:

$$\left. \frac{dN_2}{dt} \right|_{\substack{\text{berezko} \\ \text{igorpena}}} = -A_{21} \cdot N_2 \quad [2]$$

Berezko igorpen-prozesua gertatu den tokian ez baldin bada beste prozesurik gertatzen, populazio atomiko guztiak lehen energia-mailarantz (E_1) joko du, bitzta erradiaktiboa (τ) deritzona ezarri. E_1 betetzen doan heinean, E_2 husten joango da, populazio handitze- eta txikitze-abiadura bi hauek berdinak izan behar dutelarik.

$$\tau = (A_{21})^{-1} \quad [3]$$

II.2.2. Xurgapena

Prozesu hau aurrekoaren kontrakoa da, non atomo batek fotoi bat xurgatzen duen beheko energia-mailatik goiko energia-mailara igaro ahal izateko. Xurgapenaren ondoriozko populazio-dentsitatearen aldaketa, berezko igorpenean ez bezala, atomo xurgatzaile kopuruaren eta energia-iturriaren arteko erlazioarengatik ezarria dago, non $\rho(\nu)$ eta B_{12} iturri edo eremuaren energia-dentsitatea eta Einsteinen koefizientea diren, hurrenez hurren.

$$\left. \frac{dN_2}{e} \right|_{xurgapena} = +B_{12} \cdot N_1 \cdot \rho(\nu) = -\left. \frac{dN_1}{dt} \right|_{xurgapena} \quad [4]$$

Igorritako uhinaren anplitudea xurgatutakoarena baino txikiagoa da, E_1 mailatik E_2 -ra igarotzeko prozesu horretan energiaren soberakina igortzen delarik. Hori bai, xurgatutako fotoiaren norabide berbera jarraituko du sortutako uhinak. Beraz, atomoak soilik beheko energia-mailatik goikora igarotzeko behar duen fotoiaren uhinaren zatia xurgatzen du, soberakinari jatorrizko bidea jarraitzen utziz.

II.2.3. Estimulaturiko igorpena

Prozesu hau xurgapenaren aurkakoa da, atomoak eremuari soberan duen energia ($h \cdot \nu$) ematen diolarik. Igorritako fotoiak uhin kitzikatzailaren maiztasun, fase, polarizazio-norabide eta norantza berdina dauzka.

Eremu kitzikatzailak eta eszitate beharreko atomo kopuruak prozesu behartu honen portaera definitzen dute.

$$\left. \frac{dN_2}{dt} \right|_{\substack{\text{estimulaturiko} \\ \text{igorpena}}} = -B_{21} \cdot N_2 \cdot \rho(\nu) = -\left. \frac{dN_1}{dt} \right|_{\substack{\text{estimulaturiko} \\ \text{igorpena}}} \quad [5]$$

Laser teknologiantzat funtsezkoa da prozesu hau, argiaren amplifikazio koherentea ematen baita. Baina hau gerta dadin, populazioaren alderantzikatzea beharrezkoa da, hau da, E_2 mailako atomo kopuruak E_1 mailakoa baino handiagoa izan behar du, naturaren egoera egonkorra bortxatuz eta egoera ezegonkor bat lortuz.

II.3. LASER TEKNOLOGIAREN HASTAPENAK

XX. mendearen hasieran, Albert Einsteinek, Bohren eta Plancken energiaren ikerkuntzak aintzat harturik, hurrengo hipotesiak ezarri zituen trantsizio atomikoen igorpen estimulatuaren kontzeptuan [Einstein, 1916]:

1. E_1 eta E_2 egoera atomiko egonkorren artean, non $E_2 > E_1$, atomoarengan eragina duen $h \cdot \nu = E_2 - E_1$ erradiazioak estimulatutako igorpena sortuko du baldin eta atomoa goiko energia-mailan aurkitzen bada. Aldiz, atomoa beheko energia-mailan aurkitzen bada, absortzioa gertatuko da.
2. Estimulatutako igorpenaren kasuan, sortu den fotoiak fotoi kitzikatzailaren propietate berdinak izango ditu. Eraitza legez, anplitude bikoitza izango duen uhin-trena osatuko duten bi fotoi lortuko dira. Hau da, alderantzikatutako populazio egoeran dagoen sistema atomikoa fotoi batekin erasotzen bada, erradiazioaren amplifikazioa emango da.

Plancken erresonadorearekiko analogoa litzatekeen molekulen portaera kuantikoa ezarri zuen Einsteinek [Einstein, 1917], erradiazio-sortaren eraginaren eraitza zehaztuz. Sorta honek kitzikatutako molekulak $h \cdot \nu$ energia-kantitatearen igorpena edo xurgapena izango du ondorioztat eta $h \cdot \nu / c$ momentua transferituko zaio molekula horri. Are zehatzago, absortzioa gertatzen den kasuan, momentu horrek sortaren norabide berdina izango du. Aitzitik, molekula

goiko energia-maila batean aurkitzen bada eta ondoriozko igorpena gertatuz gero, sortaren kontrako norabidea izango du. Molekula aldi berean sorta anitzek erasotzen badute, eta hauek norabide ezberdinak badituzte, soilik batek izango du eragina, oinarrizko prozesu bakarra gertatuko delarik. Igorpen-prozesuan zehar molekula batek $h \cdot \nu$ energia-galera baldin badu, eta galera hau ez bada kanpo-eragile batek sortua, norabidezko prozesua izango da. Hau da, igorpena ez da uhin esferikoen bitartez gertatuko, eta hartutako norabide zehatzean $h \cdot \nu / c$ energia-atzerakada izango du molekulak, ausazko igorpena norabide horretan gertatuz. Nahiz eta uhin-teoriekiko hutsuneak izan eta hein handi batean molekulen portaeren denbora eta norabideak ausazkotasunaren menpe utzi, kalkulu teorikoan erradiazioak emandako energia eta transferitutako momentuaren arteko erlazioa estua zela baieztatu zuen Einsteinek.

Hortik urte batzuetara, Einsteinek iragarritako igorpen estimulatuaeren berrespen esperimentala lortu zuen Ladenburgekin [Ladenburg, 1933], elektrikoki kitzikaturiko gasen argiaren dispersioari buruzko ikerkuntza burutu baitzuen. Na, He, Ne edo Hg gasekin egindako esperimentuetan, espektro jarraitua duen iturri bateko argia gas horietatik pasarazi zuten. Dispersio handiko espektrografo batekin aztertuz, gas horien lerro espektralak behatzea posible izan zen, lerro ilun edo argiak lortuz iturriaren tenperatura beltza gasaren T tenperatura kritikoaren gainetik edo azpitik egotearen arabera. Tenperatura horri alderantzizkatze-tenperatura deritzo, eta une horretan atomoen geruza-populazioen arteko oreka estatistikoa azaltzen da. Ladenburgekin hurrengo ondorioztatu zuen: alde batetik, argi-iturriaren izpiek zeharkatutako gas-geruza argitsuak uniformeak zirela. Beste alde batetik, eta Boltzmannen ekuazioak dioen bezala, aztertutako gas-geruza horietan argiaren ibilbidean zehar bi egoeren arteko populazioaren ratioa ($Q=N_2/N_1$) definiturik zegoela. Laburbilduz, Ladenburgekin eta bere ikertzaile taldeak igorpen estimulatua edo "absortzio negatiboaren" kontzeptua esperimentalki egiaztatu zuten.

1940ko hamarkadan Valentin Fabrikant zientzialariak baieztatu zuen sistema bat bortxa litekeela, bere oreka termikotik haratagoko egoera batera eramanez eta, ondorioz, kitzikatutako mailaren populazioa handituz. Anplifikazio molekular hau gerta dadin, N_2/N_1 ratioak g_2/g_1 baino handiagoa izan behar du, non N_j eta N_k maila hauetako atomo-dentsitatea eta g_j eta g_k beraien pisu estatistikoa diren [Bertolotti, 2015]. Baldintza hauekin, kanporako erradiazioa erradiazio erasotzailea baino handiagoa litzateke. Saiakuntzak gas deskargekin egin eta absortzio negatiboaren existentzia zuzeneko frogapenaren bidez baieztatu zuen Fabrikantek, garrantzizko aurrerapena eginez igorpen estimulatuaeren arloan.

Urte batzuk geroago, Lamb eta Retherford ikerlariek mikrouhinen metodoa erabili zuten arestian aipatutako populazio alderantzizkatzea gauzatu ahal izateko [Lamb, 1947]. Hidrogeno molekularra tungsteno labe baten termikoki disoziatuz eta zirrikitu batetik pasaraziz, elektroik sorta baten bitartez zeharka bonbardatu zuten. Eraitza hurrengo izan zen: metodo hau erabiliz gero, atomo horien parte bat beste maila metaegonkor batera igarotzen zela, atomo metaegonkor hauek atzerakada desbideratzea txikia zutelarik. Paraleloki, Kastlerrek populazioaren banaketa aldatzeko ponpaketa optikoa erabili zuen bere esperimentuetan, erradiazio ezberdinen bitartez atomoak argizatuz [Kastler, 1950]. 1952an sodio atomoekin frogatzea lortu zuen, eta geroago, laserraren lehen diseinua egiterakoan, materiaren konposizioa zehaztasunez ezagutzeko erabilia izan zen teknika honetaz baliatu ziren, ingurune aktiboaren bidez amplifikazioa sortu ahal izateko. 1966an Fisikako Nobel Saria irabazi zuen Kastlerrek.

1951n, Marylandeko Unibertsitateko Joseph Weber fisikariak gasen eta kristalen mikrouhinen erradiazio koherentea lortzeko aukera teorikoki aztertu zuen, energia-maila ezberdinen arteko trantsizioa gertatzeko beharrezko formulak ezarriz eta amplifikatutako populazioa lortuz. Hurrengo bi energia-mailak izanda, non $E_1 < E_2$, eta teoria kuantikoa oinarritzat harturik, E_1 mailatik E_2 mailara igotzeko probabilitatea (P_{12}) E_2 -tik E_1 -era (P_{21}) jaistekoaren berdina da. Beraz, $P_{12} = P_{21}$ dela baieztatu daiteke [Weber, 1953]. Amplifikazioa lortzeko modua goiko energia-mailako populazioa behetia baino handiagoa izatea da. Eta hori lortzeko, Weberrek zera idatzi zuen: maiztasun zehatzeko eremua aplikatuz gero, eta trantsizioa baimendua baldin badago, trantsizioak gertatuko direla lehen mailatik bigarrenera. Baina goiko energia-mailen populazio dentsitatea baxuagoa denez, kitzikatutako sustantziak erradiazioa xurgatuko du. Orduan, eremu magnetikoa bat-batean alderantzizkatzen bada, lasaitze denbora-tarte labur bat izango du materialak, oreka berreskuratu arte. Eremua kontrako denez, orain oszilazio gehiago izango ditugu goiko mailan, eta goitik beherako prozesu horretan (hau da, oreka bilatzen den bitartean) amplifikatutako uhin elektromagnetiko bat sortuko da, erradiazio pulsu koherente bat lortuz. Beraz, erradiazioaren igorpen estimatuaren bidezko mikrouhinen amplifikazioaren teoria garatu zuen (ingelesez *Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation*: MASER; hemendik aurrera, maser). Ikerkuntza horrekin, Weberrek maserraren oinarri teorikoak ezarri zituen.

Urte berean, Gordon, Zeiger eta Townes ikerlariak estimatutako igorpenean oinarrituriko lehen gailua sortu zuten. Gailu hau, osziladore legez erabili ahal izateaz gain, mikrouhinen espektrometro edo amplifikadore lez erabili zitekeen. Azken honetan, amoniako molekula elektrodoen sistema elektrostatikoa batean sartuz, enfokatu eta sorta bat eratuz, barrunbe batera bideratzen ziren. Bertan, molekula goiko energia-mailatan aurkitzen zirela baieztatu zuten, barrunbearen energia-maila totala handituz indusitutako trantsizioen ondorioz. Igorpen lerro bat beha zitekeen *klystron* deritzen huts-hodiak transmititutako frekuentzia molekula horien trantsizio maiztasuna zeharkatuz gero [Gordon, 1954]. Townesi Fisikako Nobel Saria eman zioten 1964an.

Behin maserraren oinarriak finkaturik, ikerlariak goiko energia-mailako populazio dentsitatea nola handitu izan zuten helburu, horretarako metodo esperimental ezberdinak erabili zituztelarik. Horien artean, Basov eta Prokhorov zientzialari sobietarrek hiru mailen metodoa garatu zuten [Basov, 1954][Weber, 1953][Basov, 1955]. E_1 , E_2 eta E_3 energia-mailak izanik, non $n_1 < n_2 < n_3$ diren, maila ezberdinen arteko erlazioa ezarri zuten maiztasunaren bitartez. Horrela, atomoak lehen eta hirugarren mailen arteko trantsizioa izatera behar daitezke. Hortaz gain, 1953an Dickek mailen arteko trantsizio hori erradiazio koherente batez gertatuko dela baieztatu zuen, molekula batek igorritako fotoi bat beste molekulen egoerarekiko independentea litzatekeen adierazpena okertzat joz [Dicke, 1954]. Populazioaren inbertsioan oinarriturik, amplifikazio molekularra lor dezakeen ponpaketa optikoaren sistema patentatu zuen Dickek, barrunbe erresonadore baten bidez funtzionatzen zuena.

Bitartean, euren lanari jarraipena emanez, Gordon, Zeiger eta Townes zientzialariak garatutako maserrarekin egindako emaitza esperimentalak publikatu zituzten, teoriarekin konparatuz. Amoniakoarekin burututako frogak horiek zera ondorioztatu zuten: maserraren banda-zabalera txikia izan arren, erabilgarria litzatekeela tarte zehatz baterako, batez ere zarata baxuak amplifikatzeko bere gaitasuna kontuan harturik. Adibide gisa, espaziotik etor zitezkeen seinaleak amplifikatzeko, seinale hauen tenperatura oso baxua baita. Maserraren teknologiarik esker, seinale hauen amplifikazioa egigarria litzateke, betiere euren zarataren itxura mantenduz.

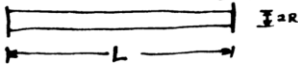
Honek maserraren abantaila baieztatzen zuen amplifikadore elektronikoekin konparatzerako orduan [Gordon, 1955]. Beraien lanetan oinarriturik, Bloembergenek 1956an egoera solidoko hiru energia-mailetarako maser baten proposamena garatu zuen lehen aldiz Harvardeko Unibertsitatean [Bloembergen, 1956].

Garai hartako egoera geopolitikoak kontuan harturik, II. Mundu Gerra amaitu berri, aurrerapen teknologikoek garrantzi handia hartu zuten. Herrialdeek teknologia berritzaileen sorkuntzaren aitzindaritza bilatu zuten. Gerra Hotzaren garaian, non herrialdeen arteko espioitza gatazkaren erdigunean kokatzen zen, Lasterketa Espazialaren aroan sartu zen mundua, Amerikako Estatu Batuen eta Batasun Sobietikoaren arteko norgehiagoka sutsua eman zelarik. Espaziora kohete, ontzi edota satelite bat bidaltzen lehenak historiaren orri bat idatziko zuen, inflexio puntu bat markatuz. Eta horrela gertatu zen Sputnik kohetearen jaurtiketarekin. Munduaren aurrean Sobietar Batasunak bere gailentasun eta gihar teknologikoa erakutsi zuen 1957. urteko urrian. Amerikako Estatu Batuen erantzuna ia jarraian etorri zen, hortik lau hilabetera Explorer satelitea orbitan jarri baitzuen. Kanpo erradiazioei buruzko informazioa, atmosferaren ezaugarri fisikoen ulertzea, komunikazio eta meteorologia helburu zuten sateliteen jaurtitzea, ilargiaren alde ezkutuaren ezagutza... Aukeren sorta amaiezina ireki zen lehia espazial honekin. Hurrengo urratsa gizakia kanpo espaziora bidaltzea izan zen, eta beste behin Sobietar Batasunak hartu zuen aurrea, Yuri Gagarin kosmonauta kanpo espaziora bidaliz.

Lehia horren erdian, non espazioari buruzko aurkikuntza garrantzitsuak erdietsi ziren, zientzialari "lurtarrek" maser teknologiari bueltaka jarraitzen zuten. Townesek bere horretan segitzen zuen, igorpen estimatuaren amplifikazioaren bidez argi koherentea lortu nahian. Horretarako, osziladore optiko bat eraikitzearen ideia garatu zuen, maserraren oinarriak maiztasun handiagoko eremuetara eramateko asmoz. Terahertzetako maiztasun-banda eta milimetroetako uhinak dagoeneko azterturik, Townesek eremu ikusgaia ikertzeari ekin zion. Orduantxe, Gordon Gould fisikaria doktorego tesiarekin lanean zebilen, talio-lurrunaren propietateak neurtzeko ponpaketa optikoaz baliatzen zelarik. Townesek Gouldengana jo zuen, uste baitzuen maser optikoan lortu nahi zuen populazio alderantzikatzerako baliagarria litzaiokeela Goulden teknika. Azken finean, biak ala biak helburu beraren bila zebiltzan. Hortik gutxira, bakoitzak bere bide propioa hartu zuen aurrean zuten problema ebazteko. Goulden bidearen zati bat jorraturik, aurretik optikaren arloan lana egin baitzuen, eta Fabry-Perot zeritzon erresonadorea oinarritzat harturik, lanari ekin zion. Barrunbe lineal horretan oso erreflexio altuko bi ispilu kokatzen dira, beraien transmitibitatea oso baxua delarik [Vaughan, 2017], eta lehen aldiz definitu zuen Goulden LASER (hemendik aurrera, laser) gailua deritzona, hau da: *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (erradiazioaren igorpen estimatuaren bidezko argiaren amplifikazioa). Hala ere, hamarkadak igaro ziren laser izenaren sorreran Gould bera atzean zegoela frogatu arte. 1957ko azaroaren 13an idatzitako kaierak horrela zela baieztatzen zuen, eta frogatu horri esker, patentea lortu zuen [Hecht, 2010].

Some rough calculations on the feasibility of a LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

Envision a tube terminated by optically flat



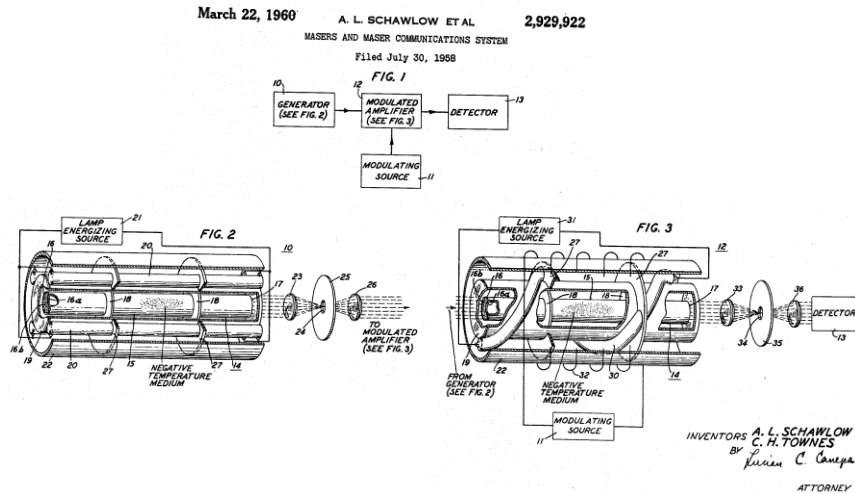
partially reflecting parallel mirrors. The mirrors might be silvered or multilayer interference reflectors. The latter are lossless and may have an arbitrarily high reflectance depending on the number of layers. A practical achievement is 98% in the visible for a 7-layer ~~thin~~ reflector. Films with closer tolerances than $\frac{1}{100} \lambda$ are not available so if a resonant system is desired, higher reflectance would not be useful. However for a nonresonant system, the 99.9% reflectance which are possible might be useful.

Consider a plane ^{standing} wave in the tube. There is the effect of a closed cavity since the ~~tube~~ wavelength is small the diffraction and hence the lateral loss is negligible.

© O.S. Heavens, "Optical Properties of Thin Solid Films" (Boston: The Scientific Publications, London, 1955), p. 220.

Irudia II.4: Goulden idazkia, "laser" hitza lehen aldiz agertu zenekoa.

Bitartean, Townes eta Schawlowek "maser optikoa" zeritzona definitu zuten, eszitatutako atomoak ordezkatzeko maiztasun altuagoko kitzikapena erabil zitekeela baieztatuz, hiru energia-mailadun maser sisteman erabiltzen zen ponpaketa optikoan moduan [Schawlow, 1958]. Eta azkenik, 1960. urtean, uhin infragorri, ikusgai eta ultramoreen sorkuntza eta anplifikazioa lortu ahal izateko gailua patentatu zuten. Hau da, ordura arteko maserra era normalizatu batean nola eraiki definitu zuten, erradiazioaren igorpen estimulatua erdiesteko beharrezkoak ziren atal eta bitartekoak definituz. Bi energia-maila ezberdinen artean molekulen populazioaren aldizkako banaketa ez-orekatu bat bermatuz, goiko energia-mailaren populazioa handi lezakeen gailuaren zehaztapenak ezarri zituzten 2.929.922 patente ospetsuarekin. Gailuak, berez, monokromatikoa behar luke, estimulatoriko igorpenak anplifikazio koherentea sortzen zuela aurretiaz frogatua baitzuten. Igorpen espontaneoak, aldiz, oso txikia litzateke estimulatoriko egoeran gertatzen zenarekin konparatuz gero [Schawlow, 1960].



Irudia II.5: Maserraren eskema: 2.929.922 patentea [Schawlow, 1960]

Laserraren historian zehar hainbat mugarri egon diren arren, batzuk ezinbestekoak izan dira. Eta inflexio puntu horietako bat 1960an Theodore Maimanek ezarri zuen, errubia ingurune aktibotzat zuen lehen laserra asmatu baitzuen [Maiman, 1960]. Schawlowek, hala ere, kromo (Cr^{3+}) eta korindoiz (Al_2O_3) osaturiko material hau alboratu zuen hiru energia-maila zituelako eta bere fluoreszentzia nahikoa ez zelako. Maimanek, ordea, errubia arbutatu beharrean, ikertzen jarraitu zuen. Material honen kristalez osaturiko mikrouhinen maser trinko bat eraikia zuen aurretiaz, eta errubia ondo ezagutzen zuen. Bere neurketak egin, eta Schawlowek zioenaren aurka, errubiaren fluoreszentzia tenperatura negatiboa lortzeko nahikoa zela baieztatu zuen. Era berean, kromo atomoak argi-zuriaren bidez kitzika zitezkeelarekin konbentziturak zegoen, eszitaturiko egoera hau flash-lanpara batek emaniko argi-pultsuei esker errazago lor zitezkeelarik [Hecht, 2010].

Urtebete geroago atara zuen Maimanek bere esperimintuen emaitzen dokumentua. Bitartean, Schawlowen edo Goulden talde ikertzaileak errubiz osaturiko Maimanen laserra eraikitzen saiatu ziren, azken honen teoria zalantzan jarriz eta egia ote zen frogatu nahian [Hecht, 2010]. Adibidez, Schawlowek eta Wiederrek, bakoitzak paraleloki eta bere aldetik, errubi gorriarekin saiakuntzak egin zituzten eta 1961eko otsailaren 1eko *Physical Review Letters* aldizkariaren zenbaki berean bi artikulu argitaratu zituzten [Schawlow, 1961] [Wieder, 1961]. Errubi mota honek Maimanek erabilitako errubi arrosak baino kromo kontzentrazio altuagoa zeukan (hortik dator bere kolore gorrixkagoa). Baina emaitzatzat lau energia-mailadun sistema eta 701,0 nm eta 704,1 nm arteko uhin ultramoreak lortu zituzten arren, ez zioten inoiz errubi gorridun laserrari aplikagarritasunik aurkitu, besteak beste, beraien lanen eraginkortasun energetikoa uste baino baxuagoa izan baitzen.

Azkenik, 1961ean, Maimanek errubiaren inguruko bere lanari sona eman eta hainbat solido fluoreszente absortzio-banda zabal batean optikoki kitzika zitezkeela baieztatu zuen, ordura arte erabilitako kitzikapen-teknikak erabilgarriak zirela onartuz eta ponpaketa-parametro garrantzitsuena iturriaren tenperatura efektiboa zela ezarri. Bestalde, hiru energia-mailadun materialez gain, lau energia-maila duten materialen populazioa alderantzikatzea posible zela idatzi zuen. Horrez gain, diseinaturiko ingurune gaseosoekin alderatuz, barra formadun solido dielektrikoek uhinen hedapenean eragina izan eta galerak sor zezaketela azaldu zuen [Maiman, 1961].

Laserraren lasterketa honetan, ikerlariak atsedetik gabe aritu ziren, bakoitza igorpen estimulatua bidezko populazio-alderantzikatzea lortzeko asmoz. Helburu horretarako, ingurune aktibo ezberdinen propietateak eta erabilgarritasuna aztertu zituzten, laser baten oinarriak aplikatu ahal izateko. Hori bai, ateratzen ziren artikulu zientifiko gehienetan, hasierako paragrafoa antzekoa izaten zen: "Ikerlari honek orain arte haxe lortu du, baina nire ikerketak..." Norgehiagoka, beraz, artikuluetan ere soma zitekeen, eta garai hartako lehia laserraren garapenerako ezinbestekoa izan zen.

Maimanen urrats garrantzitsuaren ondoren, Peter Sorokin fisikari estatubatuarren unea heldu zen 1960an. Sorokinek Schawlow eta Maiman aipatzen zituen bere idatzian, beraien lanak aurrera eraman ahal izateko ponpaketa optikorako potentzia oso altua beharrezkoa zela azpimarratuz, egoera metaegonkorrean 10^8 - 10^9 ioiren beharra baitzegoen. Berak, aldiz, kaltzio fluoruroz (CaF_2) osaturiko barrak uranioarekin dopatu zituen, argi-izpien bidez kitzikagarria den lau energia-mailako sistema bat sortuz [Sorokin, 1960]. Horren ostean, 1961ean, kaltzio fluorurozko kristal horiek samarioarekin dopatu zituen Sorokinek Mirek Stevenson fisikariarekin batera, berriz ere lau energia-mailako sistema bat lortuz [Sorokin, 1961]. Hala ere, errubi arrosa ez bezala, beraien aurkikuntza hauei ezin izan zieten aplikazio praktikorik bilatu: hozte-sistema kriogenikoaren beharra zuten eta soilik igorpen-espektro infragorrian lan egin zezaketan [Hecht, 2010].

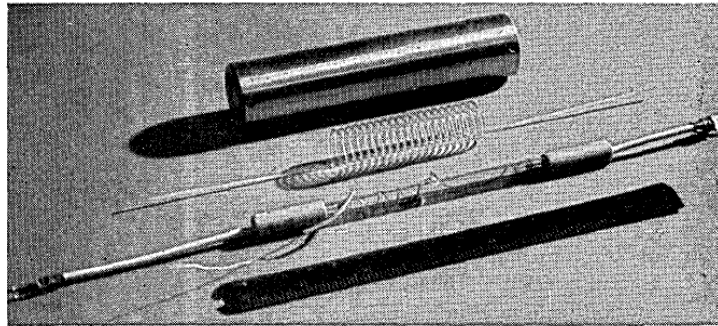
Ikerlariak igorpen estimulatua lortzeko hainbat kitzikapen-metodo probatu zituzten. Besteak beste, Javanek ingurune aktibo lez erabilitako gasa deskarga elektrikoaren bidez erasotzea proposatu zuen. Schawlowek eta Townesek tenperatura negatiboa ponpaketa optikoaren bidez lor zitekeela ezarri zuten, eta beraien aurrerapenei jarraipena emanaz, 1959an Javanek beste modu hau proposatu zuen: elektroien deskargei esker gas baten energia-mailen populazioaren alderantzikatzea lortzea. Oinarri sinplifikatua haxe zen: elektroien eta behe energia-mailako atomoen arteko talken ondorioz, azken hauek kitzikaturiko goiko maila batera igotzea posible zela [Javan, 1959]. Hortik gutxira, 1960ko abenduan, Javanen taldeak bere ikerketa modu esperimentalean aplikatu eta eszitatutako helio atomoek neoizkoei energia transferitzea lortu zuen, azken hauek argia emateko gai zirelarik. Honela, proposatutako helioz eta neoiz osaturiko gas nahasketak eremu ikusgaiko maser bat bezala joka lezakeela frogatu zuten [Javan, 1961]. Deskarga bidez kitzikaturiko gasezko lehen laser hau osziladore optiko jarrai eta koherente baten kontzeptutik pulsatutako egoera solidoko laserretatik baino hurbilago zegoen. Dena den, Schawlow eta Townesek proposaturiko 10 cm luzerako barrunbe erresonadorea ez zen nahikoa atomoak eszitzatu ahal izateko, eta 1 m-eko hodia eraiki behar izan zuten [Hecht, 2010]. Elektroien deskargen bidez kitzikaturiko gasek osatutako maserraren diseinuaren bila ihardun zuen Sandersek zentzu berean [Sanders, 1959], baina aurrerapenak ez ziren espero bezain sakon eta azkarrak izan.

1962an, ordea, Hallek energia elektrikoa uhin infragorri koherenteetan bihur zezakeen lehen egoera solidodun gailua definitu zuen, historiako lehen laser erdieroalea asmatuz. Galio arseniurodun (GaAs) ingurune aktiboa atalase-korronte zehatz batetik gora erasotuz gero, igorpen estimulatua sor zitekeen, bideratutako argi-sorta mehea agertzen baitzen. Gainera, balentzien bidezko elektroien energia-eremuen trantsizioan oinarrituriko lehen laserra izan zen Hallena [Hall, 1962].

Erresonadore optikoetara bueltatuz, beraien analisi teorikoan aritu zen Fox eta bere taldea. Erresonadore hauen portaera hobeto ulertzeko, Fabry-Perot motako interferometroa erabili

zuten, eremu elektromagnetikoan ager zitekeen difrakzioa aztertuz. Difrakzioaren galerak edota uhinaren moduak zehazki ikertu eta interferometroaren gaitasunarekin erlazionatu zuten, ispiluen neurri eta motak sailkatuz. Behin baldintza batzuk beterik, hurrengo ondorioztatu zuten: interferometroa ingurune aktiboan murgildurik egonez gero, bai gasezko bai egoera solidoko maserren energia-galerak neurtzeko gai zela [Fox, 1961].

Bitartean, Snitzer eta bere taldea kristal optikoak elementu arraroekin dopatzen aritu ziren. Praseodimioa, holmioa, erbioa edo tulioarekin probatu ostean, igorpen estimulatua sortzeko neodimioa egokiena zela baieztatu zuten. Errubi gorriaren emaitzekin konparatu zitekeen historiako lehen zuntzeko laser optikoa sortuz [Snitzer, 1961]. Emaitza hauetan oinarrituz, ikertzaile talde anitzek Snitzerren kristalen neurriak txikitzeari ekin zioten, gailuen potentzia handitzeko asmoz. 1964. urtean, Snitzerrek, Koesterrekin batera, lehen zuntzeko laserren aplikadorea sortu zuen, pultsu-denboren iraupenean oinarriturik. Hau lortzeko, zuntzari malguki itxura eman eta hutsunean flash-lanpara lineal bat sartu zuten, Maimanek egin bezala. Ponpaketa-potentzia eta pultsuen iraupenaren arabera aplikazio nabarmena lor zitekeen 1 m luzerako zuntzeko laserretan, amaierako zatia lantzerka moztuz eta, horrela, atzeraelikadura eragotziz [Koester, 1964].



Irudia II.6: Zuntzeko laser-aplikadorea [Koester, 1964]

Urte berean, laserren historian beste mugarri bat ezarri zuen Joseph Geusic fisikari estatubatuarra. Itrio aluminioa ($Y_3Al_5O_{12}$) hiru aldiz ionizaturiko neodimioarekin (Nd^{3+}) dopatuz, uhin koherenteak sortzeko ingurune aktibo egokia aurkitu zuen. Orduetik aurrera, egoera solidoko laser erabiliena bilakatu zen itrio aluminio granatedun (*Yttrium Aluminum Garnet; YAG*) kristalez osaturikoa, Nd:YAG deritzona. Berezko 1064 nm-ko igorpen infragorria lortu zuten, giro-tenperaturan lan egin zezakeelarik [Geusic, 1964].

Zuntzeko eta egoera solidoko laserren aurrerapenak bultzatuta, gasezko laserren garapena heldu zen. Molekuletan bibrazioek sorturiko trantsizioetan oinarriturik, Kumar Patelek eta bere taldeak ingurune aktibotzat karbono dioxidoa zuen laserra ikertzen ihardun zuten. Aurrera eramandako saiakuntzek 1 mW-eko uhinaren igorpen jarraitua posible zela erakutsi zuten [Patel, 1964]. Lehen urrats garrantzitsu horren ostean, prozesuaren eraginkortasuna handitzen saiatu ziren. Gauzak horrela, CO_2 gasa elektrikoki kitzikaturiko nitrogenoak emandako energiarekin eszitatuz, 10 W-eko potentziak lortzera heldu ziren, eta geroago, nitrogenoa helioarekin nahastuz, 183 W-eko puntako irteera-potentzia erdietsi zuten [Patel, 1965]. Zentzu berean, Bridges ikerlaria gas nobleekin lanean aritu zen, eta pultsu bidez kitzikaturiko argoiarekin, zehazki, 454,5 eta 528,7 nm arteko uhin-luzerako emaitzak lortu zituen (kolore urdin eta berdearen guneak, hurrenez hurren). Hau da, espektro ikusgaiko eremuan igor

zezakeen argoi ionizatutako lehen laserra garatu zuen [Bridges, 1964]. Beranduago, kriptoaia eta xenoa ingurunetzat zituzten laserrak eraiki zituen Bridgesek.

Gasezko laserrez gain, erreakzio kimikoetan oinarritutako laserren bila aritu ziren zientzialariak. Besteak beste, Polanyik zera baieztatu zuen 1960an: erreakzio kimikoetan, molekulek uhin infragorriak igor zitzaizkela [Polanyi, 1961]. Baieztapen hori oinarritzat hartuz, Polanyiren lanaren lekukoa hartu zuen Kasperren eta Pimentelen taldeak 1965ean. Hidrogenoaren eta kloroaren arteko erreakzioa flash-lanpara baten kitzikapenaren bidez eraginez, 3700 nm inguruko uhinak igor zitzaizkiren hidrogeno kloruro molekula lortu zituen [Kasper, 1965].

Ikerkuntzak ez zuen etenik, eta metalen lurrunean oinarrituriko ikerketak ere burutu ziren. Germanioa, eztainua, beruna, indioa, kadmioa edo zinka bezalako materialak labe berezietan sartuz, eta gas eroale gisa helioa edo neoia erabiliz, saiakuntzak egin zituzten Silfvastek eta bere taldeak. Kadmioak eta zinkak portaera ona erakutsi zuten, eta emaitza horietan oinarrituz, argi ikusgaiaren espektroaren barnean igortzen zuen mota honetako lehen laserra sortu zuten [Silfvast, 1966]. Hortik gutxira, prozesuen efizientzia handitzea lortu zuten, kadmioaren 441,6 nm-ko uhin-luzera bereizgarri eta ikusgaia era jarraian igor zezakeen helio-kadmio laserra eraikiz [Silfvast, 1968].

Beste urrats baten bila, soluzio likidoan koloratzaile organikoa ingurunetzat erabiltzen zituzten laserrak diseinatu zituzten Sorokinek eta Lankardek. Ordurako, hipotesiak planteaturik zeuden, eta argi koherentea sortzeko, molekula organikoen lumineszentzia erabiltzeaz espekulatzeko zebiltzan hainbat ikerlari, Brock, Morantz edo Rautian tarteko. Azken hauek laser organikoak buruzko lehen aipamenak egin zituzten eta ondorengo saiakuntzek uzta eman zuten. Sorokin eta Lankard, bogan zegoen errubiarekin probak egiten ari zirela, koloratzailea sartu zuten laserraren barrunbean eta errubiak igorritako izpiekin eszitzatu zuten, material organikoaren argazki kitzikatua lortuz. Horren ostean, flash-lanpara bidez egindako ikerketak burutu zituzten, ondorio lez hurrengo adieraziz: koloratzaileko laserrak baliagarriak zirela lur arraro solidoen ioien ikerketa optikoa egiteko, erreakzio kimiko gaseosoen portaera eta dinamika ulertzeko eta absortzio kuantikoa aztertzeko, azken honek errubizko laser baten segidan kokatu behar zuelarik [Sorokin, 1968].

70eko hamarkadan sarturik, Alferovek diodoen inguruko ikerlana aurrera eraman zuen. Bi erdieroale ezberdinen arteko junturak eskaintzen dituen propietatez baliatuz, alegia, aluminio arseniuro eta galio arseniuroaren lotura heterogeneoak, diodozko laserren arloan urrats garrantzitsua ezarri zuen. Ordura arte beharrezkoa zen atalase-korrontea jaitea lortu zuen 1970ean Alferovek mota honetako diodoak giro-tenperaturan erabiliz [Alferov, 1971].

John Madey fisikariak, ordea, elektroiek igor dezaketen erradiazioa aztertu zuen, eta 1971n lehen elektroizko laserra sortu zuen. Egitura magnetiko batean zehar elektroiak azkar mugiaraziz, azken hauek era koherentean igor zitezkeela frogatu zuen. Sorgailu eta aplikadoreak erregulatzeko aukera baliatuz eta beraiek eman zezaketen irabazia kontuan harturik, uhin infragorrietatik abiatuz uhin ultramoreak igortzeko gai zen sistema asmatu zuen [Madey, 1971].

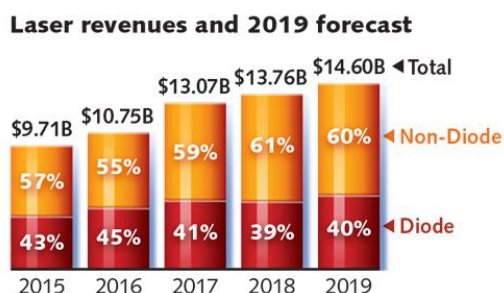
Era berean, gas nobleen igorpen estimulatua inguruan Basovek egindako ikerketak lau energia-mailako sistemaren garapena izan zuen emaitza modura. Elektroizko (*electron beam*) bidezko kitzikapena erabiliz, xeno likidoaren erradiazio ultramorea susta zitezkeela frogatu zuen,

176 nm inguruko uhinak lortuz. Laser mota berri horri *excimer* deitu zioten (*exciter dimer* hitzen elkarketatik eratorria), eszitatutako dimeroetan baitzuen oinarria teknika honek [Basov, 1970]. *Excimer* motako laserrek ospea hartu zuten eta ondorioz beraien inguruko ikerkuntzak ugari ziren. Horren adibide gisa Ewing aurki dezakegu, zeinek 1975ean gas geldodun lehen *excimerra* sortu zuen, kloro eta fluor haluroekin uztartuz. Zehazki, xeno kloruroa (XeCl) eta kriptoi fluoruroa (KrF) elektro-sorta bidez kitzikatu eta 308 nm eta 248 nm-ko uhin-luzerak lortu zituen, hurrenez hurren. Kasu bietan, argoia erabili zuen Ewingek nahasketek arrakasta izateko. Horretarako, nahasketa horiek izan behar zuten proportzioak berebiziko garrantzia zuela azpimarratu zuen, *excimer* mota hauen oinarri kimikoa agerian utziz. Ehunekotan, hauek izan ziren erabilitako kantitateak: % 89,9 Ar, % 10 Xe eta % 0,1 Cl₂; % 98,9 Ar, % 1 Kr eta % 0,1 F₂. Hala ere, lortutako efizientzia baxuek hurrengo baiezatzera eraman zuten: molekulen erlaxazio-denbora, hau da, kitzikaturiko energia-mailatik oinarriko energia-mailara bueltatzeko behar duten denbora, handiegia zela igorpen estimuluaren denborarekin alderatuz [Ewing, 1975]. Horregatik, xahututako kitzikapen horri berrerabilpena emateko asmoz, igorpen estimuluaren denbora-tartea murriztea proposatu zuen Ewingek hurrengo lanetan.

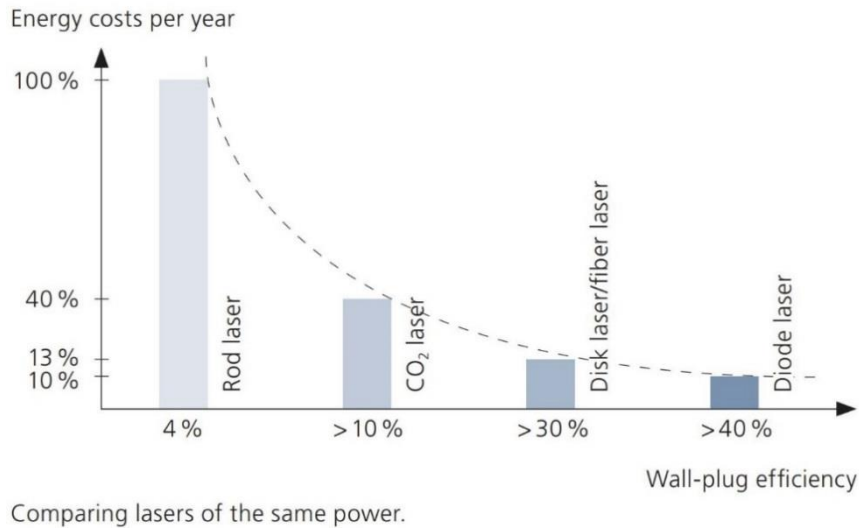
Azkenik, X izpien eremuan igortzeko ikerkuntzan murgildu ziren Jacoby eta Pert Erresuma Batuko Hull Unibertsitatean. 1981ean 18,2 nm-ko uhin koherenteak lortu zituzten, 2 eta 4,6 μm arteko karbono zuntzak neodimioz dopatutako kristalezko laser pultsatu baten bidez berotuz eta prozesuaren irabazia boskoiztuz. Irabazi hau laserrak emandako energiarekin zuzenki lotuta zegoela ondorioztatu zuten, eta modu honetan, egoera negatibo batetik (xurgapena) positibora (igorpena) igarotzea posible zela frogatu zuten, X izpiak igortzeko modu bat asmatuz [Jacoby, 1981]. Era berean, X izpien sorreraren inguruan lanean jarraitu zuten hainbat ikerlarik, eta, adibidez, Matthewsek 20 nm-ko uhin-luzeren inguruan amplifikazio nabarmenak lortu zituen. Horretarako, Seleniozko 75 nm-ko geruza 150 nm-ko *formvar* motako erretxina termoplastikoaren gainean jarri zuen eta 532 nm-ko uhin berdearekin kitzikatuz, aipatutako X izpiak lor zitezkeela frogatu zuen [Matthews, 1985].

90eko hamarkadatik aurrera, laserrak hazkunde garrantzitsua izan zuen, ekoizpena urteko % 20-25 haziz. Industria arlo ezberdinetan finkatzen joan zen, laser-ekarpena, tenplaketa edota lagunduriko prozesuak hedatuz.

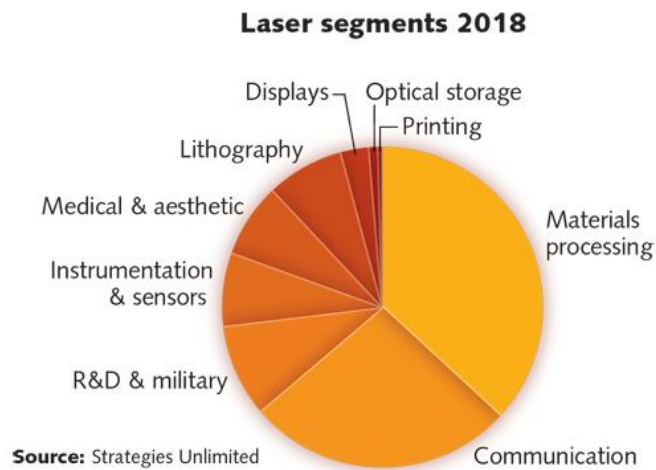
Egun, laserra berez industria bat da eta Txinak munduko laserren % 40 kontsumitzen du. 2018an laserraren industriak 13,5 mila milioi dolarreko balio globala izan zuen, 2017ko emaitzekin alderatuz % 5,3 haziz. Garai berean materialen prozesatzerako erabiltzen diren kilowattetako laserrek % 4,8ko hazkundea izan zuten, eta sentsoreetarako erabilitakoak % 28,9koa. Azken hau da laserren ekoizpenaren iturri nagusia egungo merkatuan.



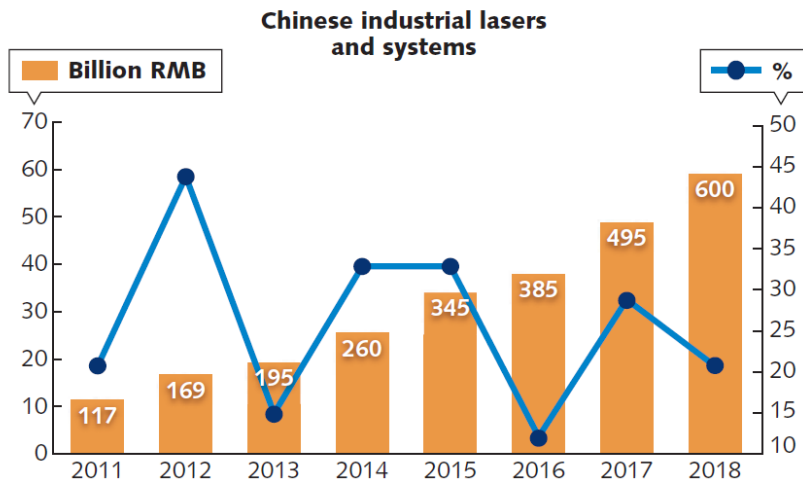
Irudia II.7: Laserraren industriaren diru-sarrerak eta 2019ko iragarpena [Strategies Unlimited, 2019]



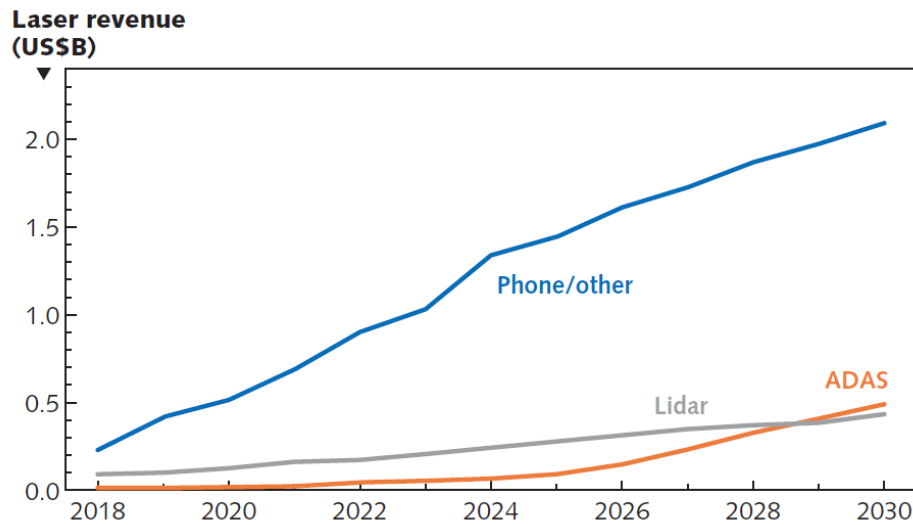
Irudia II.8: Laser mota ezberdinen urteko energia-kostua eta eraginkortasun-energetikoa [Trumpf, 2018]



Irudia II.9: Laserraren industriaren banaketa [Strategies Unlimited, 2019]



Irudia II.10: Txinako laser industrialen eta sistemen kostua [Strategies Unlimited, 2019]



Irudia II.11: Sentsoreen diru-sarrerak [Strategies Unlimited, 2019]

Oro har, 2018an medikuntza arlora bideratutako laserrek hazkunde garrantzitsua izan zuten, odontologia eta kosmetika arloetarako ekoiztutako laserrak % 13 hazi baitziren, eta 2019rako beste % 9 aurreikusita dago. Materialen prozesatzeari dagokionez, 2017arekin erkatuz, non % 48,6ko hazkundea lortu zen, 2018an % 3,7koa izan zen.

Etengabeko hazkundea duen industria da laserrarena, material eta produktu berriak lantzeko oraina eta etorkizuna.

II.4. LASER MOTAK

Laserrak argi koherentea lortzeko erabilitako ingurune aktibo ezberdinen arabera sailkatzen dira. Horien artean, gas egoerakoak, egoera solidokoak, koloratzailekoak edota elektroizkoak laserrak bereiz daitezke. Mota bakoitzak efizientzia kuantiko eta elektriko ezberdinak dauzka eta uhin-luzera kitzikaturiko ingurunearen materialaren menpe dago. Material bakoitzak xurgapen-maila ezberdina dauka, igorritako uhin-luzerarekin lotura zuzena duelarik. Beraz, laserra aukeratzeko orduan, parametro honek garrantzi gorena izango du.

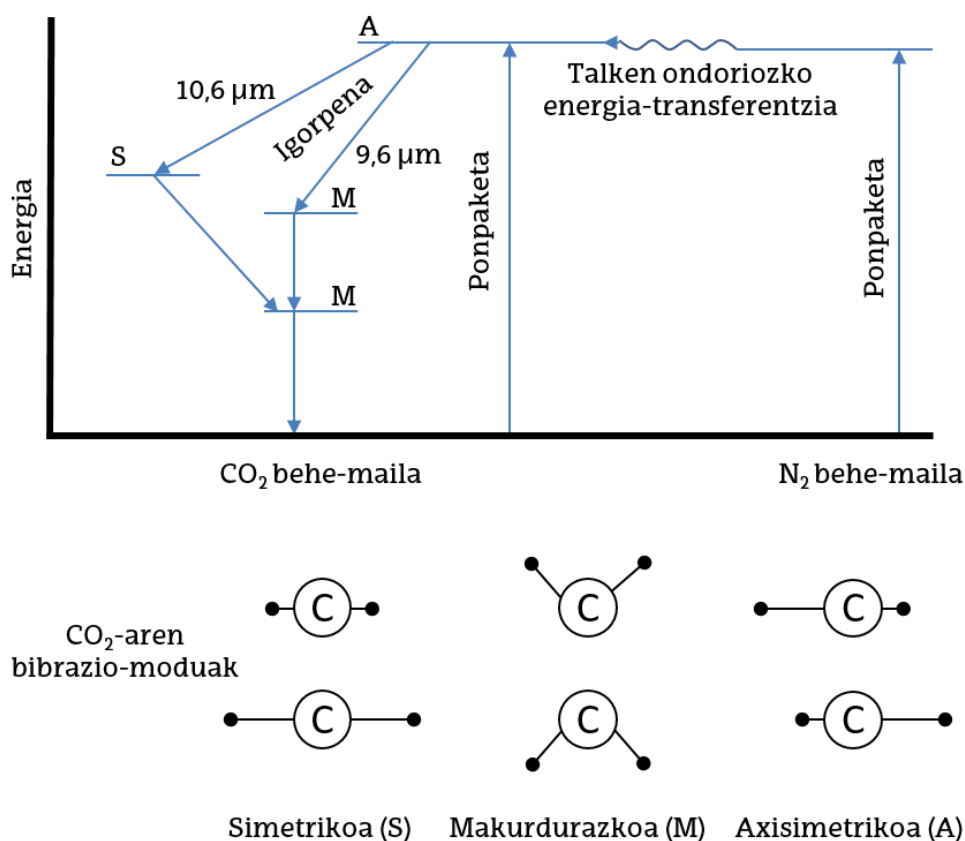
II.4.1. Gasezko laserrak

II.4.1.1. Karbono dioxidozko laserra

CO₂ molekulek hainbat energia-egoera ezberdin izan ditzakete, baina beraien lortzea energia-maila zehatz bat lortzearen arabera izango da. Hau da, atomoek energia-maila egokia lortu ezean, ezin izango da energia-egoera jakin bat erdietsi.

Bilatu nahi den kitzikapena helburutzat hartuz, karbono dioxido gasa helio (He) eta nitrogenoarekin (N₂) nahasten da. Berezko igorpena gertatzen denean, karbono dioxido

molekulak bibrazio eta errotazio mugimenduak pairatzen ditu, hiru bibrazio modu nagusi agertuz: simetrikoa, makurdurazkoa eta axisimetrikoa. Kitzikaturiko CO₂ molekula goi energia-mailan aurkitzen denean, asimetrikoki bibratzen du. Momentu honetan, talken edo berezko igorpenaren ondorioz, energia aska dezake, fotoi bat igorri eta bere azpiko energia-maila batera mugituz, modu simetrikotan bibratuz. Fotoi horrek 10,6 μm-ko uhin-luzera eta ausazko norabidea izango ditu, ez baita estimulatutako igorpenik gertatu. Hori bai, gerta daiteke fotoiak jada kitzikaturiko molekula baten aurka jotzea, fotoi berri bat igorri, zeinek, orain bai, fotoi erasotzailearen norabide eta uhin-luzera berdina izango dituen. Aldiz, askatutako fotoiak beheko energia-mailako molekula bat kitzikatzeko erabil dezake bere energia. Erresonadore baten lana irudikatuz eta prozesu hau errepikatuz gero, energia-mailaren populazioa alderantzikatzen joango da. Gauzak horrela, igorpen estimulatua bideratzeko gai izango da sistema, ordurako absortzio egoera gainditurik.



Irudia II.12: Karbono dioxidoaren bibrazio-moduak

Horretarako, N₂ molekulak propietate egokiak aurkezten ditu CO₂ gasa kitzikatzeko. Lehenaren bibrazioaren maiztasuna tenperatura baxuan dagoen dioxidoak goiko energia-mailan (modu asimetrikotan) eszitaturik egoteko behar duenaren oso antzekoa da, beraz, beraien arteko talka bortxaz eragiten da. Era berean, nitrogenoaren garraiatze egokia bermatzeko He gasa erabiltzen da. Patelek frogatu zuen lez [Patel, 1965], N₂ molekula elektrikoki eszitatuta eta CO₂-aren aurka jaurtiz gero, % 15 eta % 20 bitarteko eraginkortasuna izango duen igorpen estimulatutako laserra lor zitekeen. Dioxido hotzak soilik balio zuela ere frogatu zuen, aipatutako efizientzia gasen tenperaturaren menpe dagoelarik. Ehunekotan, hurrengo proportzioak ezarri zituen karbono

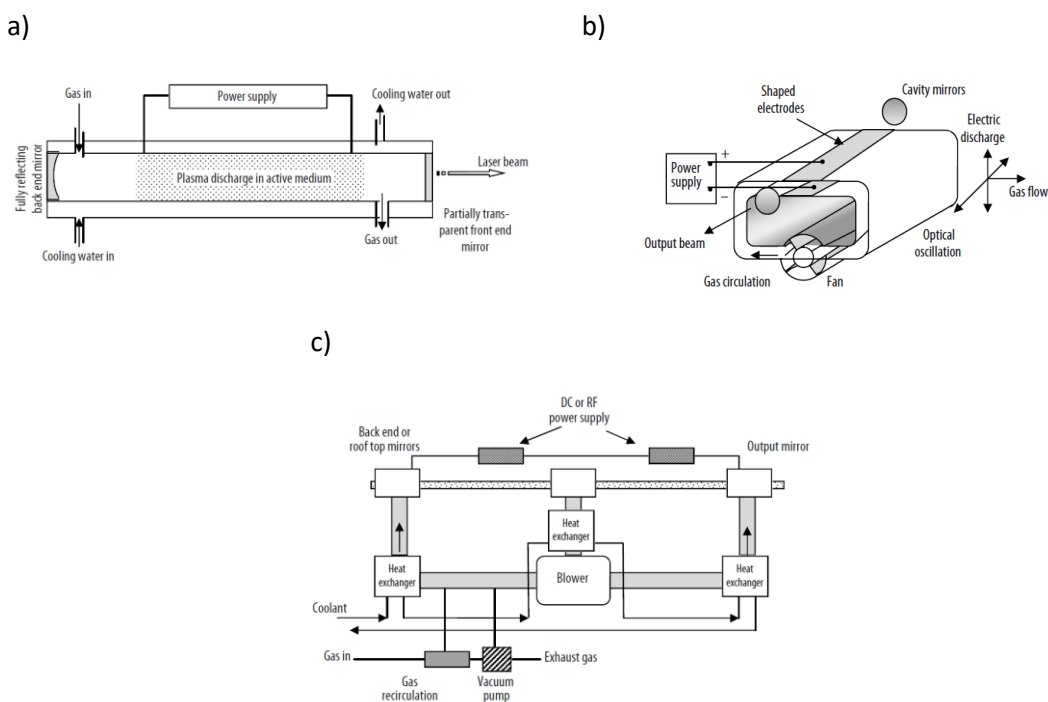
dioxidozko laserrentzat: % 78 He (eroapena bermatzeko), % 13 N₂ (talkak eragiteko) eta % 10 CO₂ (laser-argia igortzeko).

Laser mota honen argi-sorta ezin da zuntz optikoen bidez bideratu, CO₂-ko laserrek igorritako 10,6 μm-ko uhin-luzerarako zuntz optikoa opakua baita eta ispilu optikoen sistema eraikitzeko beharra dute. Horrez gain, uhin-luzera horretarako material metalikoen absortzio-indizea oso baxua da, horrek laser-potentzia altuen erabilera behartzen duelarik. CO₂-ko laserren baitan ondorengo motak bereiz daitezke:

Slab: gasa hoztutako bi elektrodo lauen artean aurkitzen da, sortutako gehiegizko beroa xurga dezaten. Beraz, betebeharrak bikoitza dute elektrodoek: batetik, hozte-sistema lez aritzen dira; bestetik, ingurune aktiboa kitzikatzeko erabiltzen dira. Teknologia honen bitartez, gehienez 8 kW lor daitezke [Rofin, 2019].

Zigilatutakoa: erresonadorea guztiz zigilatuta dago, beraz, makina CO₂ gazez hornitzeko, ez du ekipamendu laguntzailerik behar eta bere gas-galerak ia nuluak dira. Potentzia baxuko laserrak diren arren (600 W) [Rofin webgunea], egokiak dira robotekin batera lan egiteko, beraien pisu txikiak zuzenean robotaren beso gainean muntaketa ahalbidetzen baitu.

Fluxuzkoa: erresonadorea gazez etengabe hornitzen da, era erradial edo axialean, ingurune aktiboa berriztuz. Teknologia hau da CO₂-ko laserretan potentzia handienak eskuratzea ahalbidetzen duena eta 25 kW-eko potentziak lor daitezke [Steen, 2010]. Hala ere, barrunbean zehar gasa mugiarazteko instalazio berezi baten premia dute, diseinua eta mantenua zailduz. Gasak hozteko era ezberdinetako laser-makinaria erabiltzen da, bakoitzak hozte-sistema berezi bat duelarik. Fluxu geldoko laserretan (<20 l·min⁻¹) barrunbearen hormekiko kondukzioz hozten da. Fluxu azkarreko eta zeharkako fluxuzko laserretan, aldiz, konbekzioz hozten da gasa.

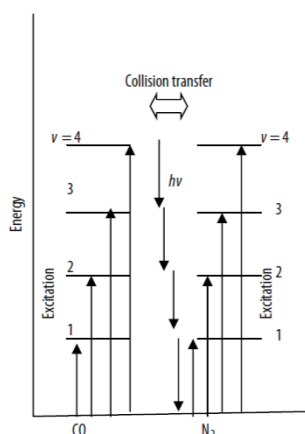


Irudia II.13: a) Fluxu geldoko laserra b) Zeharkako fluxuzko laserra c) Fluxu azkarreko eta zeharkako laserra [Steen, 2010]

II.4.1.2. Karbono monoxidozko laserra

Karbono dioxidozko laserren antzerako egitura dauka karbono monoxidozko (CO) laserraren makineriak. Azken hauen efizientzia dioxidozkoen bikoitza izan arren, hozte-sistema konplexuagoaren beharrezana dute. Laneko baldintza onenak 150 K inguruan ematen dira, hau da, nitrogenoa egoera likidoan aurkitzen denean, beraz, potentzia gehigarriaren beharra dauka hozte-sistema hornitzeko eta baldintza hori bete ahal izateko. Hozterako potentzia gehitzean, prozesuaren guztirako efizientzia % 19tik % 8ra jaisten da. Nolanahi ere, ingurune aktiboaren hozketa hobetu eta efizientzia-galera hau murrizteko helburuarekin xenoia gehitzen zaio gasen nahasketari.

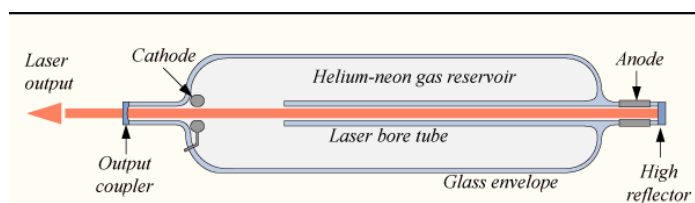
Laser hauek medikuntzan erabiltzeko aproposak dira. Izan ere, igortzen duten argiak 5,4 μm -ko uhin-luzera dauka eta urak uhin-luzera hori ondo xurgatzen duenez, medikuntza arloan hedaturik daude. Hala ere, igorritako sortaren potentzia tenperaturekiko oso sentikorra da eta alde hau erregulatzeak makineriaren kostu gehigarria dakar.



Irudia II.14: Karbono monoxido eta nitrogeno molekulen energia-mailak

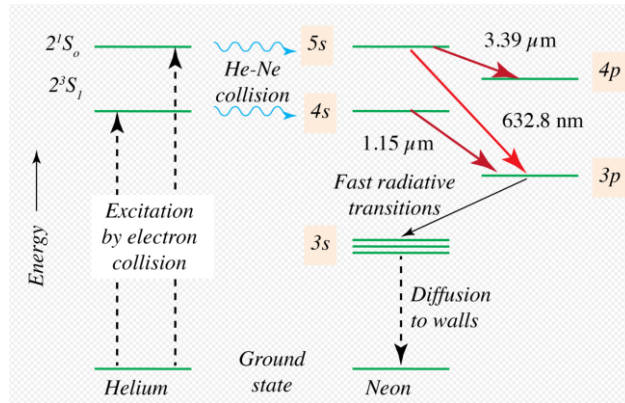
II.4.1.3. Helio-Neoizko laserra

Helioz eta neoiz osaturiko gas-nahasketa deskarga elektrikoaren bidez kitzikatuz, laser hauek 633 nm-ko uhin-luzerako argi-izpia lortzen da. Hau da, eremu ikusgai gorrian lan egin dezakete laser hauek.



Irudia II.15: Helio-neoizko laserraren eskema

Laser hauen kostu txikiari eta argi ikusgaiari esker, laborategietan aplikazio ezberdinetarako erabiltzen dira. Beraien funtzionamendua oso sinplea da, elektroiek helio atomoekin talka egin eta energia-maila altuago batera igoazten dituzte eta, era berean, hauek neoizkoak kitzikatzen dituzte. Neoi hutsezko ingurune aktiboa, helio barik, askoz ere zailagoa da argiaren amplifikazio bidezko erradiazioaren igorpen estimulatua lortzea.



Irudia II.16: Helioaren eta neoiaeren energia-mailak eta uhin luzerak

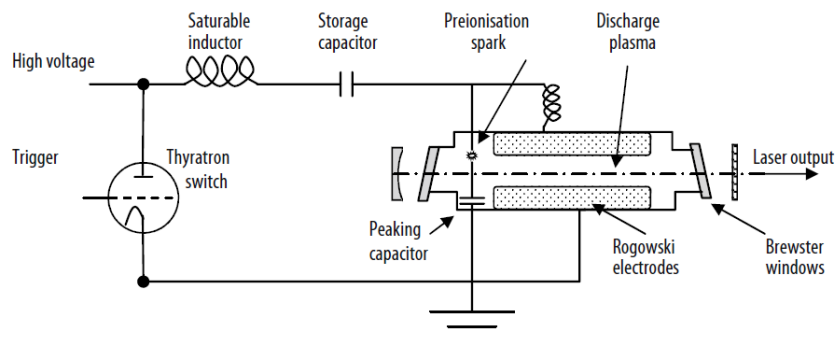
II.4.2. Excimer laserra

Excimer izena dimeroen molekulak eszitatetik dator (*excited dimer molecules*). Laser mota hauetan, haluroak gas nobleekin nahastu eta lehenengo molekula horiek elektrikoki kitzikatuz, uhin koherentea igortzea lortzen da. Halogeno nagusiak, kasu honetan, fluorra eta kloroa dira. Gas hauen nahasketa horrela banatu ohi da: 4 eta 5 mbar arteko gas halogenoa; 30 eta 500 mbar arteko kriptoia, xenioa edo radoia eta 4 eta 5 bar arteko neoia edo argoia. Era berean, halogenoaren hornitzea helioarekin nahastuz egiten da, azken hau % 5eko proportzioran sartuz.

Gas-nahastura	Uhin-luzera [nm]
F_2	158
ArF	193
KrCl	222
KrF	248
XeCl	308
XeF	354

Taula II.1: Gas-nahastura ezberdinen uhin-luzerak excimer laserretan [Steen, 2010]

Excimer laserrek daukaten irabazia hain da handia, ezen ez dutela erresonadorearen beharrik beraien funtzioa bete ahal izateko. Laser hauen ezaugarri garrantzitsuenetakoa eremu ultramoreko igorpena da. Prozesuaren efizientzia hobetzeko, oszilazioa bortxatuko duen barrunbe bat kokatzen da. Excimer laserrek eman ditzaketen pultsuak oso laburrak dira, 20 ns ingurukoak, baina oso potentzia altukoak (35 MW inguru).

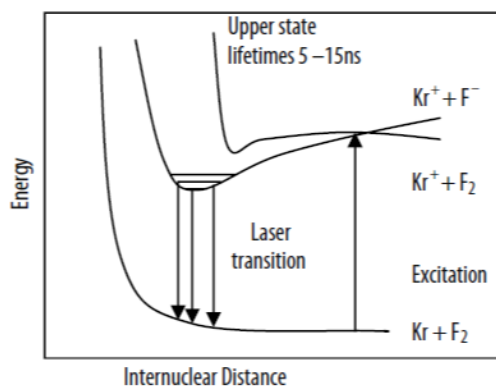


Irudia II.17: Excimer laserraren oinarrizko eskema [Steen, 2010]

Ez dutenez atzeraelikaduraren beharrik, laser hauetan argia anplifikatu ahal izateko berezko igorpena edo super-irradiantzia aprobetxatu egiten da. Bestalde, gas halogenoen korrosiotik babesteko, aluminioko geruza batekin estaltzen da barrunbearen atzealdeko ispilua, azken honek oso islatze-maila altua duelarik. Aitzitik, sortaren irteerako ispiluak % 8ko islatze-maila baino ez du izaten. Sistema optikoaren ispilu hauek silize, kaltzio fluoruro edo magnesio fluoruroz eginak daude.

Irteten den sortaren tamaina barrunbearen irekidurak ezartzen du eta optika berezien beharra dute excimer laserrek, lortutako laser-izpiek dibergentzia altua izaten baitute. Beste soluzio bat jatorrizko beste laser batekin kitzikatzea da, koherentzia hobetzeko asmoz. Lortu nahi den uhin-luzera sartutako gasa edo ispiluak aldatuz lor daiteke, baldin eta geruzadun ispiluak erabili badira.

Makinariaren mantenuak, gasen hornitzeak eta korrosioak eragindako hondatzeak excimer laserren prezioa altua izatea eragiten dute.



Irudia II.18: Excimer laserren igorpenen energia-mailak [Steen, 2010]

II.4.3. Egoera solidozko laserra

Mota honetako laserretan, ingurune aktiboa isolaturiko kristal dielektriko baten edo gasezko ganbera baten barnean kokatuta dago. Gasezko laserrekin konparatuz, kitzikaturiko egoerak gehiago irauten du, energia gehiago biltzeko aukera emanez eta, ondorioz, denbora tarte oso laburretan, hau da, pultsuetan, potentzia altuak eman ditzakete.

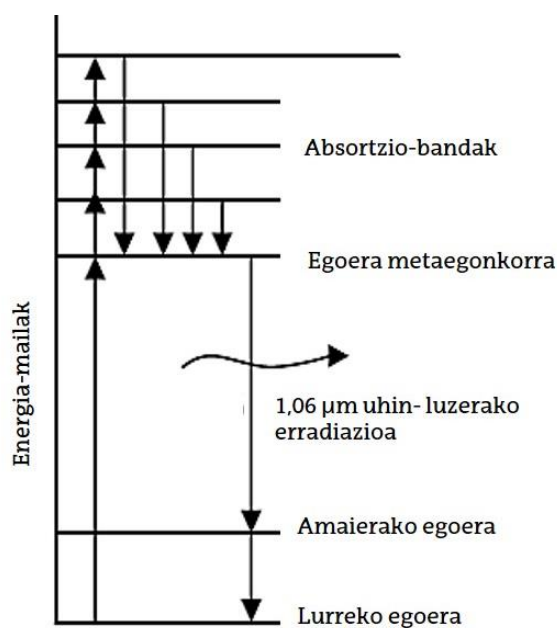
Ingurune aktiboa osatzen duten lur arraroetako ioiez dopaturiko kristalek energia-mailen arteko trantsizioak bermatzen dituzte, ondoriozko populazio alderantzikatzea gertatuz. Industrian erabiltzen diren egoera solidozko laserren ingurune aktibo ohikoenak hurrengoak dira: neodimioz, erbioz edo iterbioz dopaturiko itrio aluminio granatea (Nd^{3+} :YAG; Er^{3+} :YAG; Yb^{3+} :YAG; non YAG $Y_3Al_5O_{12}$ den), kromo eta korindoiz osaturiko errubia (Cr^{3+} : Al_2O_3) eta alexandrita (Cr^{3+} : $BeAl_2O_4$). Lur arraroen eramaile gisa, aipaturiko itrio aluminio granateaz gain, itrio litio fluoruroa (YLF), itrio aluminio perovskita (YAP, non perovskita $CaTiO_3$ den, hau da, kaltzio titanio trioxidoa), itrio vanadatoa (YVO_4) eta fosfato edo silizio kristala erabiltzen dira.

Propietatea	Errubia	Nd:glass	Nd:YAG (jarraia)	Nd:YAG (pultsatua)	Yb:zuntza	Er:zuntza
Uhin-luzera [μm]	0,694	1,06	1,06	1,06	1,03-1,1	1,5-1,6
Operazio- modoa	Jarraia		•			
	Pultsatua	•	•		•	•
	<i>Q-switch</i>			•		
Potentzia [W]	10-20		0,04-800	0,04-400	0,01- 20.000	0,01-500
Egonkortasuna [$\pm\%$]	1-5	1-5	1-5	1-5	1-2	1-2
Pultsu-energia [J-pultsu ⁻¹]	0,3-100	0,15-100		0,01-100		
Errepikatze-ratioa [pultsu-s ⁻¹]	0,01-4	0,1-1		0,05-300	10 ¹⁰	
Sortaren dibergentzia [mrad]	0,2-10	3-10	2-18	0,3-10		
Efizientzia elektrikoa [%]	0,1-0,5	1-5	0,1-2	0,1-2	0,1-2	12,5
Kostua [\$]	15.000- 70.000	8.000- 110.000	3.000- 90.000	3.500- 110.000		
Aplikazio egokienak						
	Ebaketa		•			
	Zulaketa	•	•	•		
	Markatzea			•		
	Soldadura			•	•	•
Estaltzea (<i>cladding</i>)						
	Aleatzea		•	•		
	Mikrosoldadura				•	•
	Bero-tratamendua		•			
	Garbiketa			•		

Taula II.2: Egoera solidozko laserren ezaugarriak

II.4.3.1. Nd:YAG

Ingurune aktibo lez $Y_3Al_5O_{12}$ erabiltzen dute Nd:YAG laserrek, hau da, itrio eta aluminio oxidoak dituzte oinarritzat, azken honek silikatoen familiako granatearen egitura kubikoa duelarik. Orduan, itrio aluminio granatea neodimioz dopatzen da, zegoen itrioaren % 1 ordeztuz eta Nd^{3+} ioiak egituran zehar sakabanatuz. Sortutako ingurunea barra barrunbe eliptiko baten kokatzen da, hozte-sistemak bai flash-lanpara kitzikatzaila, bai barra bera inguratzen dituelarik. Eraginkortasun kuantikoari dagokionez, alegia, energia-maila ezberdinetara trantsizioa gauzatzeko eman beharreko energia eta energia-hazkuntzaren arteko erlazioa, % 30 eta % 50 arteko efizientzia dauka, eta igorpen estimulatatu bidez lorturiko uhinek $1,06 \mu\text{m}$ -ko luzera dute.



Irudia II.19: Neodimioaren energia-mailak

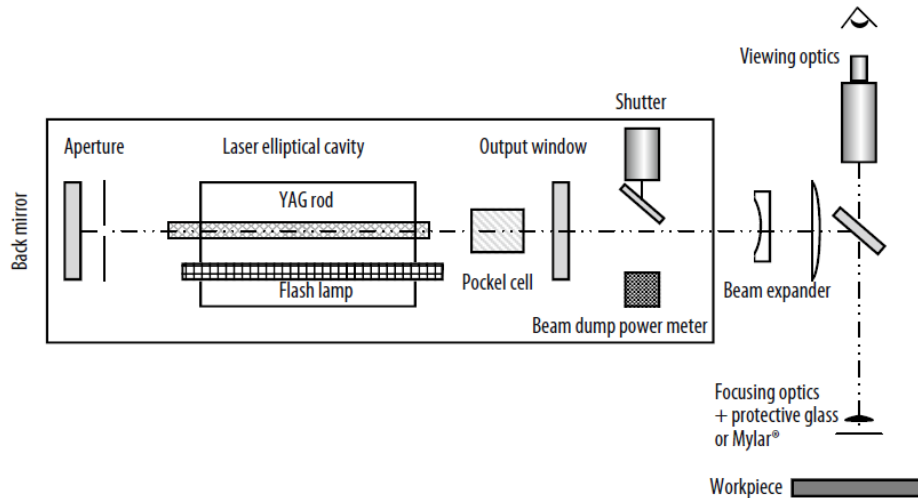
Kriptoizko flash-lanparen kitzikapenaren bidez % 2ko efizientzia totala baino ez dute lortzen Nd:YAG laserrek, metodo honekin eszitatutako ioi kopurua baxua baita. Horregatik, barrak igorpen estimulatua sortu ahal izateko, energia kantitate handia behar du. Baina honek arazoak ekar ditzake, hozte kaxkarraren ondorioz kristala hautsi daiteke eta. Hortaz, argi-sortaren distortsioa edo apurketa ekiditeko gehienez 400 W jasan dezake barrak 100 mm luzeko.

Neodimioa modu eraginkorragoan kitzikatzeko, potentzia-anplifikadoreak edota zuntzen bidezko sorten konbinaketa optikoa diseinatzen dira. Beste batzuetan, neodimioa zuzenean diodozko laserren bidez eszitatzen da (diodoek lanparek baino hamar aldiz gehiago irauten dute eta eraginkortasun handiagoa dute), absortzio-mailarik altuena ponpatutako 809 nm-ko uhin luzerekin lortzen delarik. Horrela, % 2tik % 8-10era arte igoarazten da efizientzia totala.

Lur arraroekin dopaturiko kristalekin beste aldaera batzuk daude, kasuan kasu igorritako uhin-luzera ezberdina lortzen delarik. Adibidez, neodimioz dopaturiko itrio vanadatoak Nd:YAG bezala igortzen du ($1,06 \mu\text{m}$). Aldiz, iterbioz dopatutako itrio aluminio granatearen uhina (Yb:YAG) $1,03 \mu\text{m}$ -koa da eta erbioz dopatutakoak (Er:YAG) $1,54 \mu\text{m}$ -ko uhina igortzen du.

Muntaketari dagokionez, barra eusten duen barrunbea urrezko geruza duten metalez edo zeramikaz eginga egon daiteke. Azken hauek, zeramikoek, argitasun uniformeagoa helarazten

diote barrari. Kriptoi-lanparen ondoren, *Q-switch* motako gailuak jartzen dira (modu oso azkarrean mugitzen diren kommutadoreak, 50 kHz arte) laserraren argi-sorta era kontrolatu eta koherente batean eraikitzeko. Honi esker, potentzia biderkatzeko gai da sistema, vatio batzuetatik kilovatio asko izatera helduz.



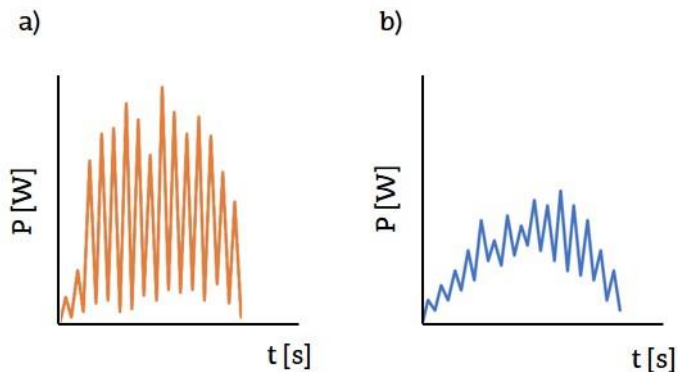
Irudia II.20: Nd:YAG laserraren oinarritzko eskema [Steen, 2010]

Era berean, potentzia baxuko Nd:YAG laserretatik datorren izpia beste kristal batetik pasaraiz (bario boratozkoa edo litio niobatozkoa, adibidez) uhin-luzera erdira arte jaisten da, 530 nm gutxi gora behera. Lerrotatutako kristal hauek fotoiak xurgatu eta % 30eko efizientziako argia igor dezakete. Berriz errepikatuz gero, argi ultramorea lortzen da, excimer laserrak legez. Hortaz gain, efizientzia hobetzeko asmoz, kristalen geometria ere alda daiteke.

Era pulsatuan, 400 W-eko potentzia eman dezakete Nd:YAG laserrek. Era jarraituan, ordea, 800 W arte igorri ahal dute.

II.4.3.2. Nd:kristala

Laser hauetako Nd^{3+} ioiaren energia-diagrama YAG oinarria zutenaren antzekoa da, baina energiaren alderantzikatzea hobea da kristalezko hauetan. Hala ere, kristalen eroankortasun baxua dela eta, hoztearekin arazoak dituzte eta gehienez 1 Hz-ko maiztasunean lan egin dezakete sortaren gehiegizko dibergentzia saihesteko. Hortik gorako maiztasunekin ezinezkoa da materialak prozesatzea, laserraren fokoa egokitzeko zailtasunak agertzen baitira.



Irudia II.21: Nd:glass laserren pultsuen itxura (a) eta Nd:YAG laserrena

Neodimioz dopaturiko laserrek absortzio-maila oso baxua erakusten dute, galdutako energia bero-energian bihurtuz. Energia honek distortsioak sor ditzake kristalean eta beronen hondatzea ere ekar dezake. Sortaren propagazio-faktorea (M^2 , ikus II.5) 15 eta 100 artean aurkitzen da, kalitate ona izatetik urrun. Gainera, diodoekin alderatuz, lanparen iraupena laburra da.

Hortaz, aipatu berri den arazoa saihesteko, diodoak erabiltzen dira iturri kitzikatzaille bezala. Horrela, prozesuaren eraginkortasuna igotzea eta sortaren kalitatea handitzea lortzen da, M^2 faktorea unitatera hurbilduz.

II.4.3.3. Erdieroalezko laserra

Diodoetako p-n lotura erdieroalearen igorpena aprobetxatzean oinarritzen da. Beraz, diodoa bera zuzenean laser-iturri bezala erabili daiteke, uhin-luzera anitzak lortuz kitzikaturiko materialaren arabera. Adibidez, galio arseniuroak (GaAs) edo galio aluminio arseniuroak (GaAlAs) 750 eta 870 nm artean igortzen dute eta indio galio arseniuroak (InGaAs), berriz, 900 eta 1000 nm artean.

Fluxu elektriko baten eraginpean elektroiek diodoaren eroapen-bandatik balentzia-bandara jauzi egitean (hau da, Fermi izena duen energia-maila betegarri batera igarotzean) energia askatzen dute. Lan egiteko era LED diodoen antzekoa da, baina laser diodoen kasuan argi koherente bat lortzeko diseinatzen da beraien sistema. Trinkoak eta fidagarritasun altuko gailuak dira, efizientzia % 50 izatera helduz eta erabilera jarraituko egoeran 10 kW-eko potentzia maximoa eskainiz.

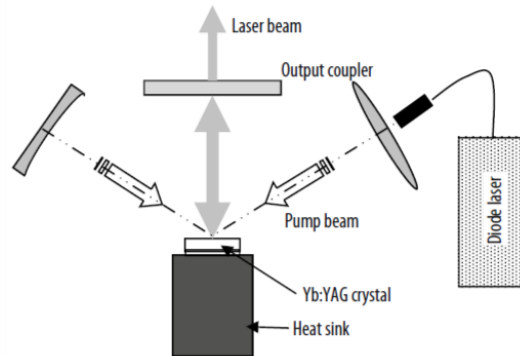
Materiala (Ingurune aktiboa/Estaltzea/Substratua)	Uhin-luzera [μm]
AlGaAs/AlGaAs/GaAs	0,7-0,9
GaInPAs/InP/InP	1,2-1,6
GaInP/AlGaInP/GaAs	0,66-0,69
AlGaAsSb//AlGaAsSb/GaSb	1,1-1,7
GaInN/AlGaIn/Zafiroa	0,38-0,45
PbSnTe/PbSnSeTe/PbTe	6-30
PbSSe/PbS/PbS	4-7
PbEuTe/PbEuTe/PbTe	3-6
ZnCdSe/ZnSSe/GaAs	0,5

Taula II.3: Erdieroalezko laser nagusienak eta beraien uhin-luzerak

Finean, energia elektrikoa baliatuz, diodoek energia optikoa sor dezakete. Aplikazioen artean, laser-erakusle gisa edo gailu elektronikoetako irakurketa lanetan erabiltzen dira laser diodoak, diskoen grabaketan edota laser-inprimagailuetan kasu. Era berean, materialen azalera berotu edota soldatzeko erabili daitezke., baita bestelako laserren ingurune aktiboak kitzikatzeko ere.

II.4.3.4. Diskozko laserra

Iterbioz dopatutako YAG kristala indio eta galio arseniurozko diodoen bidez kitzikatu egiten da laser hauetan. Kristal honek disko itxura du eta igorritako uhinaren luzera $1,03 \mu\text{m}$ -koa da, 500 W-etik gorako potentziak lortuz. Aldi berean, argi-sortaren kalitate altua eta hozte ona bermatzen dira.



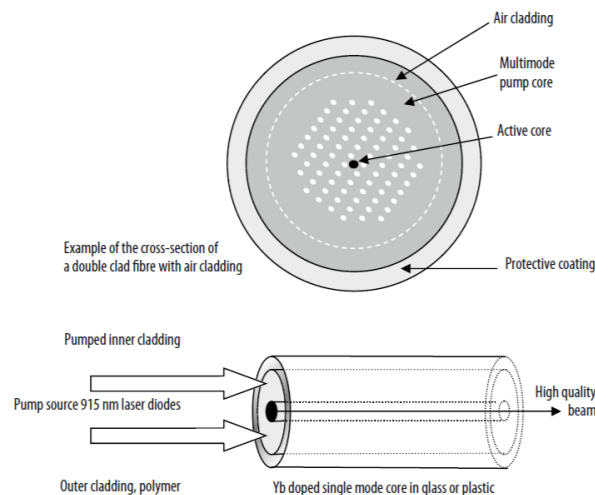
Irudia II.22: Diskozko laserraren oinarritzko eskema [Steen, 2010]

II.4.3.5. Zuntzezko laserra

Kasu honetan, zuntz optikoak lur arraroekin dopatu egiten dira eta normalean diodoen bidez ponpaketa optikoa burutzen da, zuntzak kitzikatzeko. Nd:YAG laserrek igortzen duten antzeko uhin-luzera ematen dute zuntzezkoek: $1,064 \mu\text{m}$.

Argi-sorta zuntzaren barnean sortzen da, laser hauen egonkortasuna bermatuz, beraien bizitza erabilgarria 100.000 ordu izatera hel daiteke eta. Efizientziari dagokionez, zuntzeko laserrek % 70-80 inguruko eraginkortasuna eskaintzen dute, jasotako energia argi-sorta igortzeko bideratzen delarik. Bestalde, zuntzak emandako energia oso azalera urrian kontzentratzen da, *spot* txikia baitu laser mota honek. Beraz, potentzia-dentsitate altua izateaz gain, mekanizatutako materialean beroak eragindako gunea txikia izatea bermatzen du.

Muntaketari dagokionez, laser mota hauen abantaila bat ispiluen gabezia da, ez da beharrezkoa hauek instalatzea laser-sorta bideratzeko, zuntza zuzenean foku-lentearekin lotzen baita.

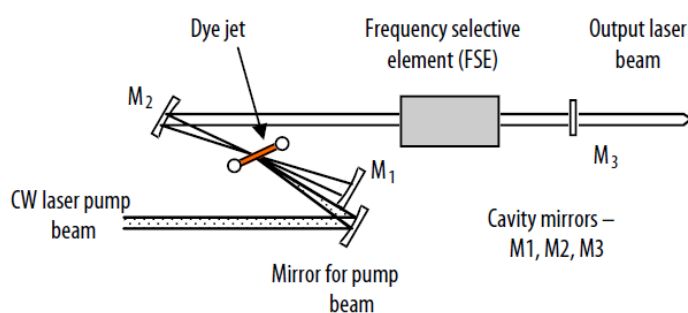


Irudia II.23: Zuntzezko laserraren oinarritzko eskema [Steen, 2010]

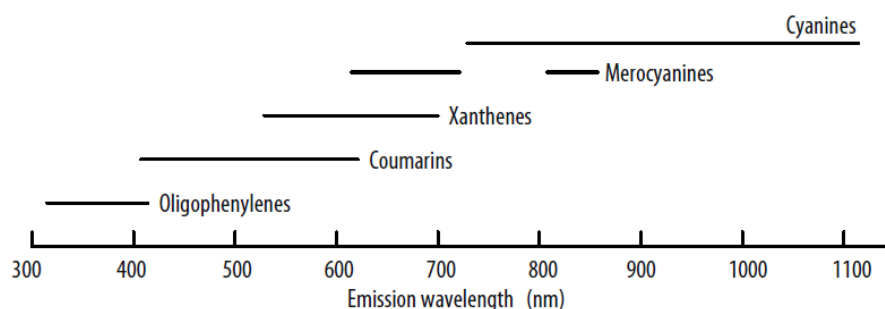
II.4.4. Koloratzailezko laserra

Koloratzailezko edo egoera likidozko laser hauetan, ingurune aktiboa den koloratzaile organikoa soluzio likidoan barneratzen da. Ingurune likidoa koloratzaile organiko batekin nahastuz, kolore ezberdinetako argiak igor ditzake koloratzailezko (edo egoera likidozko) deritzon laser honek. Femtosegunduetako pultsu ultralaburrak eskaintzeaz gain, eremu ultramore, ikusgai edo infragorrian lan egin dezakete (300 nm eta 1100 nm artean), kolore ezberdinetako argiak igorri. Horretarako, oxazina, estiriloa, kumarina edo xantenoaren deribatuak (fluoreszeina edo errodamina) erabiltzen dira, eta egun familia berriak sortzearen atzetik dabilta ikerlariak.

Era berean, barrunbeto ispiluak doitzuz eta likidoaren kontzentrazioa edo presioa aldatuz, ingurune berarekin uhin-luzera ezberdinak lor daitezke, orain arteko sintonizagarritasunik eza gaindituz. Isotopoen banatzean edota elikagaien koloretzatzean erabiliak dira. Beraien efizientzia energetiko maximoa % 30 izatera hel daiteke (errodamina koloratzailea erabiliz).



Irudia II.24: Koloratzailezko laserraren oinarriko eskema [Steen, 2010]

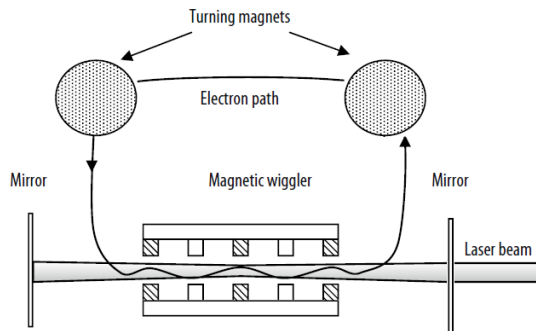


Irudia II.25: Koloratzailezko laser ezberdinen uhin-luzerak [Steen, 2010]

II.4.5. Elektroi askeko laserra

Laser mota hauek elektroiak era askean egitura elektromagnetiko batean zehar abiadura handiz higitzean oinarritzen dira, sinkrotroi efektua dela medio argia igortzeko gai direlarik. Efektu horren ondorioz, partikulak erradialki azeleratzean energia aska dezakete, argi lez kasu honetan. Helburua lortzeko, uztai itxurako egituran elektroiak magnetikoki kitzikatu egiten dira, beraien mugimendua bortxatuz eta argi-sorta koherentea sortuz.

Laser koloratzaileen moduan, elektroiei askeko laserrak (*Free Electron Laser - FEL*) doigarriak dira, eremu infragorritik ultramorera arteko uhin-luzerak emanaz. Biologian edota begietako ebakuntzetarako erabilgarriak dira laser mota hauek.



Irudia II.26: Elektroiei askeko laserraren oinarriko eskema [Steen, 2010]

II.4.6. Efizientzia eta aplikazioak

Mota	Uhin-luzera (μm)	Efizientzia kuantikoa (%)	Efizientzia elektrikoa (%)
CO ₂	10,6	45	12
CO	5,4	100	19
Nd:YAG	1,06	40	4
Nd:glass	1,06	40	2
Diodoz kitzikaturiko YAG	1,06	40	8-12
GaAs diodoa	0,75-0,87	≈80	50
GaP diodoa	0,54	≈80	50
KrF excimerra	0,248	≈80	0,5-2

Taula II.4: Laser industrialen efizientzia kuantikoa eta elektrikoa

Aplikazioa	Monokromatikoa	Dibergentzia txikia	Koherentzia	Potentzia altua	Modu simplea	Efizientzia	Mota
Argi indartsua		***		**			He-Ne, Ar
Lerrokatzea	*	***					He-Ne
Neurketa	***	**	***		*		He-Ne, Errubia, Nd:glass
Abiadura	***		***				He-Ne, Nd:glass
Holografia	***	**	***	**	***		Denak
Interferometria	***		***				He-Ne
Ikuskatzea	***		**	**			He-Ne, Errubia
Poluzioa antzematea	***		***	**			Koloratzailea, GaAs
Teknika analitikoak	***	**		*			Nd:YAG
Grabazioak	***	***			*		GaAs, GaAsP
Komunikazioak	***	***					He-Ne, I ₂ , GaAs
Bero-iturria	*	**		***	**	***	CO ₂ , Nd:YAG,
Medikuntza	***	***					Nd:glass, excimer
Inprimatzea	***	***		**			CO ₂ , errubia, Ar, excimer
Isotopoen banatzea	***		***	***			He-Ne, Ar
Fusio atomikoa	***	***		***			Koloratzailea, Ar, Cu
				***			CO ₂ , Nd:glass

* Propietate erabilgarria, ** Propietate garrantzitsua, *** Funtsezko propietatea

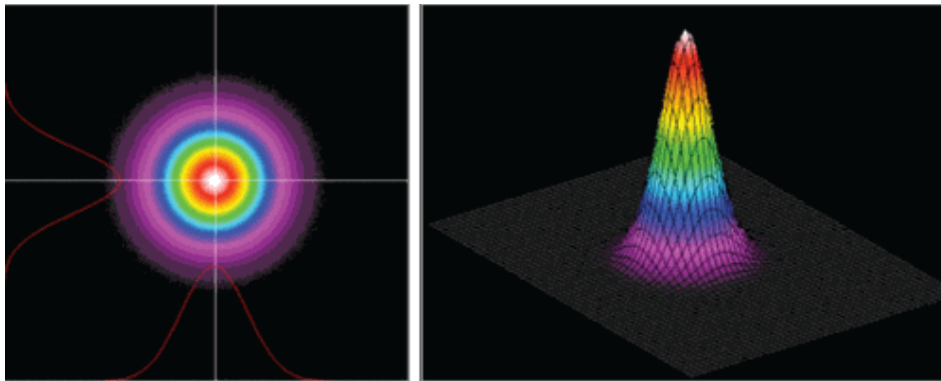
Taula II.5: Laser industrialen aplikazioak

II.5. LASER-SORTAREN KALITATEA

Laser batek igorritako energia kantitate handia puntu txiki batean eta distantzia luzean zehar kontzentra dezakeenean, laser-sorta horren kalitatea altua dela esaten da.

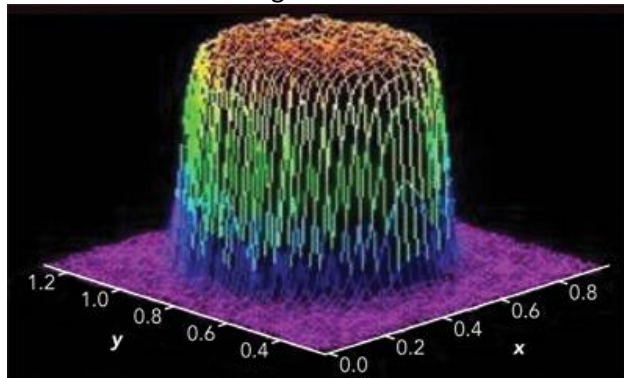
1. **Banaketa energetikoa.** Sortaren zeharkako itxura zehazten duen ezaugarria da. Itxuraren arabera, laserrak modu zehatz batean lan egiten duela esaten da. Horien artean:

1.1 **Modu gaussiarra (TEM₀₀):** modu honetan, energia-dentsitatea altuagoa da are eta zeharkako zirkuluaren zentrora hurbilduz gero. Gaussen kurbaren antza duelarik, horra hor bere izenaren jatorria.



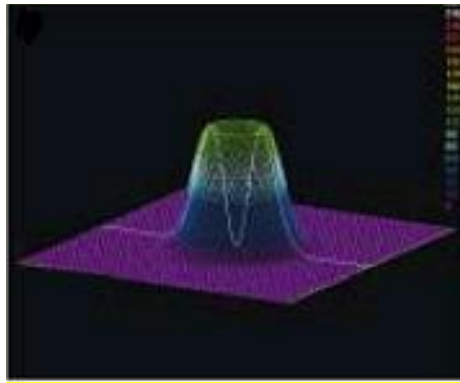
Irudia II.27: Modu gaussiarraren banaketa energetikoa

1.2 **Top-Hat modua:** kapel itxurako modu honek banaketa gaussiarra du ardatz baten norabidean, bestean banaketa errektangularra duelarik. Diodozko laserretan ohikoa da.



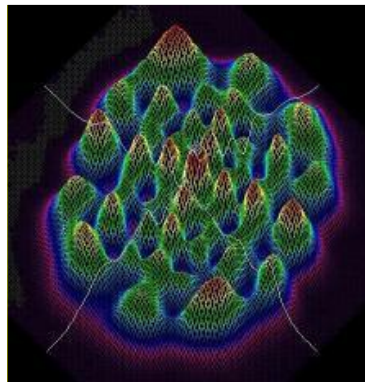
Irudia II.28: Top-Hat moduaren banaketa energetikoa

1.3 **Banaketa toroidala (TEM₀₁):** bere zeharkako sekzioa zirkularra da eta erdigunean hutsune bat dauka, toroide itxura ematen diolarik.



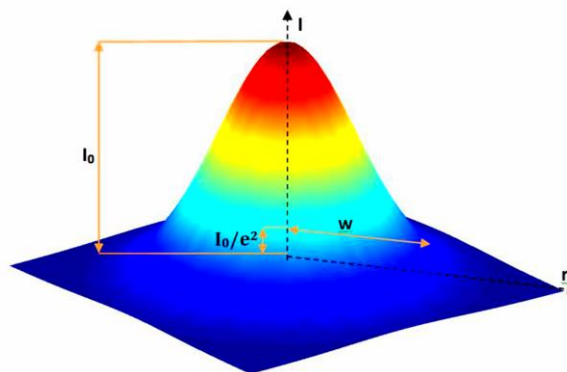
Irudia II.29: Banaketa energetiko toroidala

1.4 **Moduanitza edo multimodua (TEM_{xy}):** banaketa honetan aurreko moduen konbinazio baten ondorioz sortzen da energia banaketa.



Irudia II.30: Multimoduaren banaketa energetikoa

2. **Sortaren diametroa.** Laser motaren arabera, errazagoa edo zailagoa da diametroa neurtzea, zeharkako sekzioaren energia-banaketa erabakigarria baita diametroa zehaztasunen definitu ahal izateko. Modu gaussiarrean lan egiten duten laserrentzat, energia $1/e^2$ faktoreaz murriztu den eremua mugatzat hartu eta diametroa horraino heltzen dela definitzen da. Hau da, zentrotik aldentuz, sortaren energia maximoaren % 13,5 lortzen denean, diametroa horraino heltzen dela ezartzen da. Baina modu ez-gaussiarra erabiliz gero, zaila da diametroa definitzea. Horregatik, ISO arauak erabiltzen dira sortaren dimentsioa zein den erabakitzeke. Adibidez, ISO 11146 arauan diametroak sortak emandako energiaren % 86 barneratu behar duela adierazten da.

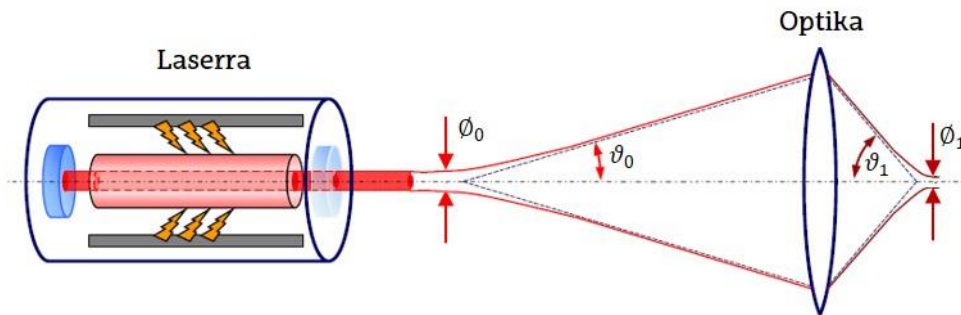


Irudia II.31: Laser-sortaren diametroa

3. **Dibergentzia.** Laserra hedatzen doan heinean nola zabaltzen den zehazten duen neurria da. Igorritako energia plano fokaletik aldendu ahala nola zabaltzen den adierazten du dibergentziak, bere adierazpen matematikoa sortaren diametroa ibilitako distantziarekiko deribatua delarik. Dibergentzia-angelu baten bidez neurtzen da parametro hau.

Beraz, laserraren kalitate altua bermatzeko, bai diametroak bai dibergentziak txikiak izan behar dute. Bi parametro hauen erlazioa ezartzeko, hurrengoak definitzen dira:

4. **Beam Parameter Product (BPP).** Laser-sorta fokalizaturik dagoen tokian, hau da, diametro txikiena duenean, diametro horren eta dibergentziaren erdiangeluaren arteko biderketa da. Sorgailu zehatz batentzat, erlazio hau konstante mantentzen da laserraren optikarekiko independenteki.



Irudia II.32: Laserraren eskema optikoa

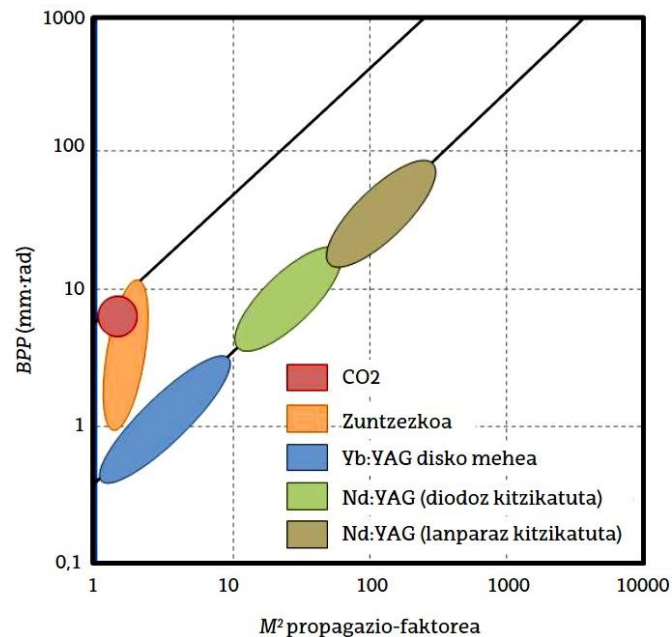
$$BPP = \phi_0 \cdot \vartheta_0 = \phi_1 \cdot \vartheta_1 \quad [6]$$

ϕ_0 eta ϑ_0 erresonadorearen irteeran dauden diametroa eta dibergentzia dira, hurrenez hurren, eta ϕ_1 eta ϑ_1 fokalizatutako gunekoak. Beraz, ondoriozta daiteke parametro honek kontuan hartzen duela laser-sortak ez duela puntu zehatz batean lan egiten, baizik eta diametro osoak eragiten duela piezaren gainean. Horregatik, *BPP*a laserraren kalitatea definitzeko parametririk erabiliena da, edozein laser motarentzat aplikagarria baita.

5. **Laserraren propagazio-faktorea (M^2).** *BPP* parametroa eta M^2 faktorea λ/π zatiketaren bitartez erlazionaturik daude, non azken hau sorta gaussiar baten difrakzio-limitea den.

$$M_2 = \frac{BPP}{\lambda/\pi} \quad [7]$$

M^2 faktoreak laser-sortaren kalitatea sorta gaussiar perfektuarekin alderatzen du ($M^2=1$). M^2 gero eta handiagoa izan, orduan eta kalitate txarragoa izango du sortak.



Irudia II.33: BPP eta M^2 parametroen grafika laser ezberdinetzat

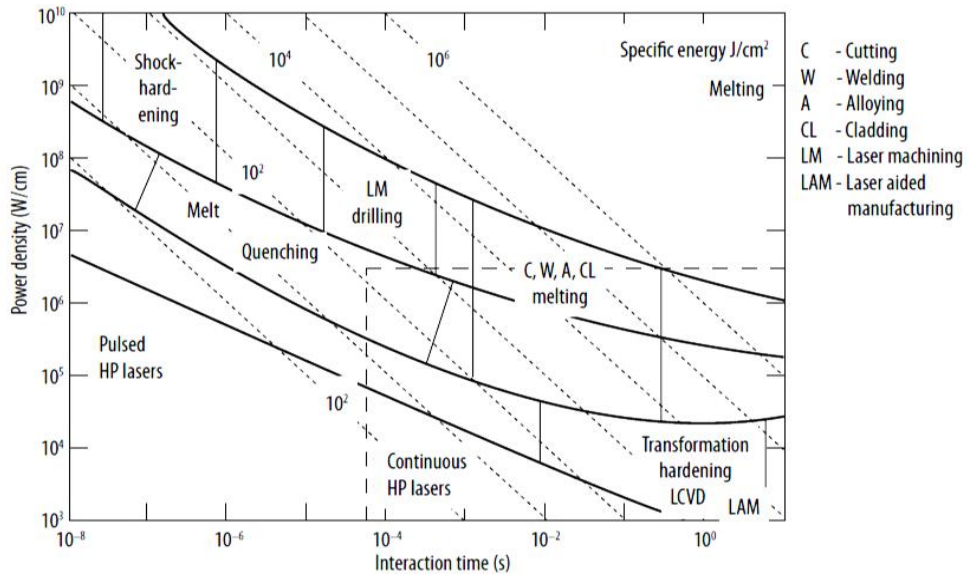
II.6. LASERRAREN OINARRIZKO PARAMETROAK

Piezen elkartzea burutzerako orduan, prozesuko sarrera-parametroek eragin zuzena izango dute emaitzan (potentzia, aitzinapen-abiadura edo jarraitu beharreko ibilbiderako estrategia). Era berean, erabilitako materialak (bai bere itxura eta bai konposizioa kontuan harturik), laser motak edo lortu nahi den emaitzak hasieran hautatu beharreko parametroak baldintzatuko dituzte. Gauzak horrela, laser bati erabilpen ezberdinak buru ditzan eska dakiok, besteak beste, materiala berotzea, urtea eta batzea (soldadura) edo lurruntzea. Hala ere, badaude doitu ezin daitezkeen beste parametro batzuk, laserraren fabrikazio motaren arabera inplizituki daudenak (BPP edo M^2 kasu).

Parametro garrantzitsuenen artean, hurrengoak zerrenda daitezke:

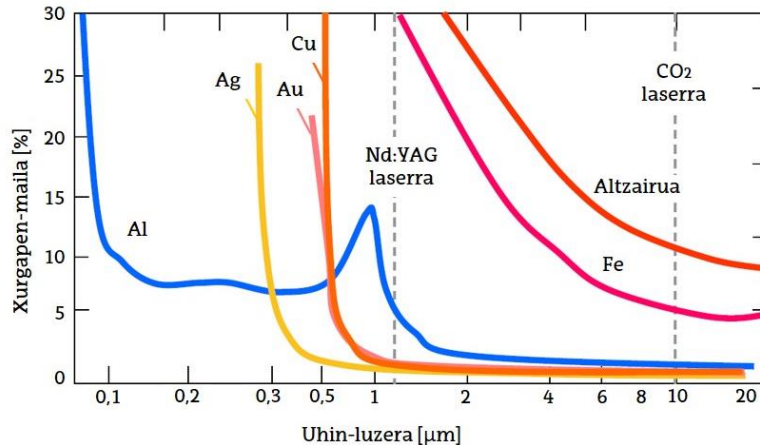
1. **Potentzia (P):** sortzaileak potentzia zehatz bat emateko gaitasuna du, maximoa igortzeko goi-muga duelarik. Sortan denbora unitateko dagoen energia erabilgarria adierazten du potentziak. Laser motaren arabera, potentzia era ezberdinetan bana daiteke, eta mW eta kW arteko baloreak sor ditzake. Adibidez, elektronikan erabilitakoek mW eskalan lan egiten dute. Arlo industrialean, ordea, dozenaka kW beharrezkoak izaten dira pieza handien mekanizazio-prozesuak burutu ahal izateko.
2. **Spota:** laser-sortak bere gunerik estuenean aurkitzen denean (hau da, fokuan) daukan diametroa adierazten du. Laser batek eman dezakeen potentziarekin lotura zuzena dauka *spotak*, materialari transferitu nahi zaion potentzia-dentsitatea *spotaren* azaleraren arabera baita.

3. **Potentzia-dentsitatea:** igorritako potentzia azalera unitateko adierazten duen parametroa. $W \cdot m^{-2}$ edo $W \cdot cm^{-2}$ dira erabilitako unitate ohikoenak. *Spot* txikiak potentzia dentsitate handia izatea ahalbidetzen dute, baina beraien eragite-eremua mugatua dago.
4. **Energia-dentsitatea :** potentziaren antzera, azalera unitateko igorritako energia adierazten du parametro honek. Baina kasu honetan, laserrak piezaren puntu bakoitzaren gainean daukan eragite-denbora kontuan hartzen du, laserraren aitzinapen abiaduraren menpe geratuz. Unitate ohikoenak $J \cdot m^{-2}$ edo $kJ \cdot cm^{-2}$ dira.



Irudia II.34: Prozesu ezberdinen potentzia-dentsitatea eta interakzio-denbora [Steen, 2010]

5. **Uhin-luzera:** laser motaren arabera, igorritako uhinak luzera zehatz bat izango du. Parametro hau aldaezina da, makinaren fabrikazioan zehar erabilitako osagaien menpe baitago. Erabili beharreko laser-mota eta ondorioz laserraren uhin-luzeraren aukeraketa landu beharreko materialak mugatzen du. Izan ere, material bakoitzak energia xurgatzeko gaitasun ezberdina dauka, uhin-luzerarekin erlazio zuzena duelarik. Burutu nahi den prozesuaren arabera, behin erabiliko den materiala erabakirik, laser mota egokiena aukeratzea ezinbestekoa izango da, uhin-luzeraren arabera materialen absorzio-maila anitzak kontuan harturik.



Irudia II.35: Xurgapen-mailaren eta uhin-luzeraren arteko erlazioa laser ezberdinentzat

II.7. SOLDATZE-PROZESUA ETA TEKNIKAK

Soldadura bi pieza edo gehiago elkartzeko fabrikazio-metodo bat da, pieza bakarra lortzeko helburuz. Ameriketako Soldadura Elkarteak (*American Welding Society - AWS*) soldadura horrela definitzen du: “material metaliko edo ez-metalikoengan tenperatura zehatz batera arteko beroaren ondorioz agertzen den elkartzea, prozesuan zehar presioa edota betetze-materiala erabil daitezkeelarik”.

Egun, kalitate maila anitzak eskain ditzaketen makineria eta tresneriak daude industrian, beraien prezioa tarte handi batean mugituz. Lan honetan fusio bidezko soldadura jorratu da, hau da, piezen batzea lortzeko asmoz, oinarri-materialaren urtzea bilatzen duen prozesua. Hiru talde nagusi daude:

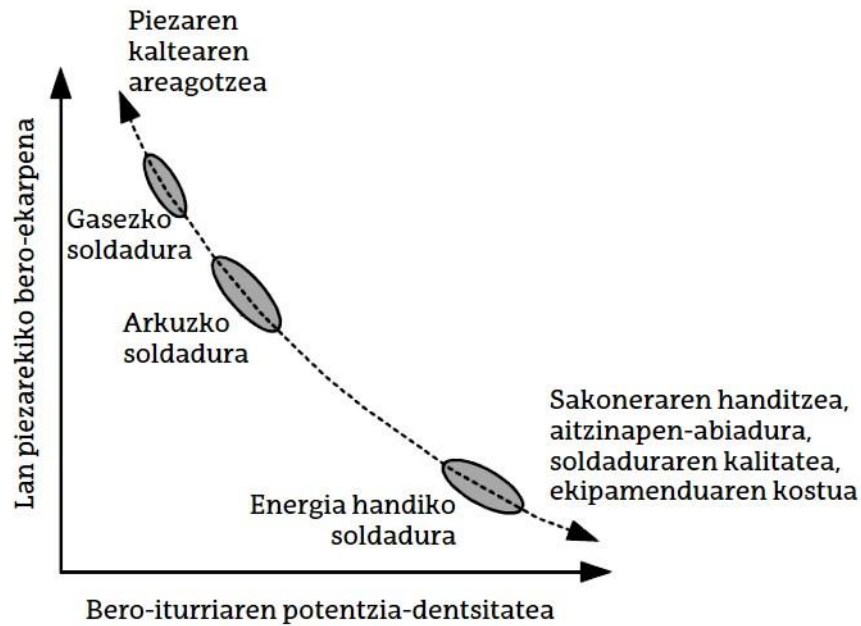
1. **Gas bidezko soldadura:** erregai baten eta oxigenoaren arteko erreakzioa aprobetxatuz, sortutako sugarra materiala berotu, urtu eta elkartzeko erabiltzen da.
2. **Arku bidezko soldadura:** elektrodoen eta tratatu nahi den materialaren artean sorturiko arku elektrikoaz baliatuz, materiala berotu, urtu eta elkartzen da.
3. **Energia handiko sorta bidezko soldadura:** energia kontzentratu duen elektroio-sorta edo laser bidez erasotutako materiala berotu, urtu eta elkartzen da.

Hiru mota hauek ezaugarri ezberdinak dituzte, bai transmititutako beroa, bai energia-dentsitateari dagokionez. Hortaz, teknika bakoitza erabiltzean, kalitate-maila eta ezaugarri ezberdinak lortuko dira. Hala ere, metodo bakoitzaren barnean materiala berotzeko aldaera anitzak daude, soldadura moten sailkapen totala handiagotuz.

Bero iturriaren potentzia-dentsitatea handitzen doan heinean, piezak behar duen bero-ekarpena txikiagoa izango da. Gasezko sugarraren eraginpean dagoen piezaren zati bat oso astiro bero daiteke, urtze prozesua hasi baino lehen beroa pieza osoan zehar jada sakabanatuta dagoelarik. Aitzitik, bero larregi ematen bazaio, itxuraldatze larriak sor daitezke, propietate mekanikoak txartuz eta materiala bera ahulduz. Kontuan izan behar da materialek aldaketa gogorrek jasaten dituztela soldatze-prozesuan zehar, egoera solidotik likidora igaroz, zatiren bat lurrunduz eta berriz hoztuz solido bihurtu arte.

Potentzia-dentsitatearen igoerak soldaduraren penetrazio sakonago bat, soldatze-abiadura azkarragoak eta kalitate hobea lortzea ahalbidetzen ditu, lan-piezan sortutako kalte txikiagoa bermatuz.

Laser eta elektroio bidezko soldadurek, ondo enfokaturik badaude, energia asko kontzentra dezakete, materiala urtuz edo zuzenean lurrunduz eta zulo sakonak bat-batean eginez. Horregatik, azken bi teknika hauek gasezko soldadura baino egokiagoak dira industrian balio erantsi handiko produktuak ekoizteko.



Irudia II.36: Bero-ekarpenaren eta potentzia-dentsitatearen arteko erlazioa gasezko, arkuzko eta potentzia handiko laserrentzat

Osagarri aeronautikoetan, motorretako turbinetan zehazki, piezen arteko elkartzeek kalitate-maila handia eskaini behar dute. Bat-bateko tenperatura aldaketa bortitzak, korrosioa eragin dezaketen erregaien gasak edota hegaldi egoera ezberdinek sortzen dituzten indar mekaniko aldakor eta altuak... Guzti horri egokiro erantzuteko, soldadura guneen lantzeak prozesuaren analisi sakonaren beharra dauka, lortutako soldadura-kordioen propietateak aipaturiko arazoei aurre egiteko gai direla bermatuz. Gainera, erabilitako materialak aleazio bereziak izan ohi dira, ahalik eta zerbitzu onena eskain dezaten.

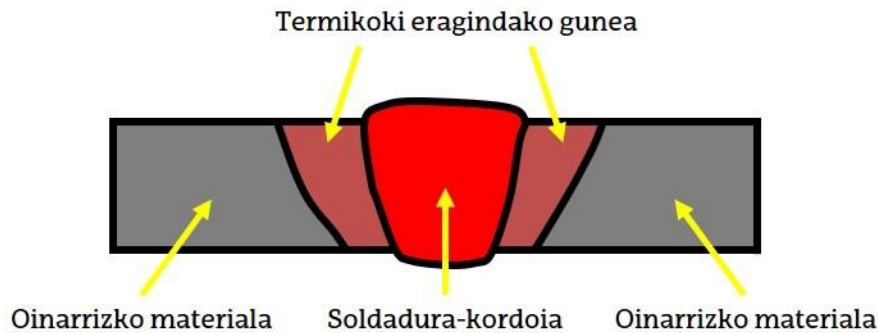
Beraz, kalitate goreneko emaitzak izateko, arku eta energia handiko sorta bidezko soldadura-metodoak erabiltzen dira turbina aeronautikoetako piezak elkartzeko. Konkretuki, hauek gailentzen dira: Plasma-Arku bidezko Soldadura (*Plasma Arc Welding – PAW*), Tungsteno-Gas Geldo bidezko Soldadura (*Tungsten-Inert Gas Welding – TIG*), Elektro-Sorta bidezko Soldadura (*Electron Beam Welding – EBW*) eta Laser-Sorta bidezko Soldadura (*Laser Beam Welding – LBW*) Lehenengo biak arku elektriko bidezko teknikak dira eta beste biak, ostera, energia handiko sorta bidezko prozesua da.

Bero-iturriak eragindako propietateen aldaketak ez dira solik gune soldadura mugatzen, aldameneko materialak ere pairatzen baititu. Hau da, tarte batean, bero-iturriaren aplikazio puntutik abiatu, landutako materialak hasierako propietate berberak dituen gunera heldu arte, materiala ez da ez urtu ez birsolidifikatu. Baina nolabaiteko aldaketak ager daitezke, barne egitura kasu. Erdibideko tarte honi Termikoki Eragindako Gunea deritzo (*Heat Affected Zone – HAZ*).

Gune horretara beroa kondukzioz heltzen da, eta sor daitezkeen efektuen artean, hurrengoak daude: tentsio termikoak, mikroarrakalak, soldatutako gunearekiko hutsuneak eta materialaren ahultzea. Guzti honek piezaren prestazio mekanikoen beherakada eragingo du. *HAZ* gunea ahalik eta txikiena izan dadin, aitzinapen-abiadura handiko prozesuak hobesten dira, energia-dentsitatea ere handia delarik. Abiadura geldoagoa eta energia-dentsitate baxuagoa

erabiliz gero, HAZ gunea handiagoa izateko arriskua dago. Hots, materialaren propietateez gain, beroak eragindako gunearen neurrietan soldatze-prozesuak berak eragin zuzena dauka.

TIG eta PAW soldadurak merkeagoak eta erabiltzeko errazagoak dira, kalitate handiko soldadura eskaintzen dutelarik. Teknika hauek eragin handiagoa dute materialarengan EBWekin alderatuz, azken honek sortutako kordoa oso mehea eta kalitate gorenekoa baita, nahiz eta garestiagoa izan. Horregatik, kritikotasun maila altua duten gunetan elektroio-sorta bidezko soldadura erabili ohi da eta ez hain kritikoetan tungsteno-arkukoa edo plasma bidezkoa erabiltzen dira, ekoiztako helburuzko osagaien junturak optimizatzeko.



Irudia II.37: Soldadura-kordoa, termikoki eragindako gunea eta oinarrizko materiala

II.7.1. TIG soldadura

Tungsteno-gas arku bidezko soldadura ere deitua (*Gas-Tungsten Arc Welding – GTAW*), tungsteno elektrodo iraungiezin baten eta elkartu nahi diren metalen artean arku elektriko bat erabiltzean oinarritzen da. Elektrodoak eusten duen zuzia alde batean babes-gas zilindro bati eta bero-iturriaren terminal bati konektaturik dago. Beste aldean, zuzia lan-piezari loturik dago eta bere pitatik babes-gasa kanporatzen du, soldadura-kordoa airetik babesteko.

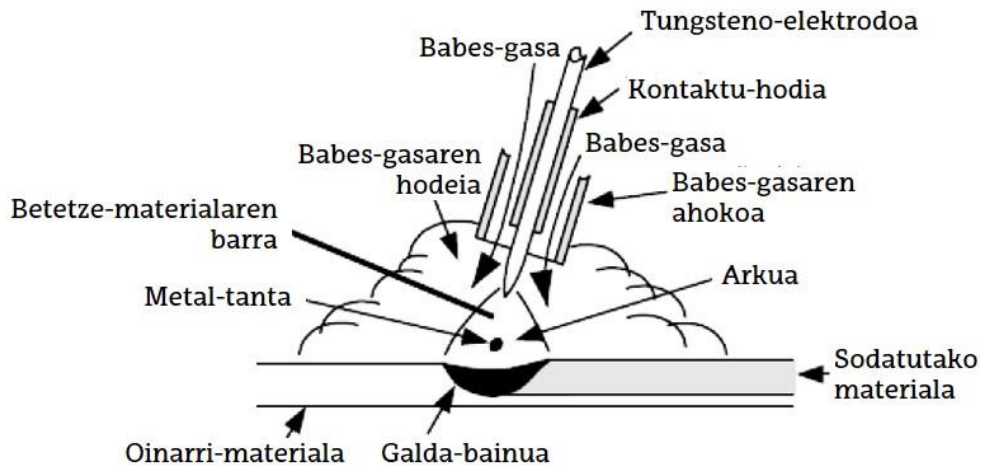
TIG soldadurak material gehigarria erabiliz edo erabili barik buru daitezke. Lehenengo kasuan, lodiera handiko piezak elkartzeko, arku material gehigarriarekin era automatikoan edo eskuz elika daiteke.

Tungsteno-zko elektrodoei dagokienez, hauei % 2 zerio edo torio gehitzen zaie. Horrela, tungsteno puruzko elektroiekin erkatuz, elektroien igorpen hobia eta kutsatzearen aurkako erresistentzia handiagoa lortzen dute. Ondorioz, arkuaren hastapena era errazagoan burutzen da, arku modu egonkorragoan agertzen delarik. Horrez gain, igorpen hobia dela eta, elektrodoaren muturrean ez dira hain tenperatura altuak behar elektroioak igorri ahal izateko, horrela muturraren urtzea saihestuz.

Soldatze-teknika honetan helioa eta argoia bezalako gas geldoak erabiltzen dira babes-gas lana gauza dezaten. Horregatik, GTAW teknikari TIG ere deritza (*Tungsten Inert Gas*). Argoiaren eta helioaren ionizazio potentzialak 15,7 eta 24,5 eV dira, hurrenez hurren. Beraz, argoiarekin arku sortzea errazagoa izateaz gain, arkuaren zeharreko tentsio jaitsiera txikiagoa da. Era berean, helioak baino pisu handiagoa du argoia, babes eraginkorragoa eta erresistentzia hobia lortuz. Guzti horri prezioaren abantaila gehitu behar zaio, argoia helioa baino merkeagoa baita.

Arku elektrikoaren sortzerakoan, polaritatea bideratzeko hiru aukera daude:

1. **Elektrodo Negatibodun Korrante Zuzena** (*Direct-Current Electrode Negative – DCEN*): mota ohikoena da eta zuzeneko polaritatea erabiltzen du, soldadura sakonagoa lortuz.
2. **Elektrodo Positibodun Korrante Zuzena** (*Direct-Current Electrode Positive – DCEP*): alderantzikatutako polaritatea erabiliz, gainazaleko soldadura lortzen da, sakonera txikiagokoa.
3. **Korrante Alternoa**: erdibideko soldadura lortzen du, penetrazio sakonekoa.



Irudia II.38: TIG soldaduraren oinarriko eskema

Betetze-materiala erabiliz gero, metal honen elikatze-maila aplikaturiko korrantearekiko independentea da, aldagai bakoitza bere aldetik alda daitekeelarik emaitza ezberdinak lortzeko. Hau da, betetze-materialaren eta oinarri-materialaren urtze-mailen arteko erlazioa independenteki kontrola daiteke. Ondorioz, soldadurari emaniko energia kordoiaren tamaina aldatu barik kontrola daiteke. Horri eskerrak aplikazio anitzetarako erabil daiteke TIG teknologia, hala nola, topera dauden junturetarako edota betetze-material barik xafla meheak soldatzeko. Orokorrean, sekzio mehedun piezak elkartzeko egokia da, bero gutxi ematen baitu.

Bestalde, metodo garbia denez, titanioa, zirkonioa, aluminioa edo magnesioa bezalako metal erreaktiboak elkartzeko egokia da. Alabaina, denbora luzez eta intentsitate handiz lanean egonez gero, tungstenozko elektrodoa urtzeko eta kordioan barrena metal honen inklusioak sartzeko arriskua dago. Hortaz, deposizio-tasa balio baxuetara mugatua du TIG metodoak, eta hau hobetzeko asmoz, aldeztu berotutako betetze-metalak erabiltzen dira.

II.7.2.PAW soldadura

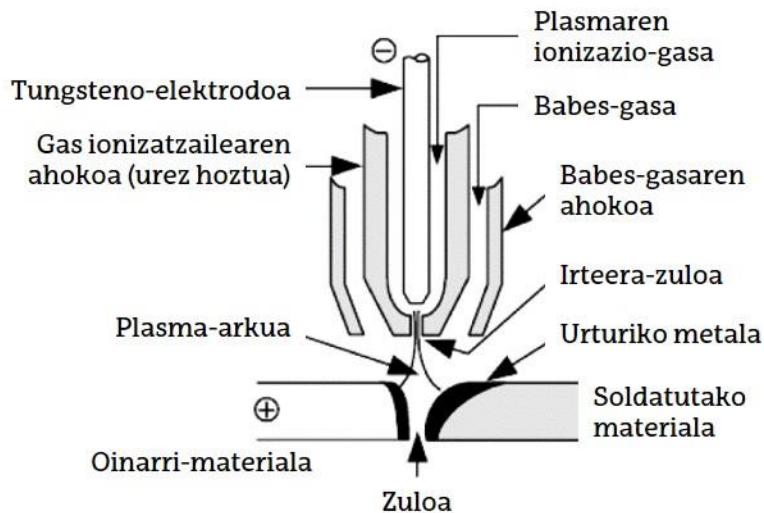
Soldadura teknika hau (*Plasma Arc Welding – PAW*) TIG metodoaren antzekoa da: tungstenozko elektrodo baten eta metalen artean sortutako arku elektriko estu baten bidez materiala berotu eta urtu egiten du. Baina kasu honetan, babes-gasaz gain, PAW teknikak plasmageno deritzon gas ionizatzailea erabiltzen du.

Elektrodoari dagokionez, zuziaren barnean mantentzen da, arku mugatuz eta estutuz eta bere hedapena txikiagotuz luzeran zehar.

Arku sortzeko, erabilitako polaritaterik ohikoena zuzeneko da, maiztasun handiko sorgailu baten laguntzaz. Azken honek gidari lanak dituen arku bat sortzeko balio du, elektrodoren

muturretik plasmagenoaren pitaraino. Honen ostean, arkua gradualki hedatuz joango da, elektrodoaren muturretik lan-piezaraino heldu arte.

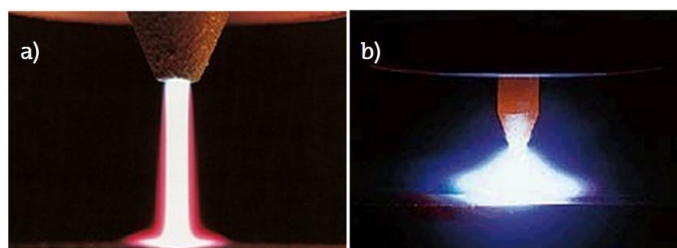
Urtze-prozesu ohikoaz gain, badago *keyholing* deritzon beste teknika alternatibo bat. Piezen lodiera muga delarik, alde batetik bestera doan zulo bat egitean datza, erabateko penetrazioa lortuz eta abiadura handiagoak erabiltzeko aukera ahalbidetuz.



Irudia II.39: PAW soldaduraren oinarriko eskema

PAW prozesuak zenbait abantaila ditu TIG metodoarekin alderatuz. Lortutako arku meheari esker, luzeran zehar honek jasan ditzakeen aldaketak murrizten dira, eskuz egin beharreko lana erraztuz. Gainera, TIG soldaduran ez bezala, elektrodoa zuziaren barruan mantentzen denez, langileak ez dauka hura kutsatzeko arriskurik. Aldiz, arkuaren zehaztasun handia lortzea zailagoa den heinean, PAW sistema TIG baino garestiagoa da.

Bi metodo hauen emaitzak alderatuz gero, soldadura-kordoiaren itxurak zer motako arkuak sortu duen adierazten du, itxura hau arku elektrikoaren hedapenaren arabera delarik. PAW soldaduraren kasuan, elektrodoa zuziaren barnean mantentzen denez, arkua murrizturik dago. Beraz, plasma-gasa irteten den zuloak hedapenaren norabidea zehaztuko du, zabaldu ezin daitekeen arku luze eta estu bat lortuz. TIG metodoari dagokionez, elektrodoa zuzitik ateratzen da eta, ondorioz, gasaren hedapena ez dago hain bideraturik, arku labur eta zabal bat lortuz.

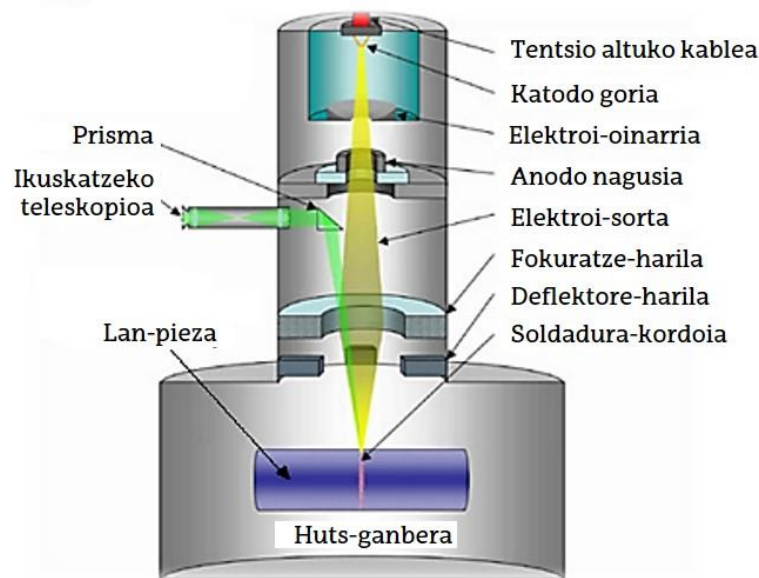


Irudia II.40: PAW (a) eta TIG (b) tekniketako arkuaren xehetasuna

II.7.3.EBW soldadura

Elektroi-sorta bidezko soldadurak (*Electron Beam Welding – EBW*) penetrazio, zehaztasun eta automatizazio maila onak eskaintzen ditu. Elektroi-sortaren eta elkartu nahi den materialaren aurkako talka eraginez, zehaztasun handiko urtze-prozesua gertatzen da. Hoztu ostean, soldadura gauzaturik dago. Prozesu honetan ez dago betetze-materialen beharrik eta urtutako gunea oso txikia da, beroak eragindako inpaktu termikoa murriztuz. Elektroiak kanporatzen dituen kanoiaren katodoa negatiboki kargatutako harizpi bat da. Bertatik korrante elektrikoa bortxaz igaroz, berotu egiten da, 2500 °C inguru lortuz. Honen ondorioz, efektu termoionikoa deritzon fenomenoari esker, elektroiak igorri egiten dira. Orduan, elektroiak zulatutako eta positiboki kargatutako anodo baten zehar bideratzen dira, beraien abiadura azeleratuz. Zulo txiki horretatik irteten dira kanpora elektroiak, lan-piezarengan eraginez.

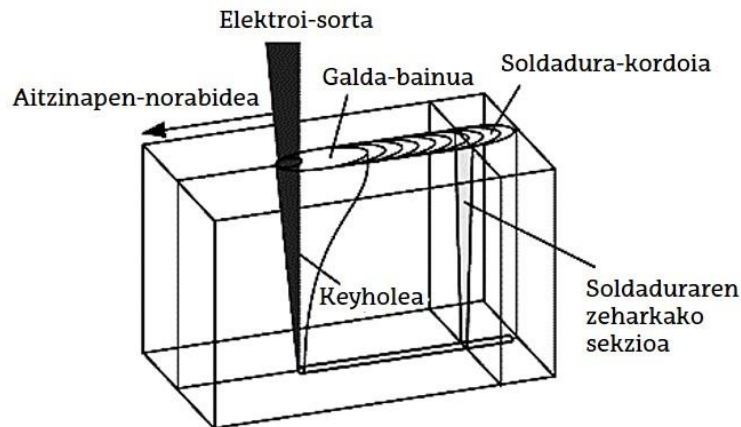
Behin kanpoan, elektroiak bata bestearengandik banatzeko joera dute, bai karga-zeinu berdina duten partikulen elkarren arteko aldaratzeagatik, bai agitazio termiko erradial handiagatik. Gauzak horrela, sorta zabaltzen joango da. Arazo hau saihestu eta sorta ondo enfokatu ahal izateko, haril edo lente magnetikoz osaturiko sistema ezartzen da kanoiaren ardatzean. Ondoren, deflektore lana burutzen duen beste haril multzo bat kokatzen da, sistemak sortaren oszilazioa baimentzeko edo bere eraso-angelua aldatzeko.



Irudia II.41: EBW soldaduraren oinarriko eskema

Elektroien kanoiak huts-ganbera bat dauka, harizpi igortzailearen oxidazioa saihesteko, gainontzeko osagarrien egoera bermatzeko eta elektroien arteko arku elektrikoaren jauziak ekiditeko helburuarekin.

Energia-dentsitate oso altuak lortzen dira soldadura-teknika honekin. Ondorioz, erdietsitako temperatura 14.000 °C izatera hel daiteke. Elektroi-sorta, maila honetan, edozein metal lurruntzeko gai da. Horregatik, sortak lan-piezaren gainazalean eragiten duenean, azken honen zati bat berehala lurruntzen da, lurrunezko hutsune bat sortuz eta hutsune hau sakoneran zehar hedatuz. Zerraila itxura dela eta, barrunbe honi *keyhole* deritzo, eta bertan lurrunaren ionizazioa gertatzen da, plasma egoera agertuz. Sorta eta piezaren arteko higidura erlatiboa dela eta, hutsune hau lan-piezan zehar mugituko da, soldadura-kordoia eraikiz.



Irudia II.42: Elektroi-sortak eragindako galda-bainuaren eta *keyhole*aren xehetasuna

EBW sistemak guztiz automatizaturik daudenez, sarrera-parametro ezberdinak ezartzeko gaitasun handia daukate. Soldatu beharreko materialaren ezaugarriak eta ekoizpen-denboraren eskakizunak kontuan harturik, prozesuaren parametroak aldatzeko malgutasuna eskaintzen du:

1. **Elektroien korrontea:** sortutako elektroien fluxu honek materialaren aurka talka egiten du. Parametro hau soldatze-makina elikatzen duen energiak kontrolatzen du, intentsitatea eta tentsioa aldatuz.
2. **Elektroien azelerazioa:** elektroiek lan-pieza erasotuko duten abiadurarekin zuzenki lotuta dago. Parametro hau kontrolatzeko, sortaren hastapenean osteko deflektore elektromagnetikoak eta lenteen multzoa egokitzen dira.
3. **Kanoiaren aitzinapen-abiadura:** elektroien korrontearekin eta azelerazioarekin batera, abiadura honek sistemak eman dezakeen energia zehatzen du.
4. **Foku-distantzia:** soldadura-kordoiaren geometria zabaltzeko edo estutzeko erabilgarria da. Parametro hau sortaren hastapenaren osteko lenteekin kontrola daiteke.
5. **Sortaren eraso-angelua:** soldadura-kordoiaren itxuran eragina dauka. Deflektorearen posizioaren bidez kontrolatzen da angelu hau.
6. **Kanoiaren muturreko bibrazioa:** puntu beretik behin baino gehiagotan igarotzea ahalbidetzen du parametro honek, penetrazio osoa lortzeko asmoz.

Lehen hiru parametro fisikoek (elektroien korrontea, azelerazioa eta kanoiaren aitzinapen-abiadura) sistemak emandako energia definitzen dute. Beste hiru parametro geometrikoek (foku-distantzia, sortaren eraso-angelua eta kanoiaren muturreko bibrazioa), aldiz, eragindako gunea zehazteko baliagarriak dira. Hortaz, bi multzo hauen uztarketaz, *EBW*-sistemak emandako azalerako energia definitzen da.

Hainbat abantaila ditu *EBW*-teknikak. Arku bidezko soldadurarekin erkatuz, elektroia bidezko soldadurak galda-bainu sakon eta mehea lortzea ahalbidetzen du, lodiera handiko

piezak elkartzeko erabil daitekeelarik. Bero-ekarpen txikiko prozesua izanda, distortsioa eta eragindako gunea murrizten dira. Eraginkortasun energetikoari dagokionez, % 65 ingurura hel daiteke. Arkuzko prozesuen antzeko zenbakia da hau, baina laser bidezko soldadurarena baino askoz handiagoa.

Erabilitako energia-dentsitatea oso handia da, materialen urtze-abiadura azkartuz eta aitzinapen-abiadura altuak baimenduz. Horregatik, *EBW*-prozesua ekoizpen-maila altukoa da. Gainera, moldakortasun handia eskaintzen duen teknika da, ingurune magnetikoak baliatuz sortaren angelua aldatu daitekeelako, eta honek, iristeko zailak diren piezak soldatzea ahalbidetzen duelako.

EBW industria aeronautikoan oso hedaturik egoteaz gain, elektronikako munduan ere erabilia da, beroarekiko sentikorrek diren materialak elkartzeko egokia baita. Era berean, propietateen galera saihestuz, material erregogorrek edota errektiboak eraso ditzake.

Aldiz, elektro-sorta bidezko soldadura oso garestia da. Makineriaz gain, sistemak huts-ganberaren beharra du eta erabili beharreko erreminta eta lanabes guztiak ezin dira magnetikoak izan. Hala ere, bere zehaztasun-maila altuak eta ekoizpen-abiadura handiak arlo anitzetarako aukeratua izatea ahalbidetzen du, industria nuklearra, aeronautikoa edo automozioa kasu.



Irudia II.43: *EBW* makineria eta modulua (Sciaky)

II.7.4. Laser soldadura

II.7.4.1. Laser soldaduraren oinarriak

Laserra asmatu zenetik, hainbat aplikaziotarako erabil zitekeela frogatu da, besteak beste, materialak urtu eta batzeko bero-iturri lez, hau da, soldadurarako. Hala ere, 70eko hamarkada heldu arte, laserra elektronikako munduan baino ez zen erabiltzen, mikrosoldadurak burutzeko, edo kasu batzuetan, garaiko soldatze-metodo ohikoak heldu ezin ziren guneetan laguntzeko. Hortik aurrera, aldiz, industriako beste arlotan hartu zuen indarra laser bidezko soldadurak, aeronautika edota automozioa kasu.

Penetrazio sakoneko soldaduren garapen eta ikerkuntzan, bero-iturriaren sorburu den laserraren teknologiararen etengabeko hobekuntzak berebiziko garrantzia hartu du azken urteotan. Aurrerapen teknologikoei esker soldatze-teknika hau maila goreneko produktuak ekoiztera heldu delako.

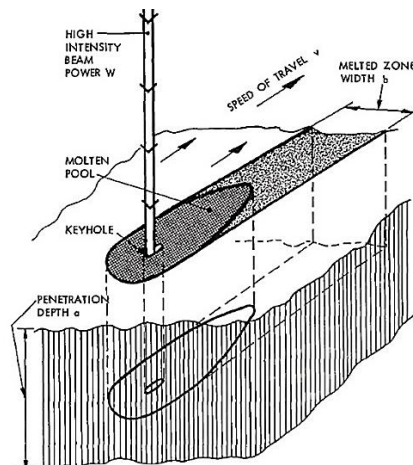
70eko hamarkada heldu zenean, Spaldingek [Spalding, 1971] laserrek soldadurarako ezaugarri egokiak zituztela ezarri zuen. Energia-dentsitate handiko teknika hau zehaztasun handiko soldadura meheak lortzeko erabil zitekeela baieztatu zuen, baita mekanizatzeko zailak ziren materialekin ere, titanioa kasu. Halaber, beroak eragindako gune oso murrizta lortzen zela ondorioztatu zuen.

Erabilgarritasunari dagokionez, teknologia hau giro-tenperaturan eta kutsadura-maila baxua sortuz erabiltzeaz gain, ez dauka elektro-sorta bidezko soldadurak duen huts-ganberaren beharrik, hauxe abantaila handi bat delarik.

Bestalde, lan-piezek ez dute zurrunki loturik egon behar, eta argiaren inertziarik eza dela eta, soldatze-prozesua azkar hasi edo eten daiteke.

Laser pultsatu bidezko soldadura arku bidezkoarekin alderatuz, beroa sortzerakoan agertzen ziren efektuak azertzean, sakonera berdina lortzeko laserra eraginkorragoa zela baieztatu zuen Andersonek [Anderson, 1965]. Era berean, Dudleyk laserra elektronikako osagaiak elkartzeko egokia zela ondorioztatu zuen, beroa zehaztasun handiz kontzentra dezakeelako, eta ondorioz, alboko osagaiak ez dutelako kalterik jasaten [Duley, 1976].

Elektroi-sorta bidezko soldaduran sortutako lurrunezko barrunbea ere sortzen da laser-soldadurarekin. Potentzia-dentsitate nahikoa lortzekotan, laser-argiak materialaren zati bat berehala lurruntzen du, *keyhole* sortuz. Honen ondorioz, *keyhole* barrunbeak lan-pieza zeharkatzen duen heinean, materiala urtu eta soldadura-kordoa sortzen joango da [Swift-Hook, 1973].



Irudia II.44: Laser-sortak eragindako *keyhole*aren xehetasuna [Swift-Hook, 1973]

Era berean, Klemensek *keyhole*ak sortzeko argi-sortak energia-dentsitate minimo bat izan behar zuela frogatu zuen, balio hau lantzen ari den materialaren menpekoea delarik [Klemens, 1976].

Laser bidezko soldaduran hurrengo oinarritzko parametroak daude:

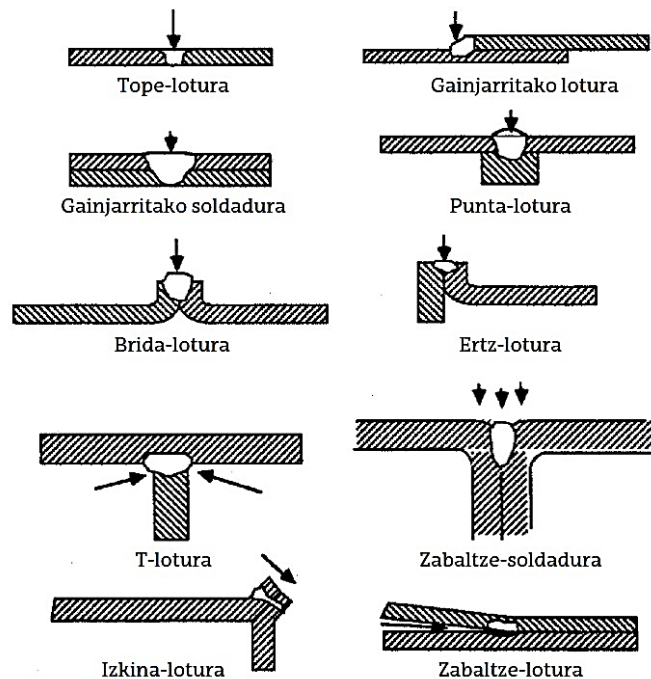
1. **Laser-sortaren potentzia:** lortutako sakonera soldadura prozesuan erabilitako potentziarekin erlazionaturik dago. Hau da, argi-sortaren diametroa konstante

mantenduz, penetrazioa hazi egingo da potentzia handitzen doan heinean. Hasieran, hainbat ikerlanetan potentzia sakonerarekin linealki erlazonatuta zegoela baieztatu arren, badaude prozesuan zehar ematen diren eta erlazio hau zailtzen duten bestelako fenomeno batzuk, babes-gasa edo aitzinapen-estrategia kasu.

2. **Laser-sortaren diametroa:** parametro honek potentzia-dentsitatea zehazten du, ISO arauen bidez neurtu behar delarik. Laserrak igorritako sorta motaren arabera, energia- kantitate bat barneratzen duen diametroa kalkulatu da (ikus II.5).
3. **Absortibitatea:** gorputz baten gainazalaren aurka jotzen duen erradiazio-fluxuaren eta xurgatutakoaren arteko erlazioa da. Laser bidezko soldadura-prozesuaren eraginkortasuna, hein handi batean, absortibitatearen menpe dago. Edozein bero-transferentzia kalkulatu nahi denean, lan-piezak xurgaturiko energia zein izan den jakin beharrekoa da. Elektroik askeek xurga dezaketen energia aintzat harturik, materialaren erresistibitate elektrikoaren menpe dago absortibitatea. Bestalde, erresistibitate termikoa tenperaturaren menpe dagoen propietatea da, soldatze-prozesuan zehar aldatzen doalarik. Halaber, gas errektiboak babes-gasekin nahastuz, absortibitate-maila handiagoa lor daiteke. Hala frogatu zuen Jorgensenek, zeinek argoari % 10 oxigeno gehitu zion, guztirako penetrazioa %100 handituz [Jorgensen, 1980]. Era berean, behin *keyholea* sortua dagoenean, absortibitatea azkar handitzen da, barne hormen arteko islatze anitzei esker. Baina metal batzuen absortibitate-maila baxua dela eta, laser soldadurak energia handia behar du *keyhole*-barrunbea sortzeko, *EBW*-teknikarekin alderatuz. Hala ere, behin *keyholea* egonkorturik, islatze-maila altua duten metalak elkartzeko ere baliagarria da laserra. Adibidez, altzairua 100 μm -ko laser-sorta batekin erasotuz, *keyholea* sortzeko 1 ms besterik ez da behar.
4. **Aitzinapen-abiadura:** argi-sortaren eta lan-piezaren arteko abiadura erlatiboa da, parametro honek soldaduraren penetrazio-mailan eragin zuzena daukalarik. Abiadura handiek soldadura desegokiak sor ditzakete, akatsen agerpena sustatuz. Aldiz, abiadura txikiak erabiliz gero, zulaketak edota gehiegizko soldadurak azal daitezke. Hortaz, badago abiadura-tarte bat, hau da, abiadura minimo bat eta beste maximo bat, non soldadura egokia lortu ahal den, baina piezaren lodiera handitzen doan heinean, tarte hau txikitzen doa. Era berean, optika mugikorrek, eskanerretan barneraturik, sorta abiadura handiz eta norabide ezberdinetan higitzeko ahalmena eskaintzen dute.
5. **Babes-gasa:** prozesuan zehar, argi-sortarekin batera gas geldoa sartzeak hainbat abantaila ekar ditzake, bai atmosfera itxia sortuz, bai aurki daitekeen airea bortxaz alboratuz. Alde batetik, *keyholeak* sortutako plasmak sortaren energia xurga dezake, baina baita sakabanatu ere. Horretaz gain, gainazala herdoil ez dadin, babes-gasak ere erabili ohi dira, helioa edo argoia kasu, eta beraien ionizazio-potentzialak, hurrenez hurren, 15 eV eta 25 eV dira, energia era garbian transmititzeko gaitasuna bermatuz. Funtzio hauetaz gain, babes-gasak eragin zuzena dauka soldaduraren sakoneran. Halaber, aitzinapen-abiadura handiko soldaduretan, sakonera bermatzeko asmoz, argoi apur bat (% 10) helioarekin nahas daiteke, gas pisutsuago bat lortuz. [Seaman, 1977].
6. **Fokuaren posizioa:** ispilu-sistema baten bidez definitutako laserraren fokua lan-piezaren toki ezberdinetan koka daiteke. *Spot* txikiena fokuan dagoen arren, azken

hau lan-piezaren gainazalean edo barnean jartzeak emaitza ezberdinak eman ditzake. Fokua piezaren barnean kokatzearen abantailak frogatu zituzten, zeharkako sekzio egokiko soldadurak lortuz ([Willgoss, 1979], [Engel, 1976]). Hala ere, material eta piezen lodieraren arabera, emaitzak guztiz aldatzen dira. Hortaz, adostasun bakarra hau da: fokuari posizio optimoa piezaren barnean izan arren, kasu bakoitzerako distantzia zehatza lodiera, material mota eta erabilitako potentziaren arabera egongo da.

7. Soldadura motak:



Irudia II.45: Soldadura mota ezberdinak itxuraren arabera

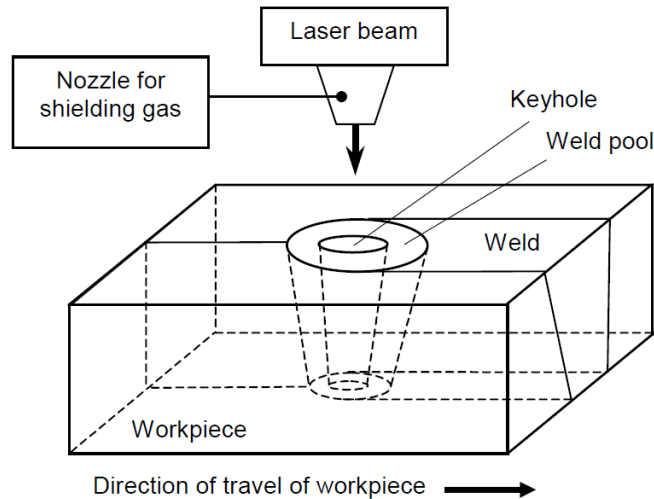
Laser-sorta bidezko soldadura, beste soldatze-teknika batzuekin alderatuz (*EBW*, *PAW* edo *TIG*), teknologia berri da. Hala ere, bere garapenari esker, egun bero-iturri oso kontzentratuekin lan egin dezaketen makina moldakorrek diseinatzen dira. Laser hauek mekanizazio makinekin edo robotekin multzotuz, soldatze-abiadura handiko tresneria industrialak eraiki daitezke. Sortaren kalitateak eta materialaren erradiantziak kordioaren geometria, mikroegituraren eta hondar-tentsioetan eragin zuzena izango dute [Liu, 2017].

II.7.4.2. Plasmadun barrunbea edo *keyhole* sortzeko prozesua

Ganorazko elkartzeak lortzeko, penetrazio sakoneko soldadurak ezinbestekoak dira. Horretarako, bero-transferentziaren prozesuan materialak energia-kantitate zehatza xurgatzeko gai izan behar du, *keyhole* gakoetako bat delarik. Barrunbe hau laser-sortak lan-piezaren substratua lurruntzeko nahiko potentzia-dentsitatea igortzen duenean sortzen da. *Keyhole*aren absortibitatea erabatekoa da, hau da, heltzen zaion energia guztia xurgatzen du, gorputz beltz bat lez jokatuz [Mazumder, 1983].

Behin barrunbea eratuta, sortzen den lurrunaren presioak urrutako metala krateraren hormetan zehar mugiarazten du. Beraz, une horretan, barrunbetik etengabe materiala

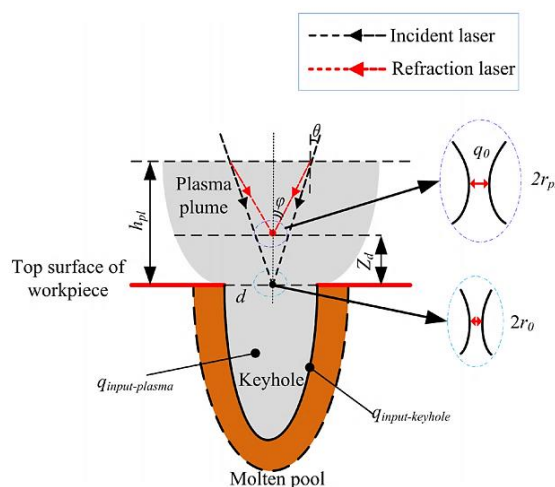
kanporatzen ari delarik, geldi dagoen sorta konstante batek sistema egoera egonkorra izatera bultzatuko du. Baina lan-piezan zehar soldadura-kordoi bat sortu nahi denean, aitzinapen-higidura ezinbestekoa da. Kasu honetan, egoera egonkorra lortzeko, materiala lurrundu eta ionizatzen den aitzinapen-abiadura minimoa beharrezkoa da, ionizaturiko gasak bere ibilbidean zehar materiala urtzeko gai izan behar duelarik [Klemens, 1976]. Urtze prozesu hau *keyhole*aren hormetatik oinarri-materialera beroa kondukzioz transmitituz burutzen da, sortutako lurrun-barrunbearekin batera aurrera jotzen duen galda-bainua eraikiz [Dowden, 2001].



Irudia II.46: Laserrak sortutako *keyhole*aren eskema [Dowden, 2001]

II.7.4.3. Energiaren xurgapena

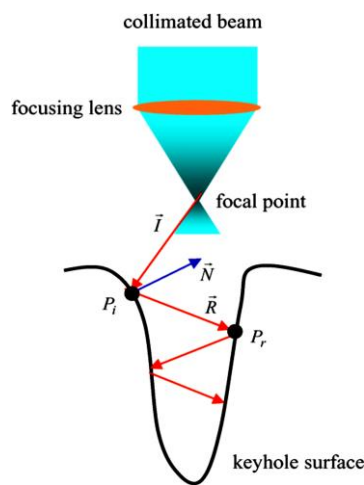
Behin *keyhole* era egonkorrean lanean dagoenean, laserraren energia-ekarpenak materialengan eragina izan dezan, bi xurgapen mota bereiz daitezke soldadura-kordoiaren sortzean: alderantzizko Bremsstrahlung eta Fresnel absorptzioak. [Ducharme, 1994].



Irudia II.47: Laser-soldadura sakonaren eskema [He, 2018]

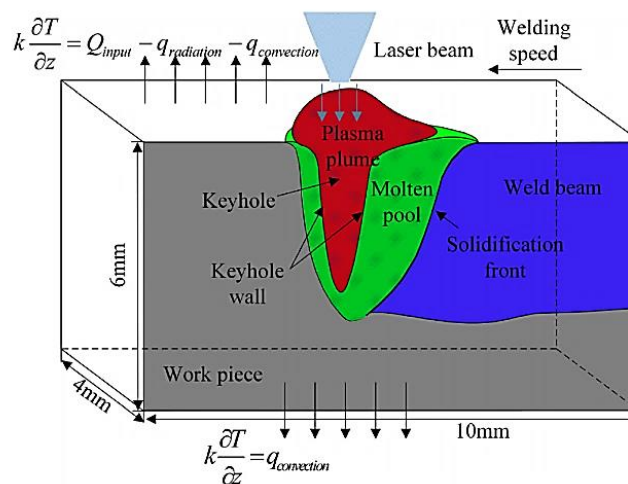
Alde batetik, *keyhole* barrunbean ionizatutako lurrinak, hau da, plasmak, xurgatuko duena. Absortzio mota hau alderantzizko Bremsstrahlung prozesua bezala ezagutzen da, non elektroiek askeek erradiazioa xurga dezaketen. Mekanismo honekin, plasmak ioiak sakabanaturik dituzenez, elektroiek energia xurgatzen dute, era koherentean igorritako argi-sortatik materialera energia transferituz [Schlessinger, 1979].

Beste alde batetik, *keyhole*aren hormek xurgatzen duten energiaren beste zatia dago. Plasma zeharkatu ostean, argi-sortak, hein batean, zabaltze edo sakabanatze efektua pairatzen du. Ioiek xurgapen prozesua burutzean, sortaren desbideratzea eragiten dute, fokuen posizioak lekarkatzen gehituz. Beraz, jatorrizko uhin koherentearekin alderatuz, laserrak ez du materiala esperotako norabide teoriko eta optimoan erasotzen eta argi izpiak ausaz hormen aurka talka egin eta islatzen doaz, barrunbean zehar beherantz eginez. Gauzak horrela, hormek energia xurgatzeko aukera dute, Fresnel absortzioa deritzon prozesuaren bidez [Kapadia, 1991].



Irudia II.48: *Keyhole*an zehar gertatutako islatzeen eta xurgatzeen xehetasuna [Cho, 2006]

Hala ere, xurgapen-prozesu hauek ez bezala, erradiantzia- eta konbektzio-efektuak bero galera lez zerrenda daitezke, baita lurrunaren sortze-prozesuaren ondorioz gertatutakoa ere. Hortaz, materialak guztira zenbat bero xurgatu duen zenbaterakoan, bero transferentziaren balantzean bai energia sarkorrek bai aprobe txatu ez direnak kontuan hartu behar dira.



Irudia II.49: Laser-sortak eragindako barrunbeen xehetasuna eta energia-balantzea [He, 2018]

II.7.5. Tekniken arteko alderaketa

Material bati piezak elkartzeko helburuarekin ematen zaion energiaren zati handiena urtze-prozesua aurrera eramateko erabiltzen da. Beste zati txiki batek, aldi, soldadura-kordoiaren aldamenen dagoen gunea berotzeko baino ez du balio. Hori dela eta, Steen eta Mazumderrek elkartze-koefizientea ezarri zuten.

Kontzeptu artifizial honetan v aitzinapen-abiadura ($\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$), t lan-piezaren lodiera (mm) eta P erabilitako potentzia (kW) uztartzen dira, $v\cdot t/P$ ($\text{mm}^2\cdot\text{kJ}^{-1}$) bezala definiturik baitago. Balio hau gero eta txikiagoa izan, orduan eta energia gehiago xahutzen da *HAZ* gunea edota distortsioak sortzeko, energia hau soldadura bera sortzeko bideratu beharrean.

Elkartze-koefizienteari dagokionez, laser edota elektro-sorta bidezko teknikak soldadura meheak sortzeko baliagarriak dira, *HAZ* txikia dutelarik (beraien elkartze-koefizientea 15 eta $30 \text{ mm}^2\cdot\text{kJ}^{-1}$ artean dago) [Steen, 2010].

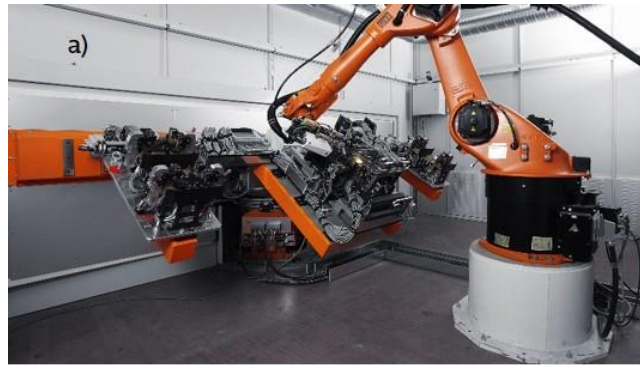
Prozesua	Elkartze-koefizientea [$\text{mm}^2\cdot\text{kJ}^{-1}$]
Oxiazetileno garra	0,2-0,5
Eskuzko arku metalikoa	2-3
<i>TIG</i>	0,8-2
Murgildutako arkuzko soldadura	4-10
Maiztasun altuko erresistentzia-soldadura	65-100
<i>EBW</i>	20-30
Laser-sorta	15-25

Taula II.6: Soldatze-tekniken elkartze-koefizientea [Steen, 2010]

Aipaturiko elkartze-koefizienteaz gain, laserrak beste hainbat indargune eskaintzen ditu beste hiru soldatze-teknikekin erkatzean. Alde batetik, bere moldakortasuna eta aukera-aniztasuna robotekin akoplatzeko. Bere potentzia tartea mW batzuetatik kW-etara hel daiteke, eta landu nahi den osagaien arabera, uhin-luzera ezberdinen artean aukeratzeko posibilitatea dago laserraren industrian, eremu infragorritik ultramorera, uhin ikusgaiak barne.

Beste alde batetik, edozein motatako materialak lantzeko aukera dago. Elektro-sorta bidezko soldadurak, aldiz, ezin ditu ez material magnetikoak elkartu ez inolako lanabes magnetikorik erabili. Laserrak, aldiz, mota honetako piezekin lan egin dezake, behin islatze- eta absorbititate-arazoak identifikaturik eta, ahal den heinean, soluzioa bilatu zaielarik.

Azkenik, huts-ganberaren beharizanik ez izatea abantaila handia da. Elektro-sorta bidezko soldatze-makinariak ganbera hauen beharra duen bitartean, laserrak atmosferako airearekin zuzenean lan egin dezake. Hortaz, laserrentzat makinaren lan-eremua ez dago ganberaren neurriengatik mugaturik, baizik eta lan-instalazio osoagatik, muntaia-kateen eta ekoizpen premiei erantzuteko malgutasuna emanez.



Irudia II.50: Laser-makineria: roboten eta laserren arteko akoplatzea (a: KUKA; b: Trumf)

Ezaugarria	Laser	EBW	TIG
Abiadura	V	V	X
Bero-ekarpen baxua	V	V	X
HAZ txikia	V	V	X
Soldaduraren itxura	V	V	X
Akoplatze erraza	V	X	X
Ekipamenduaren fidagarritasuna	V	V	V
Soldadura sakona	X	V	X
Soldadura airean	V	X	V
Material magnetikoen soldatzea	V	X	V
Material islatzaileen soldatzea	X	V	V
Beroarekiko sentikorrek diren materialen soldatzea	V	V	X
Loturara irisgarritasuna	V	X	V
Kutsadura baxua	V	V	X
Ekipamenduaren kostua	X	X	V

V: indargunea; X: ahulgunea

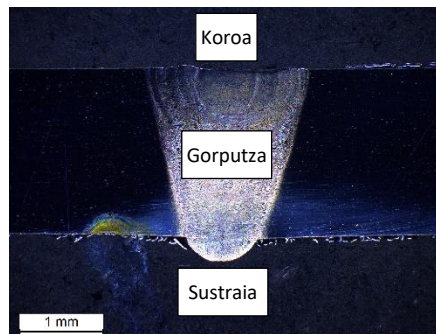
Taula II.7: Laser-, EBW- eta TIG-tekniken ezaugarri nagusien alderaketa (V: ona; X: kaskarra)

Horregatik guztiagatik, laserra piezak modu eraginkorrean elkartzeko erreminta eta aukera egokia da, *EBW* bezalako beste metodo klasikoaren aurrean alternatiba sendo eta egun oraindik garapen prozesuan dagoen teknologia gisa agertuz.

II.8. SOLDADURAREN GEOMETRIA ETA AKATSAK

Soldadura bat burutzean, urtu eden guneak, soldadura perfektua lortu ezean, ez ditu oinarri-materialak hasieran zuen itxura geometrikoa mantenduko. Horregatik, emaitzak aztertzean, bai soldadura-kordoa bai zeharkako sekzioaren neurriek prozesuaren egokitasun-maila zehazteko balio dute.

Zeharkako sekzioan hiru gune ezberdintzen dira: koroa, gorputza eta sustraia. Sarrera-parametroek sekzio honen itxuran eragin zuzena dute, potentzia edo aitzinapen-abiadura moldatuz, emaitza ezberdinak lortuz.

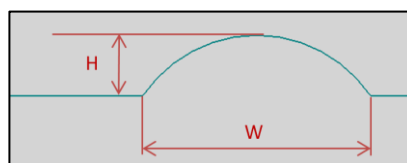


Irudia II.51: Soldadura-kordoiaren guneak: koroa, gorputza eta sustraia

1. **Koroa:** laser-sortak erasotzen duen lehenengo aurpegia da, piezaren goialdekoa. Koroa da solidifikatzen den azken gunea, beroa azken momentura arte jasotzen baitu. Soldadura optimoa izan dadin, koroak laua izan behar du eta gainazalaren maila berean egon, tentsio-kontzentrazioen guneak saihesteko.

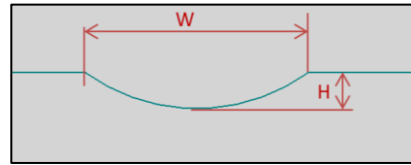
Hiru akats mota ager daitezke koroan (*H*: *height*, altuera; *W*: *width*, zabalera):

- 1.1 **Irtengunea edo fillet:** koroa lan-piezaren jatorrizko goiko gainazalaren mailaren gainetik geratzen da.



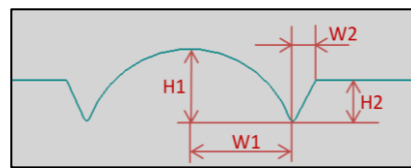
Irudia II.52: Irtengunearen irudi sinplifikatua

- 1.2 **Ahurtasuna:** koroa lan-piezaren jatorrizko goiko gainazalaren mailaren azpitik geratzen da.



Irudia II.53: Ahurtasunaren irudi sinplifikatua

- 1.3 **Hozkada:** bat-bateko sargune estuak dira, tentsio-kontzentrazioak handituz eta arrakalak sortzeko arriskua areagotuz.

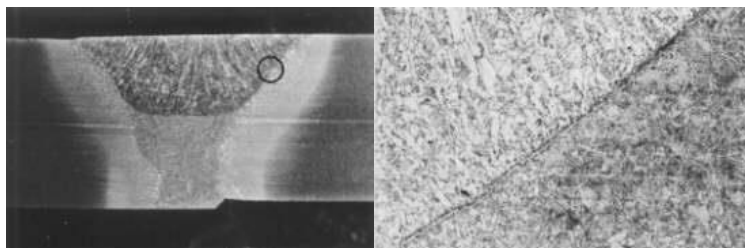


Irudia II.54: Hozkadaren irudi sinplifikatua

2. **Gorputza:** goiko eta beheko azalaren artean geratzen den solidotutako gunea da. Soldadura optimoa izan dadin, bertan ager daitezkeen porositateak eta urtu gabeko hutsuneak saihestu behar dira. Hortaz gain, penetrazioari dagoekionez, beheko gainazalera arte heltzea bilatzen da.

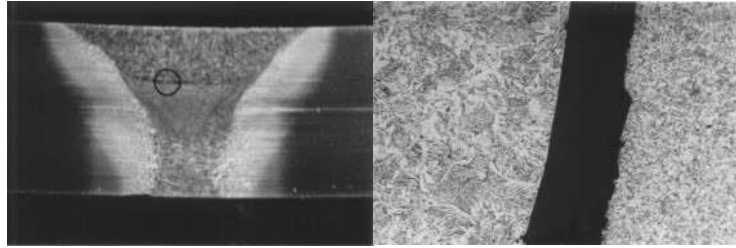
Urtze-gabeziak soldadura-kordoiaren eta oinarri-materialaren artean edo bi soldadura-kordoiaren artean elkartze-prozesua egokiro burutu ez direnoko gunek dira. Beraien artean, hiru akats talde daude:

- 2.1 **Urtutako oxidoen inklusioek sortutako urtze-gabezia edo urtze-gabezia purua:** oinarri-materiala eta urtutako metala ez dira elkartzen, lerro zuzen edo kurba bat agertuz. Oso akats larria da, egitura oso bat arriskuan jar dezakeena.



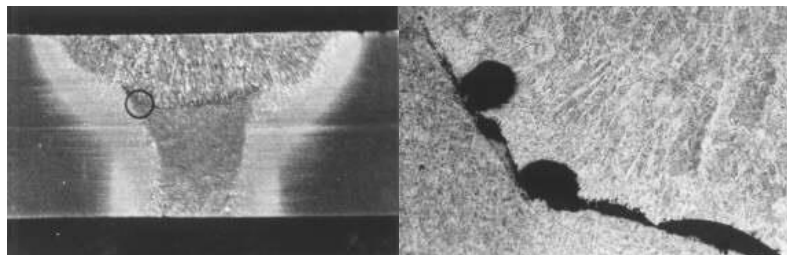
Irudia II.55: Urtze-gabezia puruaren xehetasuna

- 2.2 **Urtze-gabezia irekia:** solidotze- eta hozte-prozesuetan zehar agertutako barne-tentsioen ondorioz, elkartutako azalerek elkarrengandik banatzeko joera izaten dute, hutsune bat sortuz. Arrakala baten itxura du urtze-gabezia mota honek, kasu askotan bien artean desberdintzea zaila delarik.



Irudia II.56: Urtze-gabezia irekiaren xehetasuna

- 2.3 **Inklusio ez-metalikoek eragindako urtze-gabezia:** oxidoak edo inklusio ez-metalikoak agertzen dira toki hauetan. Oxidoa urtzen ez bada, inklusioak era uniformearen sakabanatzen dira. Aldiz, oxido hauek urtuz gero, inklusio ez-metalikoek itxura esferoidala izaten dute.



Irudia II.57: Inklusio ez-metalikoek eragindako urtze-gabeziaren xehetasuna

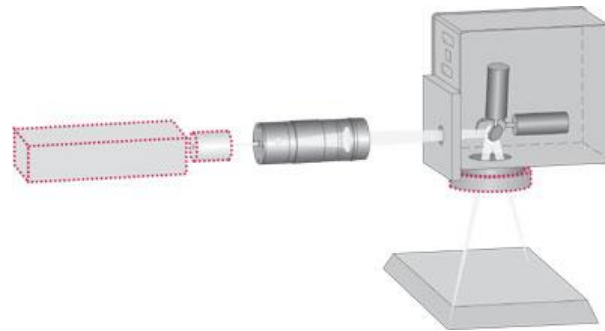
3. **Sustraia:** beheko gainazaleko gunea da. Guztirako penetrazioa lortzen denean, urtutako bolumenak pieza guztiz zeharkatzen du, beheko gainazalera helduz. Koroko irtengunean gertatu bezala, sustraian ager daitekeen akats ohikoena irtengunea da. Baina, kasu honetan, urtutako materiala beheko gainazalaren mailaren azpitik geratzen da. Hala ere, nahiz eta ohikoak ez izan, hozkak edo ahurtasunak ere ager daitezke.

Era berean, edozein soldaduratan poroak ager daitezke, tamaina maximoen balio onargarriak piezaren erabilera-eskakizunen menpe geratzen direlarik.

II.9. ESKANERRAK ETA OPTIKA MUGIKORRAK

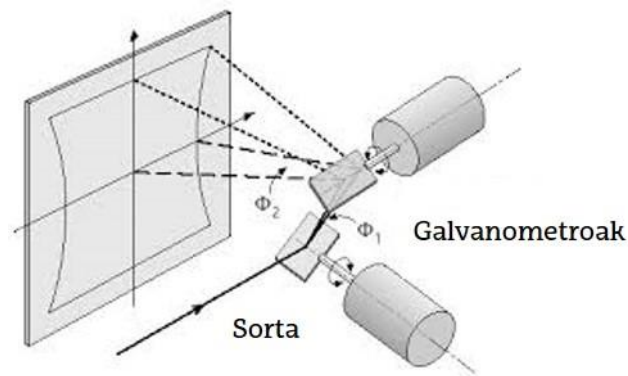
II.9.1. Eskanerren funtzionamendua

Urrutiko laser-soldadura industria arloaren ekoizpen-eskakizunei aurre egiteko teknika egokia da, denbora-tarte txikian hainbat prozesu buru ditzakeelarik. Hala ere, prozesuen bizkortasuna areagotzeko asmoz, sisteman optika mugikorak barnera daitezke.



Irudia II.58: Eskanerraren oinarritzko eskema

Galvanometroan ispilu mugikorrez osaturiko optika multzoa lente ohikoekin konbinatuz, laserrak igorritako sorta ispilu hauen aurka bidera daiteke, aldaratzeak eraginez eta puntu berdinetik abiatuz, lan-eremu bat sortuz. Horrela, abiadura oso handiko bi ispilu jarritz, kono itxurako eremua eraso dezake laserrak.



Irudia II.59: Galvanometroan ispiluen xehetasuna

Mota honetako sistema optikoari eskanerra deritzo, eta modulua robot batekin edo laserraren buruarekin batu daiteke, posizionatze-abiadura ohikoekin lortu daitezkeen abiadurak soberan gaindituz. Ispiluen dinamika malgu eta azkarrari esker, gailu hauek materialen gainazalean akabera eta testura anitz sortzeko erabil daitezke.

Eskanerraren ezaugarriak bera osatzen duten lente eta ispiluen neurri eta konfigurazioak zehazten dituzte. *Spota*, aitzinapen-abiadura, fokuen posizioa eta lan-eremua eskaner motaren arabera dira, azken bi ezaugarri hauek lauak ez diren azalerak edota pieza handiak lantzeko mugak ezartzen dituztelarik.

Hala ere, prezioari dagokionez, guztirako sistema multzoa eskaner gabeko laser azkarrago bat baino merkeagoa izaten da kasu askotan [Rofin, 2019].

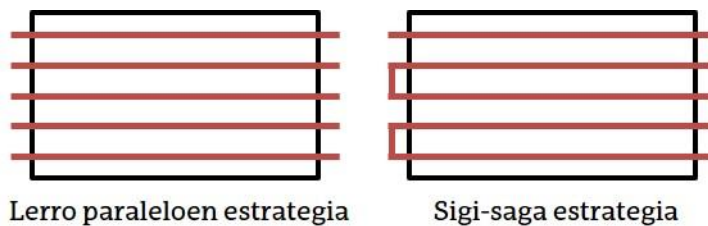


Irudia II.60: Optika mugikorraren makineria

II.9.2. Wobble teknika

Eskanerrek eskaintzen dituzten aukerei esker, laserrek higidura ezberdinak konbina ditzakete materialarengan era azkar eta efiziente baten eragiteko. Ekoizpen-kateetako geldialdi-denborak ahalik eta txikienak izatea bilatzen den moduan, era berean soldatze-prozesua bera azkartzeko eskanerrak erabil daitezke.

Lan-piezak elkartzeko burutu nahi den soldadura prozesuan *spot*aren neurriak bi piezen arteko hutsunea edo *gapa* gaindika erasotzeko gai izan behar du, zabalera egokia duen soldadura-kordioa sortuz. Beraz, *spot* txiki batekin lan egin behar denean, azalera handiak erasotzeko estrategia egokia aukeratu beharra dago, fresaketa prozesu batean egiten den legez.



Irudia II.61: Laserraren *spot*ak azalera handiagoa erasotzeko estrategiak

Aukeren artean, laserraren sortak lerro paraleloak edo sigi-saga moduko ibilbidea eginez bete dezake azalera, aitzinapen-abiadurarekiko elkartutak diren lerroak sortuz.

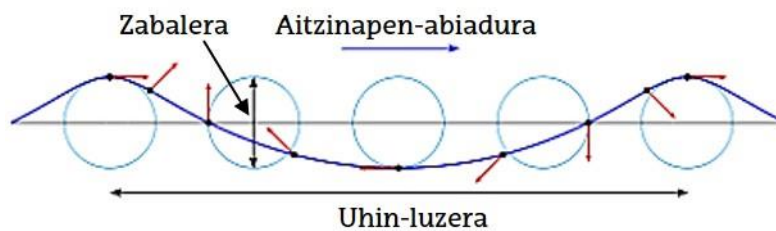
Lerro paraleloen estrategiak hurrengo ahulgunea dauka: prozesu ez-jarraia denez, hau da, *spot*ak lerro batetik bestera igarotzeko jauzi bat egin behar duenez, lerro bakoitzaren hasiera eta amaiera puntu asko sortzen dira. Ondorioz, solidotze-prozesuan hurrupadak agertzen dira eta soldadura-kordioaren homogeneotasuna galtzen da, tentsioak sor ditzaketen distortsio geometrikoak azaleratuz.

Sigi-saga estrategiarekin, nahiz eta prozesu jarraia izan, angelu zuzenak irudikatzen ditu *spot*ak, edozein mekanizate prozesutan kritikoak diren puntuak sortuz. Kasu honetan, angelu zuzen bat

eratzean, urtze- eta solidotze-prozesua bortxaturik dago baldin eta materiala isotropikoa bada. Hortaz, estrategia hau erabiliz gero, gune hauetan distortsio geometrikoak ager daitezke.

Estrategia hauetaz gain, soldadurarako aproposa den *wobbling* estrategia ere erabiltzen da. Horri esker, laserrak higidura trokoidalaren bidez egiten du aurrera soldadura-kordoa sortzeko, *wobble* deritzen mugimendu zirkularrak eginez. Prozesu jarraia izateaz gain, soilik hasiera eta amaiera puntu bi izango ditu soldadura-kordioak eta ez dira angelu zuzenik eratuko ibilbidean zehar, urtze- eta solidotze-prozesuek materialarengan duten eragina leunduz, hein batean era askean burutuko baitira.

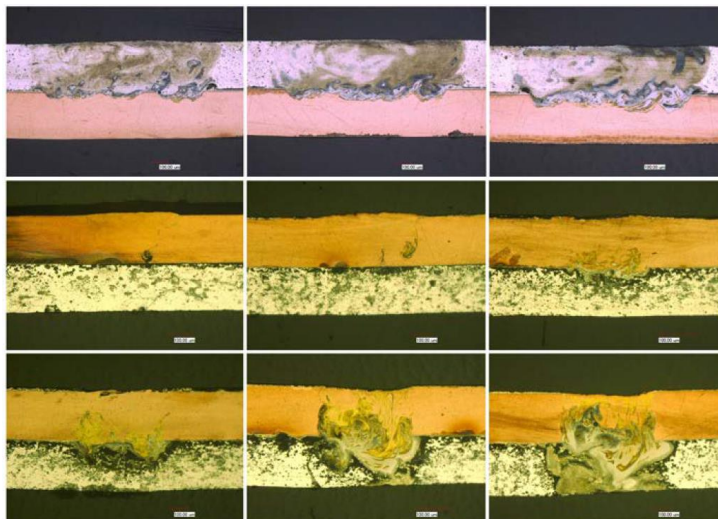
Gainera, *spot* bera higidura trokoidalaren bidez mugiaraziz, potentziaren, aitzinapen-abiaduraren eta abiadura-periferikoaren kontrola eta eragina kudeatuz, azalera ezberdinak eraso daitezke, nahi den emaitza lortzeko asmoz.



Irudia II.62: Higidura trokoidalaren oinarrizko eskema

Gauzak horrela, *wobble*-teknika fibrazko laserrek daukaten hurrengo muga garrantzitsuenetako bat gainditzeko erabil daiteke: *spot*aren neurri txikia.

Egun, industrian aplikazio zuzena duten produktuak sortzeko erabiltzen da *wobble*-teknika. Adibidez, autoetan erabiltako litio-ioizko bateriak eratzeko, Manz enpresak higidura trokoidala erabiltzen du, kalitate oneko soldadurak lortuz [Walter, 2015]. Torloju bidez loturiko bateria-zelulak sortu beharrean, *wobble* moduko teknika erabiltzea dute helburu, material ezberdinen arteko gainjarritako soldadurak erdietsiz.



Irudia II.63: Aluminioaren eta kuprearen arteko soldadurak wobble-teknika erabiliz [Walter, 2015]

III. Kapitulua. Industria aeronautikoa eta soldadura

III INDUSTRIA AERONAUTIKOA ETA SOLDADURA

III.1.SARRERA

Industria arlo bakoitzean, ekoizitako osagaiak lan-eskakizun zehatzak bete behar dituzte. Horiei eutsiz gero, teorikoki, sortutako produktuek edo egiturek egoki funtzionatzeko gaitasuna izango dute. Hala ere, diseinuaren etapa honetan, piezen helburuari erreparatzen zaio, arlo bakoitzaren bikaintasun-maila erabakigarria izango delarik. Logikoa denez, ez da berdina pieza bat etxeko tresneriarako edo espazio-ontzi baten osagai izateko bideratzea. Bigarrenak, bai diseinu bai fabrikazioaren aldetik, maila goreneko produktua izan behar du, baldintza gogorrek produktuen erabiltzaileen bizitza bera arriskuan jar dezaketelako.

Horregatik, osagaiak gutxieneko prestazio mekaniko eta termikoak bete ditzaten, segurtasun-koefizientea produktuen diseinuaren prozesuan sartu beharreko faktorea da. Koefiziente horren bidez, osagaiak beraien bizitza erabilgarrian zehar espero daitezkeen baldintzarik gogorrenak jasateko gai izango dira, segurtasun-tarte bat gehitzen zaielarik. Adibidez, etxe bateko zutabe batek, bere segurtasun-koefiziente altua dela eta, behar lukeena baino askoz ere pisu gehiago jasan dezake. Elementuak, hortaz, gaindimentsionaturik balego bezala jokatzeko du, zutabe hori lirainagoa izanda ere eraikinaren integritatea berma daiteke eta. Gaindimentsionamendu honen arrazoia, sarritan, produktuaren diseinuaren etapan soluzio errazena bilatu izana da. Egungo optimizazio programa zehatzen bidez eta lanerako baldintzak sarrera-parametro gisa sartuz, osagaiak behar luketen itxura optimoa eskura daiteke. Baina itxura horretako produktuak lortzeko, agian, fabrikazio-prozesu garesti eta luzeagoaren bidez baino ezin da lortu.

Izan ere, aeronautika bezalako bikaintasun-maila handiko arloetan, soldadurak pisu handia dauka, segurtasun-koefiziente minimoak bermatu eta egitura oso baten pisua murriztu egiten baita lotura-metodo honi esker. Industria aeronautikoko osagaien diseinuak eta fabrikazioak ahalik eta pisu gutxien duten egiturak eraikitzea dute helburutzat. Hegazkinetako osagai horien elkartzerako, errematxe, torloju eta buloien erabilpena saihestea bilatzen da.

Denbora luzez, errematxea fuselajearen xafla ezberdinak lotzeko teknika ohikoena izan da. Hala ere, arestian aipatu legez, diseinu- eta fabrikazio-etapek hegazkin arinak sortzea dute helburu, betiere bete beharreko hegaldi-baldintzak aintzat harturik. Fuselajeetaz gain, beste gune kritikoagoetan, motoreak eta turbinak kasu, bere tokia hartu du soldadurak, egitura osoaren pisua arinduz. Honek eragin zuzena dauka erregaien kontsumoan eta, ondorioz, hegaldien kostuan.

Teknologiaren garapen eta hobetzearekin, elektroi-sorta bidezko soldadurak sona handia lortu zuen 70eko hamarkadatik aurrera. Era berean, egun, laser bidezko soldadura, lotura-teknika tradizionalen ordeko lez agertzeaz gain, kalitate goreneko emaitzak eskain ditzakeen teknologia da [Steen, 2010]. Hegazkinek dituzten buloi edota errematxe moduko gehiegizko materialaren orde, laser-sorta bidez lotuz gero, guztirako pisua murriztea ahalbidetzen da, teknikaren eraginkortasuna frogatzen delarik [Zain-ul-Abdein, 2009]. Hortaz, eskain dezakeen bikaintasun-mailagatik, automatizazio-moldakortasunagatik eta huts-ganberaren beharrik ez duelako, laser-soldadura gero eta hedatuago dago aeronautika arloan.

III.2. TURBINAK ETA TAIL BEARING HOUSING

Hegazkinetan badaude baldintza gogor eta bortitzak pairatzen dituzten gune eta osagaiak. Hori dela eta, indar mekaniko handiak, azelerazio azkarrak, gradiente termiko altuak edota korrosioari aurre egin behar dietelako, hegazkinen osagaiak diseinatzean, motoreek oso azterketa zorrotzak eta neurtuak jasaten dituzte.

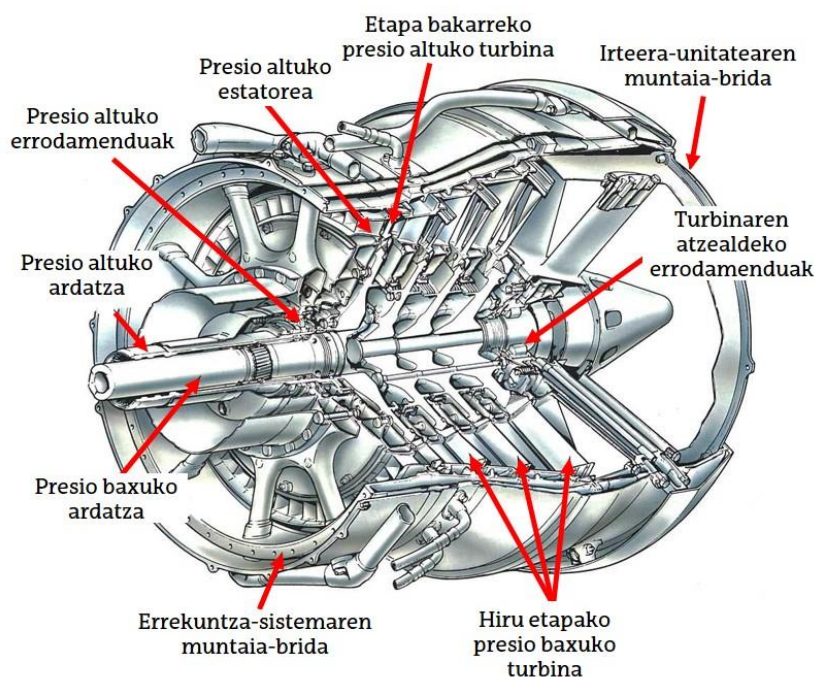
Motoreetatik irtendako erregaien gasak bideratzeko asmoz, turbinek hainbat atal eta osagai dituzte, beraien helburu nagusia konpresorea eta beste osagai laguntzaileak beharrezko potentziaz hornitzea delarik, horrela, baldintza egokietan lan egin dezaten.

Horretarako, errekuntza-ganberatik datozen gas beroak atera ostean, gasa turbinaren hasieratik amaieraraino hedatzen doa. Bide honetan zehar hainbat beso-bao etapa aurkituko ditu gasak, energia ateratzearen truke tenperaturaren eta fluxuaren presioen beherakada pairatuz.

III.2.1. Turbinaren funtzionamendua

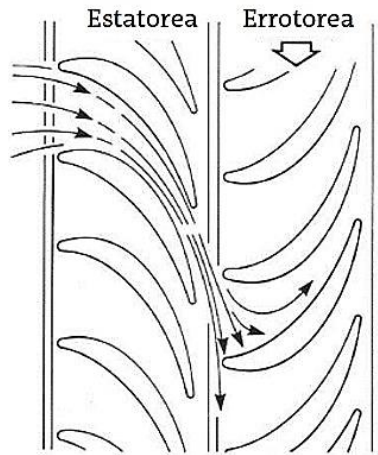
Turbina elementu mugikorrez eta geldikorrez osaturik dago. Energia ahalik eta modu eraginkorrenean ateratzeko, eragiketa hau bi urratsetan ematen da: presio altuko eta presio baxuko turbinetan (ikus Irudia III.1). Konfigurazio honen bitartez, turbina bakoitzak konpresorearen etapa ezberdinetara potentzia independenteki transmititzen du, kasu bakoitzean beraien biraketa abiadura optimoa bilatuz. Hori ahalbidetzeko, bi ardatz erabiltzen dira, bakoitzak dagokion turbina eta konpresorearen etaparekin bat egiten duelarik. Mota honetako motoreak konpresio-erlazio altua duten gailuetan erabili ohi dira.

Motor batzuk, bi atal izan beharrean, hiru turbina ezberdinez osaturikoak dira: presio altukoa, erdi-mailakoa eta baxukoa (ikus Irudia III.3). Konfigurazio honetan, ardatz kopurua handitu beharra dago eta motorrak hiru ardatz izango ditu.



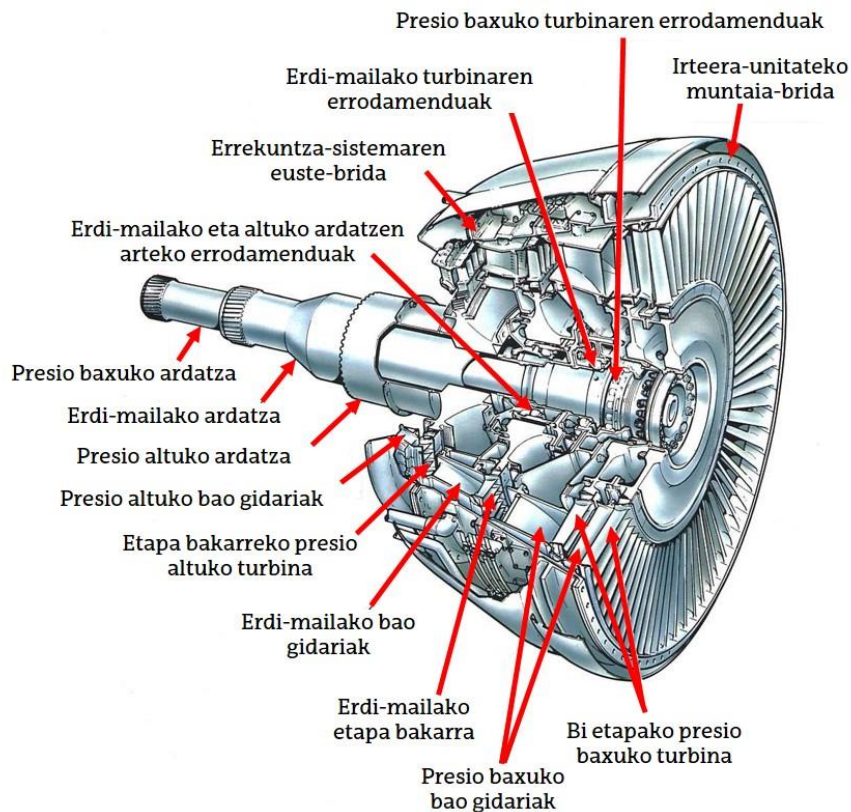
Irudia III.1: Bi ataleko turbina: presio altukoa eta baxukoa [Rolls Royce, 1986]

Beharrezko momentua lortzeko, turbina bakoitza etapa ezberdinetan zatitzen da, bakoitza estatore eta errotore batez osatua. Estatorearen besoak finkoak dira (*Nozzle Guide Vane – NGV*), bao itxurako osagai hauek fluxua bideratzen dutelarik, errotorera bidaliz. Azken hau, aitzitik, ardatzarekin beso (*blade*) eta diskoen bidez loturik dago, etaparen atal mugikorra osatuz. Puntu honetan, gas-fluxuak eta turbinak energia elkartrukutzen dute, konpresorera bidali beharreko potentzia erdietsiz.



Irudia III.2: Turbinaren etapen xehetasuna: estatorea eta errotorea

Turbinen diseinuan, mugarik handiena jasan beharreko baldintza termikoek ezartzen dute. Presio altuko turbinaren lehen fasean baldintza gogorrenak ematen dira, presio eta temperatura oso altuak jasanez. Adibide gisa, hegazkin zibiletan, errektuntza-ganberatik irteten diren gasek turbinan sartzerakoan 850 eta 1700 °C arteko temperatura izaten dute.



Irudia III.3: Hiru ataleko turbina: presio altukoa, erdi-mailakoa eta baxukoa [Rolls Royce, 1986]

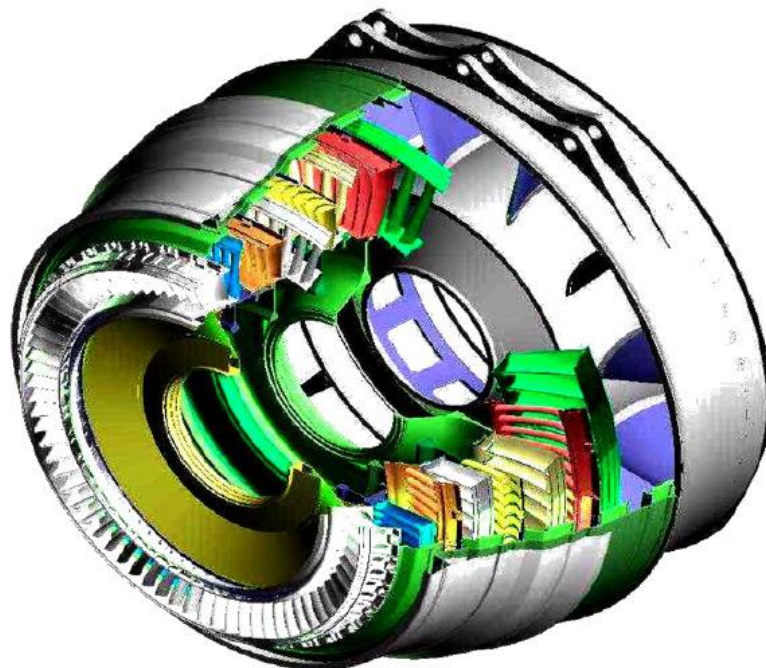
Hori dela eta, ezinbestekoa da turbinan erabiltzen diren materialak egoera bortitz hauei aurre egiteko gai izatea, lan-baldintza hauetan beraien propietate mekanikoak mantenduz eta egituraren segurtasuna arriskuan jarri barik. Batetik, kimikoki erresistenteak izan behar dute, korrosioarekiko erantzun egokia emanez. Bestetik, indar mekaniko handien aurrean arrakalak edota pitzadurak agertzea saihestu behar dute. Horrenbestez, helburu hori betetzeko, nikel oinarriko aleazioak erabiltzen dira turbina aeronautikoetan, Hastelloy X, Inconel 625 edota Inconel 718 moduko aleazio metalikoen erabilera ohikoa izanez motoreen gune kritikoetan.

III.2.2. Presio Baxuko Turbina

Atal hau (*Low Pressure Turbine – LPT*) hegazkinaren atzealdean kokatzen da, turbinan zeharreko gasaren hedatze prozesuaren azken fasea osatzen duelarik. Presio Altuko Turbinarekin konparatuz (*High Pressure Turbine – HPT*), baldintza termodinamikoak ez dira hain bortitzak, azken honek errekuntza-ganberatik datozen gasak zuzenean jasotzen baititu. Kasu batzuetan, 1700 °C-ko tenperaturak eta Mach 1etik gorako abiadurak jasan behar ditu. Presio baxukoetan, ordea, bai abiadurak bai tenperaturak askoz ere leunagoak dira eta materialek gutxiago sufritzen dute. Horregatik, honen fabrikaziorako Inconel 718 aleazioa egokia da, ikerlan honetan aztergai den materiala hain zuzen, eta hortaz, atal honetan presio baxuko turbinaren ezaugarri nagusienak azaltzen dira.

LPT moduko turbinek gasek emandako energia mekanikoan bilakatzea dute helburutzat, presio baxuko konpresorea mugitu ahal izateko. Guztirako turbina legez, *LPT*a fase ezberdinez osaturik dago: alde batetik, beso estatikoz osaturiko estatorea; bestetik, beso mugikordun errotoea.

Mota honetako bi fase hauek etapa ezberdinak osatzen dituzte, presio baxuko turbinen etapa kopurua konpresorearen potentziaren beharren menpe dagoelarik. Potentzia altuagoa lortu behar den heinean, etapa kopurua handitzen joango da.



Irudia III.4: Presio baxuko turbina

Gasak *LPT*an zehar bidaiatzen duenean, bere propietate termodinamikoak aldatuz doaz. Orokorrean, bere Mach abiadura, baoben hasierako eta irteerako egoerei erreparatuz, hurrenez hurren, 0,4 ingurutik 0,9 izatera igarotzen da. Hau da, *NGV*ek abiadura handitzen dute eta gasa beso mugikorren aurka angelu eta norabide egokiarekin bideratzen dute, galerak ahalik eta txikiak izan daitezzen.

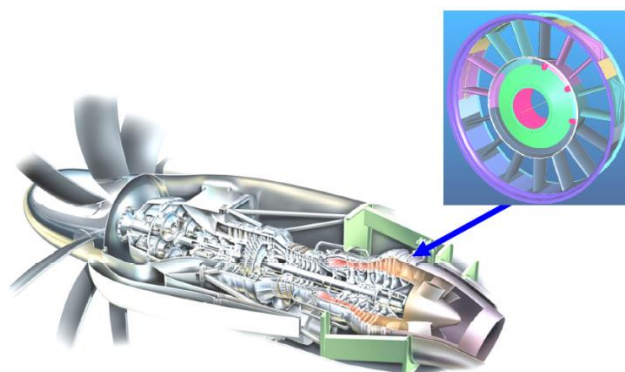
Honen ostean, beso mugikorrean dezelerazio prozesua pairatzen du gasak, $M=0,4$ izatera bueltatuz. Ondorioz, besoan euste-ingar bat agertzen da, eta diskoaren bidez turbinaren potentzia-ardatzari loturik dagoenez, momentu bat sortzen da, konpresoreak gasak konprimatzeko behar duen energia jaso dezan.

Eta ezberdinak zeharkatu ostean, gasa turbinaren amaierara heltzen da. Bertan, atmosferara irten baino lehenago, *Tail Bearing Housing* deritzon elementua aurkituko du gasak. Osagai honen zeregina bikoitza da: alde batetik, gasa ahalik eta era axialenean ateratzea da, horrela bultzada-ingar hobeezina bilatuz; bestaldetik, *TBH*ak turbina beraren egitura eta pisua eutsi behar ditu, hegazkinaren hegalararekin lotura osagai honen bidez egiten baita. Gainera, elementu hau atal txikiagoen soldadura bidez fabrikatzen da, hortaz, soldadura horien kalitatea bermatzea ezinbestekoa da motorraren portaera egokia ziurtatzeko. Hori dela eta, Inconel 718 aleaziozko atalen soldatze-prozesuak berebiziko garrantzia izango du.

III.2.3. Tail Bearing Housing – TBH - Atzealdeko euste-egitura

Osagai erradial hau errektorearen atzealdean kokatzen da, turbinaren amaieraren ostean. Ez dauka atal mugikorrik, guztiz estatikoa da, eta behin energia termikoa energia zinetikoa bilakaturik eta gasen hedatzea buruturik, *TBH*ak 650°C inguruko tenperatura daukaten gasen igarotzea jasateko gaitasuna izan behar du, Inconel 718 materialak legez.

Atal ezberdinen batzea gauzatzeko, bikaintasun-maila handiko soldaduren beharra dauka *TBH*ak, *EBW* edota *LBW* kasu.



Irudia III.5: *TBH*aren kokapena

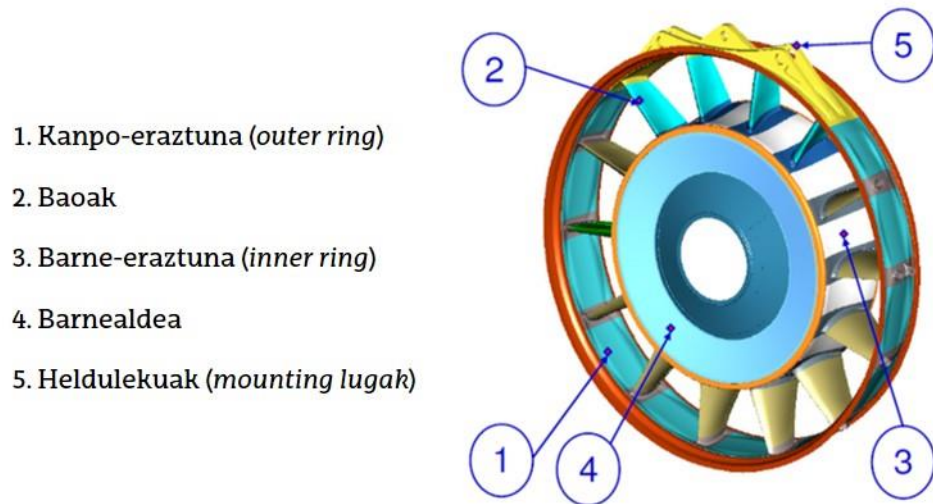
Hurrengo betebeharrak nagusiak ditu *TBH*ak:

1. Turbinatik konpresorera potentzia transmititzeko erabiltzen den ardatzeko errodamenduak osagaiaren konoan batzea. Honela, turbinak sortutako energia eta konpresoreak xurgatutakoaren artean ahalik eta galera gutxien egotea bermatzen da.

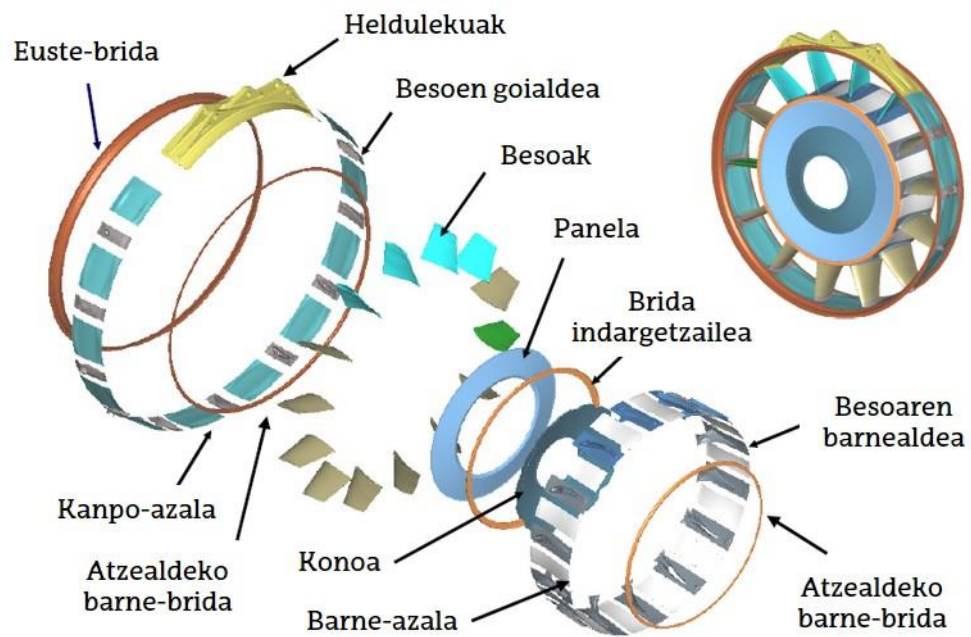
2. Motorra hegazkinarekin guztiz loturik egotea. Turbinek emandako bultzada ahalik eta handiena izan dadin, lotura honek garrantzi gorena dauka.
3. Motorrarekin ondo loturik egotea, bere garraiorako *TBH*tik eusten baita motorra. Horrela, garraiatzean kalteak saihesten dira.
4. Turbinatik irteten den fluxua hedatze-toberarantz bideratzea, ahalik eta norabide axialena lortuz eta bultzada-indarra optimizatuz.

*TBH*aren atal bakoitzak funtzio zehatza du, funtzioa euste soila edo fluxuaren birbideratzea izan daitekeelarik. Hurrengo atal nagusiek osatzen dute *TBH*a:

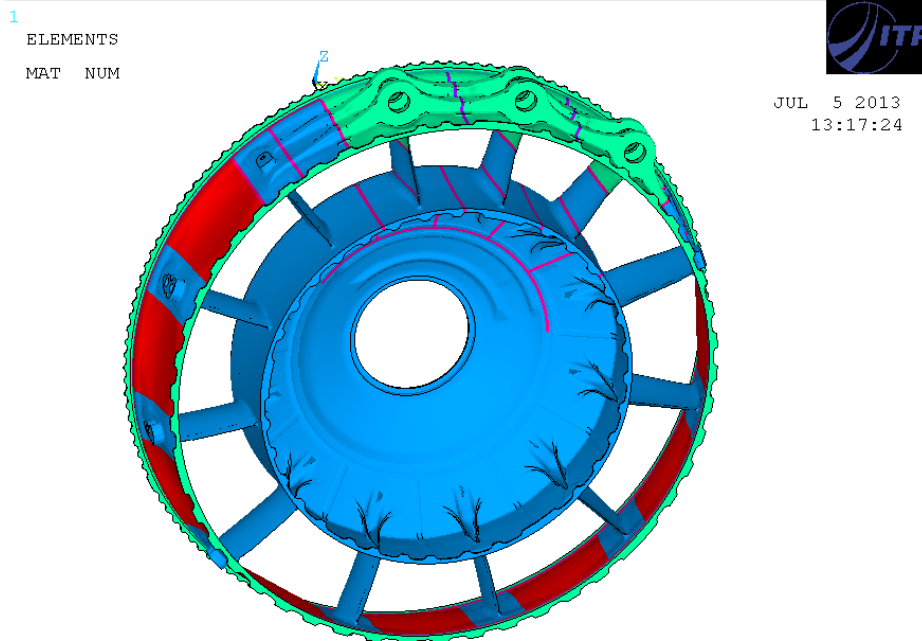
1. **Kanpo-eraztuna (*outer ring*):** baoen kanpoaldeko guneak batzen ditu, denak elkartuz. Hortaz gain, eraztun honen gainean euskarriaren heldulekuak edo *lugak* kokatzen dira.
2. **Baoak:** beso finkoak dira. Airearen fluxua birbideratzea dute helburutzat, beraien profil aerodinamikoari esker gasa axialki irtenaraziz. Lerdentasun handiko osagaiak dira, eta hegaldietako turbulenzien ondorioz, ziklo altuko nekea paira dezakete. Baoen artean, *lugen* azpian kokatzen direnak besteak baino lodiagoak dira, zamaren indar zuzena jasotzen baitute. Hori dela eta, bao hauei estrukturalak deritze.
3. **Barne-eraztuna (*inner ring*):** baoak barnealdearekin lotzen ditu. Turbinatik datorren aire beroarekin zuzeneko kontaktua dauka. Hala ere, bere eginkizuna hil edo bizikoa ez denez, atal honen fabrikazio-prozesuaren eskakizun-maila ez da hain zorrotza, malgutasun honek kostuak murriztea ahalbidetzen duelarik.
4. **Barnealdea:** kono edo diafragma (*baffle*) eta kanpo-panel batez osatua. Motorrera potentzia transmititzeko erabiltzen diren ardatzaren errodamenduak hemen kokatzen dira.
5. **Heldulekuak (*mounting lugak*):** errektuntza-prozesuaren bidez motorrak lortutako bultzada hegazkinaren egiturari guztiz transmititzea bermatzen dute. Hau da, errektorea aireontziarekin erabat loturik egotea ziurtatzen duten garrantzi goreneko atal estrukturalak dira. Era berean, motorra garraiatzerako orduan helduleku hauen bidez errektorea era fidagarri eta seguruan mugi daiteke. *TBH*aren diseinu kontserbadorea dela eta, helduleku batek huts eginez gero, beste helduleku biek egitura osoaren segurtasuna bermatzen jarraitzen dute.



Irudia III.6: TBHaren atalak



Irudia III.7: TBHaren atalen xehetasunak



20120213 Production model multilayer FATIGUE v42ML--E002 ECM RR-XWB-ITP-

Irudia III.8: TBHaren irudia Ansys programan (ITP Aero)

TBHa osatzen duten metalen superaleazioak, fabrikazio-prozesuaren arabera, hiru motakoak dira: galdaketa, forjaketakoa edo laminazioa.

Dentsitate-, bero-ahalmen- edota deformazio- kurbak, adibidez, burututako fabrikazio motaren menpe egongo dira. Era berean, fabrikazio mota berdinerako erabilitako ezaugarri ezberdinek (berotzeko tenperatura-gradientea, hozte-denbora, aplikaturiko presioa...) amaierako produktuaren kalitate-mailan eragin zuzena izango dute. Hau da, lortzen diren prestazio termomekanikoak eta hortaz, kalitate-maila, prozesua burutzeko erabili diren parametroen menpe egongo dira.

Adibidez, galdaketa-prozesua erabiliz gero, poroak eta hurrupadurak agertzeko arriskua handitzen da, eskainitako prestazioak mugatuz. Laminazio eta forjaketak bidez egindako atalak, ordea, kalitate onekoak dira. Nolanahi ere, xaflen lodiera mehe eta ia konstanteak materialaren isurpen-lerroen orientazio egokia eta banaketa uniformeduna ahalbidetzen ditu, kalitateari dagokionez forjaketakoei gailenduz. Ondorengoak dira TBHaren atal desberdinen fabrikaziorako erabiltzen diren prozesuak:

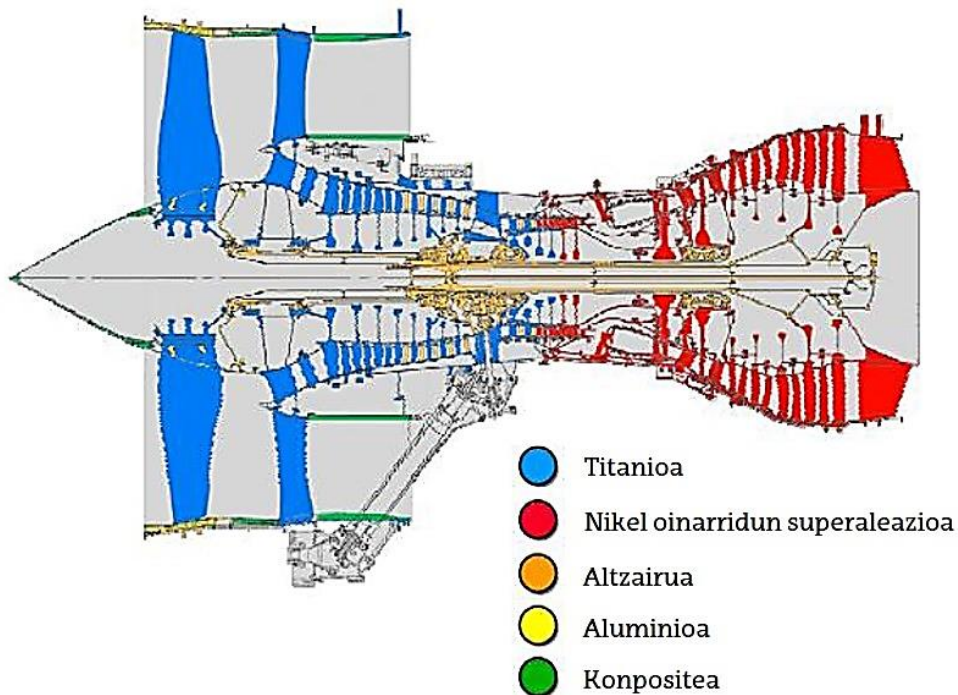
1. **Baoak:** galdaketa.
2. **Kanpo-eraztuna (outer ring):** forjaketak eta xaflak.
3. **Barne-eraztuna (inner ring):** galdaketa.
4. **Heldulekuak (mounting lugak):** forjaketak.
5. **Barnealdea:** galdaketa.

III.3. ALEAZIOAK MOTORE AERONAUTIKOETAN

III.3.1. Motoretako materialak

Bere arintasuna eta propietate mekanikoak aintzat harturik, titanioa asko erabiltzen da turboerreaktoreen ekoizpenean. Dena den, behin errektuntza-ganberan sarturik, gasek hartzen duten temperatura-maila ez da titanioarentzat jasagarria. Beraz, errektuntza-ganberatik aurrera, nikel oinarritun superaleazioak erabili ohi dira, nahiz eta azken hauek titanioa baino pisutsuagoak izan.

Erreaktorearen ardatzaren kasuan, altzairu martensitikoak erabiltzen da. Material honek erresistentzia mekaniko oso altua du, eta bihurtura indarrei aurre egiteko egokia da. Hortaz gain, aluminioa edota konpositeez osaturiko guneak daude, baina askoz ere proportzio txikiago batean.



Irudia III.9: Motore aeronautikoaren materialak [Spittle, 2003]

Baldintza termikoen ezagutza premiazkoa da errektorearen atalak diseinatzean, guneen arabera erabilitako aleazioen konposizioa moldatu eta propietate termiko edota mekaniko ezberdinak lor daitezkeelarik. Turbinaren sarreran gasek 1700 °C izatera hel daitezke, oso eremu termiko bortitza sortuz. *TBH*aren gunean, aldiz, 650 °C inguru izaten dira. Nahiz eta temperatura altua izan, turbinaren sarrerakoarekin alderatuz, askoz ere txikiagoa da.

Aeronautikako arloan kostu onargarria eta egituraren segurtasuna bermatuko duten aleazioak bilatzen dira. Hortaz, *TBH*aren kasuan, erabiltzen den nikel superaleazioak burdina gehiago dauka, nikel proportzioa txikiagotuz eta, ondorioz, osagaiaren kostua murriztuz. Aleazio hauen artean Hastelloy X, Inconel 625 eta Inconel 718 gailentzen dira, azken hau lan honetarako oinarri gisa erabili delarik.

Nikel oinarridun aleazio hauek aplikazio zuzenak dituzte industria aeronautikoan, ondo kudea baitezakete bai karga eta temperatura-gradiente handiko egoerak, bai kimikoki erasokorrak diren guneak. Tenperaturarekiko sendotasuna, egonkortasun kimikoa eta korrosioarekiko erresistentzia onak ezaugarri egokiz hornitzen dituzte aleazio hauek. Gauzak horrela, motore aeronautikoen osagaien % 50 nikel oinarridun materialez ekoitziak daude [Venkatesan, 2016].

	Hastelloy X	Inconel 718
T_{sol}	1260	1260
T_{liq}	1355	1336
ρ	8240	8190
α	2,85	2,5
C_p	0,439	0,435
λ	10,3	8,9

Taula III.1: Hastelloy X eta Inconel 718 aleazioen propietateen alderaketa [Mills, 2002]

III.3.2. Inconel 718: propietateak eta aplikazioak

Nikel oinarridun superaleazio hau turbinetako osagaietan erabilitakoena da. Bestalde, *TBH* deritzon osagai estatikoaren atal ugari material honekin eginak daude. Hori dela eta, lan honetan Inconel 718-aren urrutiko laser bidezko soldaduraren azterketa sakona egitea erabaki da.

III.3.3. Ezaugarri nagusiak

International Nickel Company enpresak 1962an aleazio hau garatu zuen, eta egun, Inconel 718 munduan gehien erabiltzen den nikel oinarridun superaleazioa da. Bere propietate mekaniko bikainez gain, kostu baxua eta prozesatze erraza eskaintzen ditu. Hala ere, propietateak eta segurtasuna mantentzeko, bere lanerako tenperaturaren muga 650°C ingurukoa da. Hortaz, *TBH*aren atalen oinarri-materiala izateko egokia da, gasen tenperatura maximoa aipatutakotik gertu egon arren, muga hau ez duelako gainditzen [Fu, 2010].

Izen komertzial ezagunena Inconel 718 izan arren, fabrikatzaileen arabera beste izen batzuk har ditzake: Allvac 718, Udimet 718, Pyromet Alloy 718, Haynes Alloy 718, Lescalloy 718, Inconel Alloy 718SPF, UNS N07718... Hortaz gain, fabrikazio prozesuaren arabera, era ezberdinetan izendatzen da, lortutako propietateak aldatzen baitira: AMS 5596 (xafiak), AMS 5562 (barrak, forjaketa eta eraztunak), AMS 5589 (hodiak)...

Inconel 718-ak ez du konposizio kimiko finkorik, bera osatzen dituzten elementu kimikoak tarte batean aurki daitezkeelarik. Horretarako, erakundeek edo industriek arauak garatuak dituzte, kantitate horien mugak ezarri.

	AMS 5832	MSRR 7001
C	≤ 0,08	0,02 – 0,08
Si	≤ 0,35	≤ 0,03
Mn	≤ 0,35	≤ 0,03
P	≤ 0,015	≤ 0,015
S	≤ 0,015	≤ 0,008
Al	0,2 – 0,8	0,3 – 0,7
B	≤ 0,006	0,002 – 0,006
Co	≤ 1	≤ 1
Cr	17 - 21	17 - 21
Cu	≤ 0,3	≤ 0,2
Fe	Hondarra	Hondarra
Mo	2,8 – 3,3	2,8 – 3,3
Ni	50 - 55	50 - 55
Ti	0,65 – 1,15	0,75 – 1,1
Nb + Ta	4,75 – 5,5	4,8 – 5,5

Taula III.2: Inconel 718 aleazioaren konposizio kimikoa hurrengo arauen arabera: AMS (Aerospace Material Specifications) eta MSRR (Material Specifications of Rolls Royce)

Aleazio honetan nikela, kromoa eta molibdenoa dira nagusi. Hala ere, beste elementu batzuk, nahiz eta kantitate txikiagoetan agertu, propietateak aldatzeko gaitasuna dute. Horien artean: karbonoa, silizioa, manganesoa, sufrea, aluminioa, boroa, kobaltoa, kuprea, burdina, titanioa, niobioa, tantalioa, selenioa, bismutoa, magnesioa eta tungstenoa. Hala ere, boro eta sufre kontzentrazio altuegiek mikroarrakalak sortzeko arriskua areagotzen dute, beraz, elementu hauek arreta bereziaren beharra dute.

Inconel 718 materiala era askotan prozesa daiteke, bete beharreko eskakizunen arabera mikroegitura eta akabera ezberdinak lortuz. Aleazio soldagarria da eta deformazioaren ondorioz ager daitezkeen arrakalei aurre egiten dio material honek. Hala ere, soldatze-prozesua ondo kontrolatu beharra dago erdietsi beharreko prestazio mekanikoak lortzeko. Aeronautikako gas-turbinetan erabiltzeaz gain, beste arloetan ere aplikagarria da Inconel 718 aleazioa: ganbera kriogenikoetan, ponpen egituretan, bultzada alderantzikatzaileetan, erreaktore nuklearretan, berotako estrusio-gailuetan edo erresistentzia handiko torlojuetan [Anderson, 2006].

III.3.3.1. Barne egitura

Ale tamainari dagokionez, tamaina txikiagoa izan ahala, gero eta neke mekanikoarekiko erresistentzia altuagoa lortzen du Inconel 718 aleazioak. Bero-tratamendu zehatzak burutuz, galdaketan egiten den legez, materialaren soluzio-tenperatura baxuak lortzen dira, ale txikiak sortuz. Honek nekearekiko propietatek hobetzen ditu.

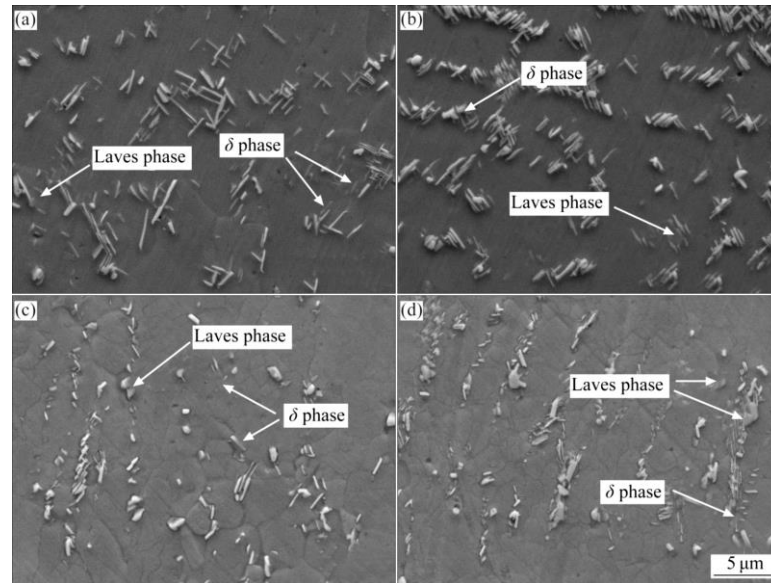
Dena den, neke termikoari eta *creep* efektuari aurre egiteko, alearen tamaina handiagoa izatea komeni da. Hortaz, fabrikatze-prozesuaren arabera, propietate ezberdinak dituen Inconel 718 aleazioak lor daitezke.

Inconel 718 aleazioaren saretze nagusia δ fasea duen γ matrizea da, nikela oinarria delarik. Fase eta prezipitazio mota anitz ditueneguz, egituren tamaina, banaketa eta kokapena era askotakoak dira [Radavich, 1997].

γ' eta γ'' motako prezipitazioak karburo, nitruro, boruro eta karbonitruoekin batera azal daitezke. Horietaz gain, materiala ahul dezaketen faseak ager daitezke. Fase nagusien artean, hurrengoak daude:

1. **Gamma matrizea (γ):** fase austenitikoan dagoen aurpegietan zentratutako egitura kubikoko saretzea da (*Face Centered Cubic - FCC*) eta kobaltoa, burdina, molibdenoa eta kromoa era solidoan barneratzen ditu. Deformazio eta tenperatura altuen ondorioz, gogortu egiten da, sortutako niobio, aluminio edo titanio prezipitazioek bere gogortasuna areagotzen baitute [Knock, 2010].
2. **γ' fasea:** matrize nagusiarekin bat eginez, bere egitura kristalinoa aurpegietan zentratutako egitura du. Bere prezipitazioek, ohikoenak $\text{Ni}_3(\text{Ti},\text{Al})$ direlarik, gogortasun apur bat gehitzen diote aleazioari [Slama, 1997]. Fase hau materialaren guztirako bolumenaren % 50 izatera hel daiteke [Gustafsson, 2010].
3. **γ'' fasea:** beste aleazio nagusietan ez bezala, fase honek egiten dio ekarpen handiena materialaren gogortasunari. Gamma matrizearekin koherentea den gorputzean zentratutako egitura tetragonala du (BCC), burdina dagoen inguruan nikela eta niobioa Ni_3Nb prezipitazioak sortuz [Anderson, 2017]. Hala ere, 650°C-ko muga gaindituz gero, gogortasuna leuntzen da, tetraedroak itxura ortorronbikoa hartuz eta δ fasera igaroz.
4. **δ fasea:** tenperatura 650°C-ko mugatik gora igoz gero, γ'' fasearen desagertzen doa eta δ fasea azaltzen da, niobio eta nikel prezipitazio ortorronbikoen bitartez. Beraz, derrigorrezkoa da δ agertu aurretik γ'' egotea. Termodinamikoki γ'' baino egonkorragoa izan arren, ia ez dio aleazioaren gogortasunari ekarpenik egiten [Azadian, 2004].
5. **σ fasea:** elementu intermetalikoez osaturiko fasea da. Nahiz eta proportzio txikietan agertu, aleazioari hauskortasuna baino ez dio gehitzen [Subramanian, 1996]. Kromoaren eta molibdenoaren kontzentrazioek eragin zuzena dute bere agerpenean.
6. **Laves fasea:** fase honen agerpenak, σ faseak bezala, aleazioaren hauskortasuna handitzen du. Ezpurutasunen existentziak, silizioa kasu, fase hau agertzea errazten du. Hortaz, bere eragina txikiagotzeko, fabrikazio-prozesuan zehar 1065-1080°C lortzean

homogeneizazio-etapa burutzen da, materiala tenperatura honetan denbora batez mantenduz eta gerora giro-tenperaturan hozten utziz [Muralidharan, 1996].



Irudia III.10: Inconel 718 soldadura eta fase ezberdinen agerpena: a) Soldaduraren barnealdea zeharkako norabideko tentsiogunean; b) Soldaduraren muga zeharkako norabideko tentsiogunean; c) Soldaduraren barnealdea luzerako norabideko tentsiogunean; d) Soldaduraren muga luzerako norabideko tentsiogunean [Qu, 2012]

III.3.3.2. Laser bidezko soldadura

Inconel 718 soldabilitate ona duen materiala da. Gainera, aleazio honek erresistentzia ona eskaintzen du solidotze-prozesuan ager litezkeen arrakalei aurre egin ahal izateko. Dena den, Inconel 718 aleazioak poroak eta mikropitzadurak izateko joera du [Ram, 2005]. Poroen agerpenean, aleazioak kromoa izateak eragin zuzena du. Elementu honek soldatze prozesuan azaltzen diren oxigeno, hidrogeno eta nitrogeno gasekin afinitatea dauka, eta beraz, poro gutxiago agertzea ahalbidetzen du. Hala ere, nahiz eta kromoarekin poroen agerpena murriz daitekeen, blindatze-gasek laguntza gisa erabili ohi dira [Davis, 2000].

Laser-sorta bidezko soldadurari dagokionez, soldadurek azaltzen dituzten propietateak egokiak dira aeronautikako arloan aplikazio industrial zuzena izan dezaten [Zapirain, 2011]. Inconel 718-aren isurpen-tentsioak beharokada nabarmena pairatzen du 650°C-ko tenperatura gaudituz gero [Anderson, 2006], baina tenperatura altuen ondorioz deformazio plastikoak agertu arren, piezek lanerako baldintza termomekanikoak bermatzen jarrai dezakete laserra erabiliz gero [Qu, 2012].

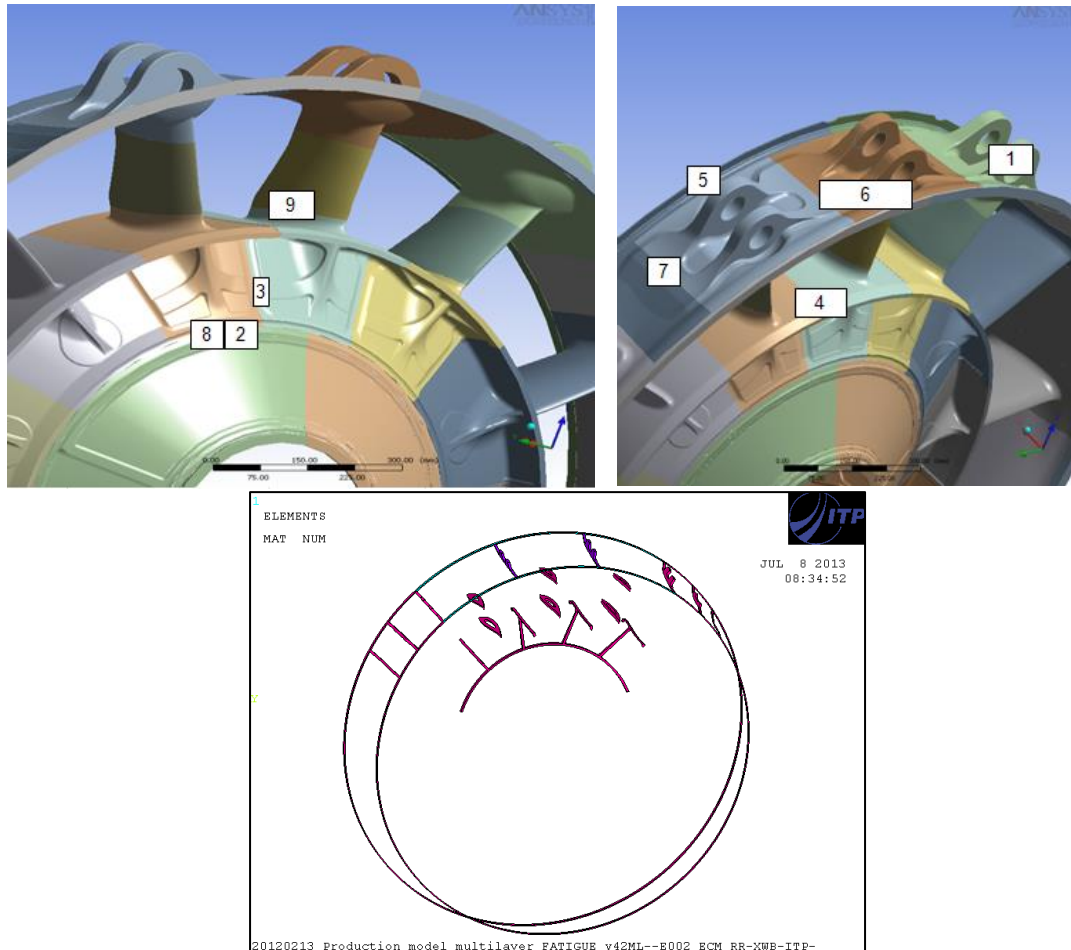
Era berean, beste teknikekin alderatuz, laser-sortak bidez fabrikaturiko soldadura-guneek mikroegitura finagoa aurkezten dute eta niobioak kontzentrazio txikiagoa du soldadura kordioan. Alderdi bi hauek, hauskortasuna murrizten duten heinean, onuragarriak dira tenperatura altuekin lan egiteko [Ram, 2005].

III.4.TBHaren GUNE SOLDATUAK

Soldadutako guneak, oinarri-materialarekiko propietate mekanikoen jeitsiera bat pairatzen duten heinean, kritikoki aztertu beharreko tokiak dira. Are gehiago, kasu honetan TBHak motorearen pisua eutsi eta bultzada-indar erraldoiekin lan egin behar duenean.

TBHan atalen lotura homogeneoa (fabrikazio mota berekoen artekoa) edo heterogeneoa (fabrikazio mota ezberdinen artekoa) eman daiteke. Heterogeneoa ematekotan, gune soldatuei propietate txarrenak dituen aldearenak atxikitzen zaizkio, diseinua eta segurtasun-koefizienteak era kontserbadorean ezarriz.

Soldatze-prozesu ohikoena elektro-sorta bidezko soldadura den arren, laserraren garapenak alternatiba gisa agertzeko aukera eman dio teknika honi.



Irudia III.11: TBHaren atal ezberdinen soldadura guneak (ITP Aero)

Lotura	Lotutako atalak
1	<i>Lug12-Lug1</i>
2	Konoa-BCV1
3	<i>BCV1-BCV2</i>
4	<i>BCV1-BCV12</i>
5	<i>Lug2-ROF</i>
6	<i>Lug12-Lug1</i>
7	<i>Lug2-Trantsizio-azala</i>
8	Konoa-BCV1
9	Baoa1-BCV1

Taula III.3: TBHaren atal ezberdinen soldadura gunek: *Lug*: heldulekuak; *BCV*: *Bottom Core Vane*; *ROF*: *Rear Outer Flange* (ikus Irudia III.11)

III.4.1. Baoen loturak

Beso estatiko hauen helburua fluxua ahalik eta axialen berbidaratzea da. Bere lirintasunak eta indar mekaniko handien menpe egoteak soldaduren bikaintasuna zaintzea galdegiten dute. Alde batetik, hegaldian zehar sor litezkeen ezegonkortze bibrazioei aurre egiteko eta, bestetik, atalen arteko lotura finkoa ahalbidetzeko. Segurtasun-maila bermatuz, soldadurek beraien ekarpena egin diezaiokete egituraren galeren txikiagotzeari.

Baoak galdaketa prozesu bidez fabrikatzen dira, hau da, burdinurtuak dira. Horregatik, oxido eta porositateen agerpenarekin arazoak azal daitezke, eta muntatze eta soldatze prozesuak burutu aurretik, atal hauek ikuskapen zorrotzaren beharra dute, soldadurei arreta berezia eskainiz.

Baoen artean, bi talde daude:

1. Bao estrukturalak: muntatze-heldulekuen azpian aurkitzen dira, TBHaren pisuaren gehiengoa jasanez. Bere zurruntasuna bermatzeko, lodiak izaten dira. Kanpo-eraztuna hiru azpiatalez osturik dago: *mounting lugak* (forjaketa), trantsizio-azalak (xafalak) eta eraztun zirkunferentziala (forjaketa). Barne-eraztuna, aldiz, galdaketa prozesu bidez eginga dago, eskakizun-maila baxua baitu. Hortaz, baoen soldatutako gunek galdaketa hartuko dute oinarri-materialtzat, propietate baxuenak dituen prozesua delarik.

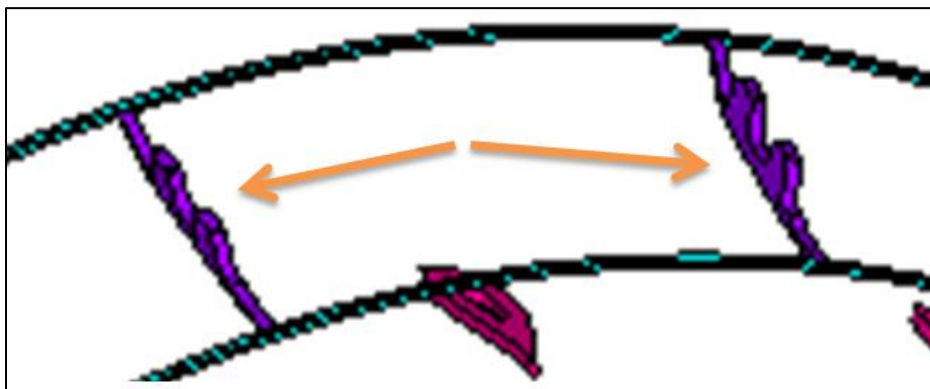


Irudia III.12: TBHaren bao estrukturalen soldadura guneak

2. Bao ez-estruturalak: ez dute karga mekaniko eta termikoaren zati handiena jasan behar. Bao estruturalekin alderatuz, fabrikazio prozesua ez da hain zehatza eta ez dute hain ikuskapen-maila handirik. Pieza bakarrean eginak daude, kanpo-eraztunarekin kontaktuan dagoen gunea, barne-eraztunarekin lotzen dena eta beraien arteko besoa bera atal bakarra osatzen dutelarik.

III.4.2. Heldulekuen arteko loturak

Forjaketaren prozesuaren bidez fabrikatutako osagaiak dira, materialari kargei aurre egiteko propietate onak esleituz. Hortaz, *lugen* arteko soldadura aztertzean, oinarri-materialtzat forjaketakoa hartzen da.

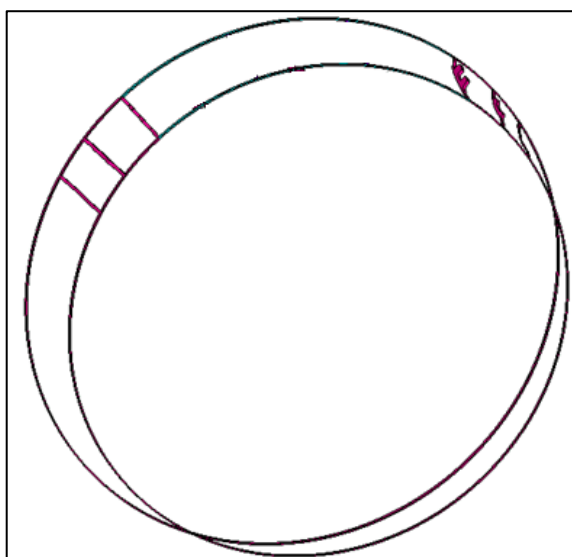


Irudia III.13: TBHaren Lug edo heldulekuen soldadura guneak

III.4.3. Kanpo-eraztunaren loturak: zirkunferentzialak eta axialak

Kanpo-eraztunean trantsizio-xafren arteko eta eraztunaren kanpoko gunearen loturak soldadura bidez burutzen dira. Azken gune honek brida zirkunferentzial zulatuak biltzen ditu, beste brida batzuekin buloi eta torloju bidez lotuak izan daitezkeen., beraien oinarritzko kalitatea forjaketa materialarena delarik.

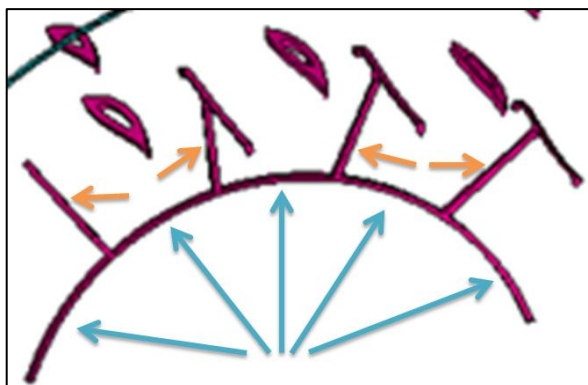
Soldadura axialei dagokienez, hauek xafiak beraien artean lotzeko erabiltzen dira, maila goreneko loturak eskainiz.



Irudia III.14: TBHaren kanpo-eraztunaren soldadura axialen eta erradialen guneak

III.4.4. Konoaren loturak

Baoak eta konoa lotzeko soldadurak dira. Beste gune batzuekin erkatuz, eskakizun-maila baxuagoa dute, eta galdaketa bidez egindako atalak direnez, soldaduren diseinu eta azterketan oinarri-materialtzat burdinurtua hartzen da.



Irudia III.15: TBHaren baoen beheko guneen eta konoaren arteko soldadura gunek

III.5.LASER SOLDADURARAKO MAKINERIA

Laser bidezko soldadura prozesua burutzeko hainbat makina mota erabil daitezke, helburu den osagaiaren geometriaren eta baliabide ekonomikoen menpe. Teknologia honen indarguneetako bat automatizatze moldakortasuna den heinean, enpresek aukera anitz eskaintzen dituzte, bezeroek beraien beharrei ondoen egokitzen dena hauta dezaten. Hala ere, zehaztasun ezberdinak izan arren, makina guztiek atal amankomun batzuk dituzte.

Sorgailuak edo erresonadoreak, orokorrean, ez dira mugitzen eta estatikoki lan egiten dute, eta beraiangandik sorta lenteetara bideratzeko eginkizuna gida baten bitartez burutzen da. Laser-sorta enfokatzeko duen lente optikoen sistema, ordea, mugikorra da. Horrekin batera, pieza ere mugitu dezakeen kate zinematikoa izan dezake makinak.

Laserraren funtzionamendu zehatzaz gain, makinek hozte-sistema eta sistema laguntzaileen beharra dute. Lehenak, bero galerak kudeatzeko eta bigarrenak prozesuaren hobetze eta segurtasuna bermatzen dute: blindatze-gasaren hornitzea, kea kanporatzeko sistemak, lan eremua zaintzeko gailuak...

Prozesuaren betebeharren arabera, makinaren konfigurazio orokorra hainbat alderdiren menpe dago. Alde batetik, piezen tamaina eta beraiek lantzeko gauzatu behar diren ibilbideak (2D, 3D, simetria duten piezak...). Honek optika alde batetik bestera mugitu beharra baldintza dezake (optika hegalaria deritzo), pieza handietako gune ezberdinetara heldu ahal izateko. Sortaren garraiatzea burutzeko, gidatze-sistema ezberdinak daude:

1. **Zuntz optikoa:** posizionatzeko askatasun-maila handia du, baina hauskorra da eta ezin da CO₂-ko laserretan akoplatu. Laser industrialetan erabili ohi da.
2. **Makina kartesiarretarako hodi teleskopikoak:** sistema konplexua da eta zuntza baino zailago lerrokatzen da. CO₂-ko laserretarako baliagarria.
3. **Beso artikulatuak:** CO₂-ko laser bidez tamaina txikiko piezak lantzeko erabiltzen da.
4. **Eskanerra edo galvo-sistema:** sakonera mugatua duten bi edo hiru dimentsiodun prozesueta erabiltzen da. Laser industrial guztiekin moldagarria eta abiadura handikoa da, baina kalitate gehien galtzen duen sistema da.

Bestetik, ekoizpen prozesuak edota landu beharreko materialaren eskakizunek eragin zuzena dute makinaren soldatze abiaduren eta azelerazioen aukeraketan. Hauek handituz gero, makineriaren zehaztasun-maila handitu beharra dago, inertiak eta balaztatzeak kudeatzeko.

Laser makineriaren sailkapena:

1. Bi dimentsiodun makineria:

- 1.1. **Optika hegalariaekin:** optika hiru ardatzetan mugitu daiteke, pieza geldi dagoelarik. Tamaina handiko piezen ebaketa burutzeko erabili ohi dira.

- 1.2. **Optika estatikoarekin:** optikak ardatz bakarrarekin lan egiten du, piezak beste bi ardatzetan mugi daitekeelarik. Makina konbinatuekin lan egiteko erabiltzen da, baina piezaren tamaina muga izaten da.
 - 1.3. **Optika hegalaria eta ardatz birakorrarekin:** optikak bi ardatzekin lan egiten du eta piezak beste birekin. Bi dimentsiodun hodiak lantzeko edo gainazalarekiko elkartuta den laserra erabiltzeko dira.
2. **Ardatz anitzeko makineria:**
- 2.1. **Optika hegalaria biraketa bikoizdun buruarekin:** pieza geldirik dago eta optikak bost ardatzekin lan egiten du. Hiru dimentsiodun piezak lantzeko baliagarria da.
 - 2.2. **Optika hegalaria biraketa bikoizdun buruarekin gehi ardatz birakorra:** kasu honetan, optikak bost ardatzekin lan egin dezake, baina piezari biraketa ardatz bat esleitzen zaio. Hiru dimentsiodun hodiak prozesatzeko erabili ohi da, laserrak lan-pieza era zeiharrean eraso dezake eta.
3. **Robotak:** optika hegalaria robot bati atxikia dago, sei ardatzeko sistema lortuz. Horta gain, piezari ardatz bat eslei dakiok.



Irudia III.16: Ardatz anitzeko soldadura-robotak (KUKA, Trumf)



Irudia III.17: Bi dimentsiodun soldadura-makineria (Bergmann Steffen)

IV. Kapitulua. Eredutzearen eboluzioa

IV EREDUTZEAREN EBOLUZIOA

Egungo industrian bero-iturrien erabilera ekoizpen-kateen parte da. Produktu ezberdinak fabrikatzeko, piezengan eragina duten temperatura-aldaketak inposatu ohi dira, helburuen arabera prozesu termikoak kudeatuz.

Galdaketa, tratamendu termikoak, beroko ijezketa edo forjaketa... Hainbat era daude beroaren bidez materialak landu, deformatu edota propietateak aldatzeko. Guzti hauek indar mekanikoekin uztar daitezkeen fabrikazio-prozesuak dira, emaitzen sorta amaigabea lortuz. Irtengo diren amaierako produktuen ezaugarriak ezagutzeko, industrietan aukera ezberdinak dituzte. Adibidez, saiakuntza esperimental ugari egitea, bakoitza enpirikoki analizatuz eta sarrera- eta irteera-parametroen arteko erlazio bat bilatuz. Honek izugarritzko kostua suposatzen du, bai ekonomikoki bai denbora aldetik. Beste aukera bat emaitzen kalkulua hurbildua egitea da, aurreko saiakuntzetatik lezkean estatistikak aztertuz.

Dena den, balio erantsi handiko produktuak ekoizten dituzten industrietan, badago hirugarren aukera bat: fenomeno fisikoetan oinarritzen diren eredu iragarleak garatzea, gertaturiko aldaketak aurretiaz ulertuz eta fabrikazio-prozesuak aurreikuspen hauekin uztartuz. Ereduen balioztatze fasea burutzeko, entsegu enpirikoak aztertu behar dira, lan-piezen ezaugarriengan eragina duten parametroak doituz. Horrela, eredu birtuala errealitatean gerta daitekeena aurreikusteko gai izango da, prozesuen ezagutzan sakonduz. Era berean, prozesuko parametro optimoenak bilatzeko bidean, entseguak esperimentalki egiteak denbora asko suposatzen du. Hori dela eta, zenbakizko simulazioen bidez, ulertzean sakontzeaz gain, kostu ekonomikoak arintzen dira [Kong, 2011].

Ordenagailuen ahalmena handitzen doan heinean, simulazioen aplikazioak ere hedatuz doaz, industriaren arlo anitzetara helduz. Hasiere batean soilik balio erantsi handiko produktuen ekoizpena errazteko erabiltzen ziren arren, simulazio programek egun dauden ordenagailuekin uztar daiteke. Hori dela eta, soldadura arloan ere simulazioen laguntza bilatu izan da, eredu ugariaren bidez soldatze-prozesuen efektu mekanikoak aztertzeko, hondar tentsioak edo geometria aldaketak kasu.

IV.1.EREDUAK LASER BIDEZKO SOLDADURAN

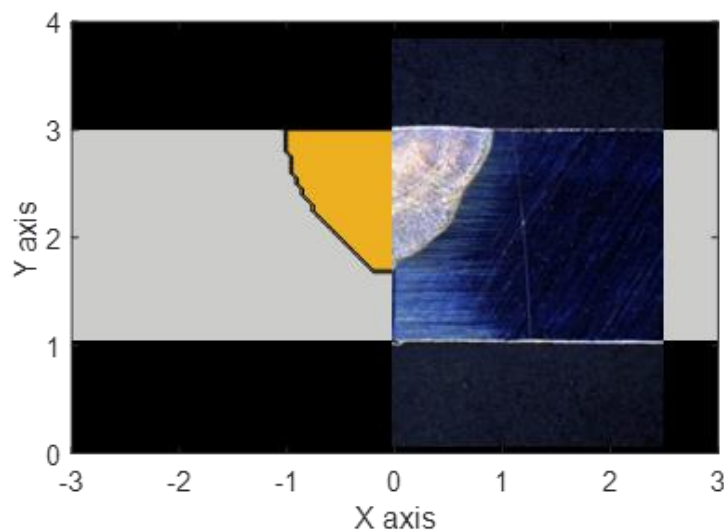
Igorritako energia-sorta modu errazean manipula daiteke eta sarrera-parametroak edota optika bera aldatuz emaitza ugari lor daitezke. Dena den, laser bidezko soldadura bezalako prozesu batean piezan sartzen den beroaren transferentzia bi talde handitan sailka daiteke: kondukzio bidezkoa edo *keyhole* bidezkoa. Lehenengoak sakonera eskaseko soldadurak ahalbidetzen ditu, arku bidezko soldaduretan gertatu lez. Lan-piezarengan eragina duen energia potentzia-dentsitate baxukoa izan ohi da, eta materiala urtzea baino ez du helburutzat. Bigarren taldean, ordea, potentzia-dentsitate handiak erabiliz materiala lurruntzea erdiesten da, *keyhole* estua sortuz eta sortak zuzenean materialaren barnealdean eragitea lortuz. Gauzak horrela, soldaduren sakonera kondukzio bidez lortutakoa baino handiagoa da, milimetroak izatetik zentimetroak izatera hel daitekeelarik.

Alderdi hauetaz gain, laser bidezko soldadura-prozesuek beste hainbat alde fisiko dituzte, errealitatea eredutzearen zailtasuna handituz. Fenomeno fisiko hauek, orokorrean,

elkar-erlazionaturik daude, batek beste batengan eragina izan dezakeelarik. Era berean, maila fisiko ezberdinetan sailka daitezke. Esate baterako, elektroien eta fotoien arteko gertakariak ezin dira lan-piezek pairatzen dituzten geometria aldeketekin zuzenean erlazionatu. Hortaz, ereduak sortzean, fenomenoak mailaz maila aztertu behar dira.

Ordenagailuen ahalmena gero eta handiagoa den arren, egun ezin da prozesua bere osotasunean simulatu, hau da, argiaren sorreratik metalen uzurtzea eta tentsioen agerpenera arte. Horregatik, eredu analitikokoek edota zenbakizkoek maila ezberdinetako emaitzak iragartzeko eraikitzen dira, gerora beraien artean mailaz mailako erlazio bat ezarriz. Adibidez, laserrak eta materialak elkarrekin lehen aldiz topo egiten duten mailan, bero-iturritik datorren energia kantitatearen zein zati xurgatu den kalkulatu da, islatze efektuak kontuan hartu behar direlarik. Hala ere, ezinezkoa da zehazki proportzio hau kalkulatu, izaera aldakorreko fenomeno fisikokomplexua baita. Beraz, horren hurbilketa gauzatu da. Behin lorturik, denboran zehar bero transmisioaren portaera kalkulatu daiteke, materialaren propietate mekanikoen aldaketaren iragarpen hurbildua burutuz.

Efektu fisiko anitzeko prozesu hauen simulazioak, beraz, ez dira osokoak. Ikerlariak simulazioetan inplementatzen dituzten alde nagusiak bero-transferentzia eta sortutako fluxuaren mugimendua dira, islatze-maila hurbilduak ezarriz. Horren adierazle nagusienetakoa xurgapen-koefizientea da, zeinek xurgatze-maila hurbildu bat eskaintzen duen, material bakoitzak zenbaterainoko bero-kantitatea islatu eta barneratu duen zenbatetsiz [DaI, 2016]. Eredutzeari esker laser bidezko soldaduren bai tenperatura-eremuak bai hondar tentsioak iragar daitezke, aplikazio industrialen mesedetan erabiltzeko aukera sortuz [D’Ostuni, 2017].



Irudia IV.1: Eredu iragarleak kalkulatuak profilarren eta probetaren arteko alderaketa [Hernando, 2018]

IV.1.1. Ereduetan kontuan hartu beharrekoak

XIX. mendean Stefan fisikari esloveniarrak materialen fase-aldaketan ezaugarriak ikertzen aritu zen. Izotz xaflen solidotze- eta urtze-prozesuak aztertzean, gune likidoaren eta solidoaren artean fronte mugikor bat agertzen zela ondorioztatu zuen. “Stefanen problema” legez ezagutzen zen horretan, helburua frontearen portaera ezagutzea zen, honek beroa xurgatu edo aska

zezakeelarik. Bestalde, alde bakoitzeko propietate termikoak ezberdinak zirela onarturik, problemak soluzio ez-linealak zituela ezarri zuen. Hortaz, fase-aldaketaren eredua ezartzeko ekuazio korapilatsuen beharra zegoela ondorioztatu zen [Carslaw, 1959].

Ereduak industria arloan barneratzean, bero-iturrien teknologiaren ezaugarriak aintzat hartu behar dira. Laserrak potentzia ezagun bat gune txikian kontzentratzeko gai dira, prozesua zehaztasunez kontrola daitekeelarik. Hori dela eta, materialak xurgatutako energia, bero ekarpena edota sortutako efektuak ondo samar iragarri ahal dira [Dowden, 2001], eredutzeari ateak zabalduz. Hori bai, kontuan izanik soldatze-prozesuen simulazioa zaila dela, fenomeno termiko, mekaniko eta metalurgikoak aldi berean agertzen baitira [Tsirkas, 2003]. Horien artean, *keyhole*aren fenomenoak, egun oraindik erronka nagusienetakoa izanik [Kazemi, 2009].

Soldatze-teknika klasikoekin erkatuz, laserraren ezaugarri zehatzek eredu matematikoak garatzea ahalbidetu dute. Dena den, iragarpenera errealitatekin ahalik eta hurbilen egon dadin, plasmaren sorrera eta galda-bainuaren barne-mugimendua bezalako fenomenoak ulertzean sakontzea ezinbestekoa da [Mazumder, 1983]. Gainera, gune soldatuen analisi mekanikoa burutu ahal izateko, aurretiaz egindako analisi termikoan bero zikloak zehaztasunez definitu behar dira [Goldak, 1984]. Teoriak eta zenbakizko hurbilketek beroaren banaketaren portaera, teknika klasikoekin alderatuz, ezberdina dela onartu behar dute [Kubiak, 2016].

XX. mende amaieran ikerlariak laser bidezko soldadura-prozesua oraindik guztiz ulertzeke zegoela onartu zuten [Bonollo, 1993]. Baina baita eredu askori esker laserrak eragindako aldaketa fisikoak hobe konprenitu ahal zirela ere [Kaplan, 1994]. Horren adibidea galda-bainuaren eta *keyhole*aren arteko portaera da. Entsegu enpirikoen bidez oso zaila den arren (plasma, likidoa eta solidoa elkarrekin aurkitzen dira), zenbakizko simulazioa lagungarria izan daiteke beraien ulertzean sakontzeko [Zhao, 2011]. Denbora luzez galda-bainua eta *keyhole* banandurik simulatu ostean, bi guneek elkarri eragiten diotela ondorioztatu zen [Ducharme, 1994].

Dena den, sakonera handiko laser soldaduretan oraindik alderdi ugari aztertzeke daude [Zhang, 2014].

Edozein eredu materialaren absortibitatea kontuan hartu behar du, laser-prozesuen eraginkortasuna zehaztuko duen parametro nagusia baita [Mazumder, 1983]. Eroankortasunari dagokionez, ahalik eta eredutze errealistena burutzeko, ereduak propietate honek temperaturarekiko menpekotasuna duela onartu behar du. Hala ere, aztertu beharreko temperatura tartea txikia denean, parametro hau konstantetzat hartzen da, temperaturarekiko aldaketa arbuiatuz. Hortaz, nahiz eta sinplifikazio askok eroankortasuna konstante mantendu, beroaren hedapen errealean hurbilketa baino ez dira [Carslaw, 1959].

Era berean, behin urte-temperatura gaudituta, materialean konbekzio-fluxuak ager daitezke. Likidoaren gainazal-tentsioa jaitsi egiten da, temperatura igoz eta likidoa gune beroagotik hotzagora eramanez [Brown, 2010]. Efektu horri Marangoni-efektua deritza, eta deformazioak solidotze-prozesuan finko geratzen dira, soldaduren amaierako itxuran eraginez.

IV.2.EREDUAK ETA BERAIEN BEHARRA HISTORIAN ZEHAR

IV.2.1. Ereduen eboluzioa

Ingeniaritzaren historian zehar ikerlariak bero-iturri mugikorren fenomenoak zientifikoki azaltzen saiatu dira. Iturriak emandako energiaren eragin-eremua definituz eta bere banaketa zehaztuz, lan-piezaren nola mugitzen den eta eragindako aldaketak aztertu dituzte hainbat era ezberdinetan. Ereduek matematikoak, enpirikoak edota analitikoak erabiliz, prozesuak aurretiaz ezagutzeko, sakontzeko eta ulertzeko zubiak eraiki dituzte.

1940. hamarkadan Rosenthalek bere garaiko altzairugintzan erabilitako bero-iturrien teoriak batu zituen: [Bornefeld, 1933], [Rosenthal, 1935], [Boulton, 1936], [Spraragen, 1937], [Bruce, 1939], [Mahla, 1941]. Soldadurarako baliagarriak ziren teoria hauetan oinarrituz, Rosenthalek solido baten zehar mugitzen den beroaren portaera definitzeko soluzio ugari ezarri zituen. Laburbilduz, iturri mugikor batek sortutako bero-fluxua aztertzeko eta ulertzeko tresna matematikoa eratu zuen, bai soldatze- bai ebaketa- prozesuetarako aplikagarria zena [Rosenthal, 1941].

Alde batetik, beroaren transmisioa simulatzeko, Rosenthalek fluxua linealki, bi dimentsioko edo hiru dimentsioko lez hurbil zitekeela ezarri zuen. Gainera, erasotutako solidoa infinitua edo planoen bidez mugatua izan zitekeen. Beste aldetik, bero-iturria puntu, lerro edo plano bat bezala aztertzeko aukera ematen zuen bere teoriak. Gauzak horrela, soldatze-prozesuen portaera teorikoki hurbiltzeko oinarriak ezarri zituen, abagune ezberdinak aurkeztuz eta enpirikoki frogatuz. Bestalde, beroaren transmisioa eta eraginaz gain, tenperatura tarte handi baterako materialaren hozte-denborak kalkulatzeko formulak lortu zituen, bai mota ezberdineko altzairuzko lan-piezak bai soldatze-baldintza ugari aintzat harturik [Rosenthal, 1946].

Rosenthalen teoria aitzindari honetan, bai materialaren eroankortasuna bai difusibitatea tenperaturarekiko independentetzat hartzen ziren. Egiatzapen hau faltsua da erabat, baina hurbilketa errazten zuen onarpen hau barneratzen zuen bere teoriak. Hala ere, mugen artean, iturriaren abiadura eta potentzia konstanteak baino ezin ziren aintzat hartu kalkulatu teorikoak burutzerakoan.

Aldagaien onarpenez gain, bero-iturria egoera kuasi-egonkorrean higitzen dela suposatzen zuen Rosenthalek. Esperimentuetan oinarriturik, hurrengoak baieztatu zituen: baldin eta lan-piezaren luzera bero-azalera baino askoz ere handiagoa bada, beraz zuzenean erasotutako azaleraren inguruko tenperatura-eremua azkar eogonkor bihurtzen dela. Hau da, ikuslea bero iturriaren gainean ezarritik, iturria higitzen den heinean ez lukeela bere inguruan inolako aldaketarik igarriko. Egoera honi kuasi-egonkorra deritzo. Solidoan finkaturik dauden koordenatu errektangularrakiko bero-fluxuaren ekuazio diferentzialetik abiatuz, kasuan kasuko egoeretan aldaketak esleitu zizkion ekuazioei.

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 2\alpha \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad [8]$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -2\alpha v \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad \xi = x - vt \quad [9]$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad \text{Egoera kuasi-egonkorra} \quad [10]$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -2\alpha v \cdot \frac{\partial T}{\partial \xi} \quad [11]$$

$$T = T_0 + e^{-\alpha v \xi} \cdot \varphi(\xi, y, z) \quad \varphi: \text{zehaztu beharreko funtzioa} \quad [12]$$

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial \xi^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} - (\alpha v)^2 \varphi = 0 \quad [13]$$

$$\nabla^2 \varphi - (\alpha v)^2 \cdot \varphi = 0 \quad [14]$$

Beraz, ekuazio sinplifikatu batetik abiatuz, aukera anitz simulatzeko atea ireki zuen Rosenthalek. Solido infinituak, erdi-infinituak edota planoek mugatutako solidoak aztertzeko, soluzioak garatu zituen, bero-iturri ezberdinekin uztartuz eta konbinazio asko sortuz. Kasu bakoitzean, ekuazio diferentziala ebaztean, soluzio zehatz bat lortu zuen eta simulazio analitikoaren aitzindari garrantzitsuenetarikoa bilakatu zen.

1. **Solido infinitu eta erdi-infinituak:** kasu honetan, lan-pieza ez dago iturriaren ibilbidearekiko paraleloak diren planoek mugaturik.

1.1. Bero-fluxu lineala:

$$\xi < 0 \quad T = T_1 \quad [15]$$

$$\xi > 0 \quad T = T_0 + (T_1 - T_0) \cdot e^{-2\alpha v \xi} \quad [16]$$

1.2. Bero-fluxu lineala bero-galerekin barretan:

L : perimetrea

S : zeharkako azalera

$$\xi < 0 \quad T = T_0 + (T - T_0) \cdot e^{\left(\sqrt{(\alpha v)^2 + L \frac{H}{S}} - \alpha v\right) \cdot \xi} \quad [17]$$

$$H = \frac{h}{k} \quad \text{Disipazio-koef.}$$

$$\xi > 0 \quad T = T_0 + (T - T_0) \cdot e^{-2\alpha v \xi} \quad [18]$$

1.3. Bi dimentsioko bero-fluxua:

$$T - T_0 = \frac{q'}{2\pi k} \cdot e^{-\alpha v \xi} \cdot K_0(\alpha v r) \quad r = \sqrt{\xi^2 + y^2} \quad [19]$$

q' : bero-iturri linealaren bero-fluxua

$$K_0(\alpha vr): \quad r \approx 0 \quad K_0(\alpha vr) \approx \ln r \quad [20]$$

$$\begin{aligned} &\text{modifikaturiko} \\ &\text{Bessel funtzioa} \end{aligned} \quad r \rightarrow \infty \quad K_0(\alpha vr) \approx \sqrt{\frac{\pi}{2\alpha vr}} \cdot e^{-\alpha vr} \quad [21]$$

1.4. Bi dimentsioko bero-fluxua galerekin:

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi kg} \cdot e^{-\alpha v \xi} \cdot K_0 \cdot \left[\sqrt{\alpha v^2 + \frac{H + H'}{g}} \cdot r \right] \quad [22]$$

q : bero-fluxua
 g : lodiera
 H, H' : disipazio koefizienteak
 goi- eta behe-gainazaletan

1.5. Potentzia aldakorreko iturri lineala:

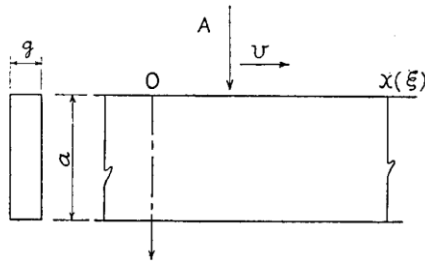
$$q'(z) = q'(0) \cdot \sum_0^n A_n \cdot \cos \frac{\pi n z}{g} \quad [23]$$

$$T - T_0 = \frac{q_0'}{2\pi k} \cdot e^{-\alpha v \xi} \cdot \sum_0^n A_n \cdot \cos \frac{\pi n z}{g} \cdot K_0 \cdot \left(\sqrt{\alpha v^2 + \left(\frac{\pi n}{g}\right)^2} \cdot r \right) \quad [24]$$

1.6. Hiru dimentsioko bero-fluxua:

$$T - T_0 = \frac{q}{4\pi k} \cdot e^{-\alpha v \xi} \cdot \frac{e^{-\alpha v R}}{R} \quad R = \sqrt{\xi^2 + y^2 + z^2} \quad [25]$$

2. **Planoek mugatutako solidoa eta irudien metodoa:** egoera kuasi-egonkorra mantentzeko, muga-planoak ezin dira higidurarekiko elkartzutak izan. Aitzitik, plano hauek bero-iturriaren mugimenduarekiko paralelo baldin badaude, aipaturiko egoera mantentzeko daitezke. Irudien metodoa deritzon honetan, plano hauek simetria plano lez jokatzen dute eta ez dute bero-galerarik onartzen. Bestalde, sistemak erradiazio galerak ez baleude bezala jokatzen du, goi eta behe muga-planoetan hain zuzen. Metodo honekin ezin dira fluxu linealak erabili, baina bai ordea bi eta hirudimentsiokoak.



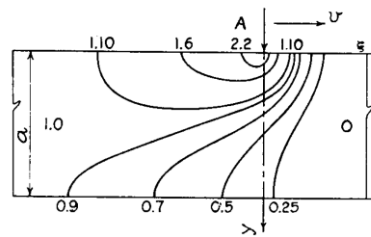
Irudia IV.2: Planoek mugatutako solidoaren eskema [Rosenthal, 1946]

2.1. Bi dimentsioko fluxua:

$$\xi < 0 \quad T - T_0 = \frac{q}{c_p a g v} \cdot \left[e^{-2\alpha v \xi} + \sum_1^{\infty} \frac{2}{\mu_n} \cdot e^{-(\mu_n+1) \cdot \alpha v \xi} \cdot \cos \frac{\pi n y}{a} \right] \quad [26]$$

$$\xi > 0 \quad T - T_0 = \frac{q}{c_p a g v} \cdot \left[1 + \sum_1^{\infty} \frac{2}{\mu_n} \cdot e^{(\mu_n-1) \cdot \alpha v \xi} \cdot \cos \frac{\pi n y}{a} \right] \quad [27]$$

$$\mu_n = \sqrt{1 + \left(\frac{\pi n}{\alpha v a} \right)^2} \quad [28]$$



Irudia IV.3: Pieza mehearen ertzetik doan bero-iturri mugikorrek sortutako tenperatura-distribuzioaren eskema [Rosenthal, 1946]

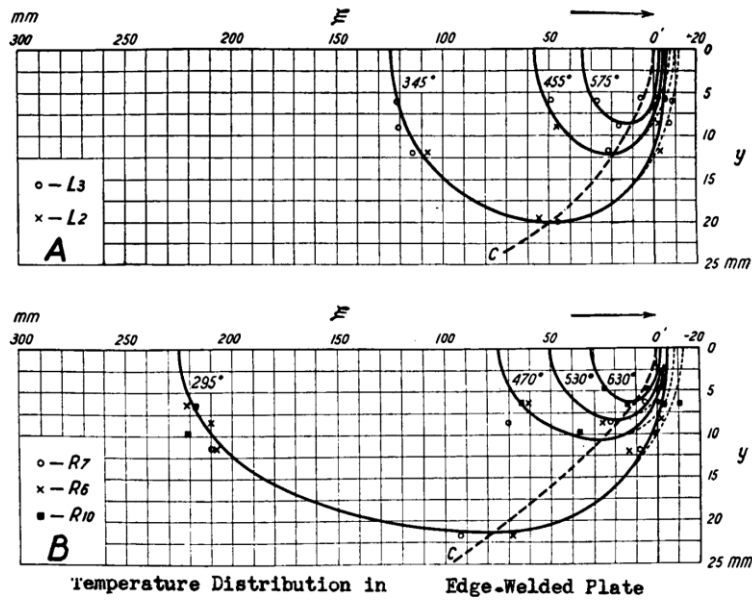
2.2. Bi dimentsioko fluxua eta iturri laua:

$$T - T_0 = \frac{q}{2\pi k g} \cdot e^{-2\alpha v \xi} \cdot \left\{ K_0(\alpha v r) + 2 \cdot \sum_1^{\infty} K_0 \cdot \left[r \cdot \sqrt{\alpha v^2 + \left(\frac{\pi n}{g} \right)^2} \right] \cdot \cos \frac{\pi n z}{g} \right\} \quad [29]$$

Behin ekuazioak ezarrita, beraien frogapen esperimentalak arku bidezko soldadurarekin lortu zuten, elektrodoek xurgatutako energia eta bero-galerak ere kontuan hartuz eta tenperatura-eremuak zenbakizko kalkulu bidez erdietsiz. Hortaz gain, xafren soldaduretan gertatutako hozte-denbora Bessel funtzioekin erlazionatu zituen (ikus ek. [30], non soluzioa α zenbaki konplexuaren araberako Bessel funtzioa den,).

$$x^2 \frac{d^2 y}{dx^2} + x \frac{dy}{dx} + (x^2 - \alpha^2) y = 0 \quad [30]$$

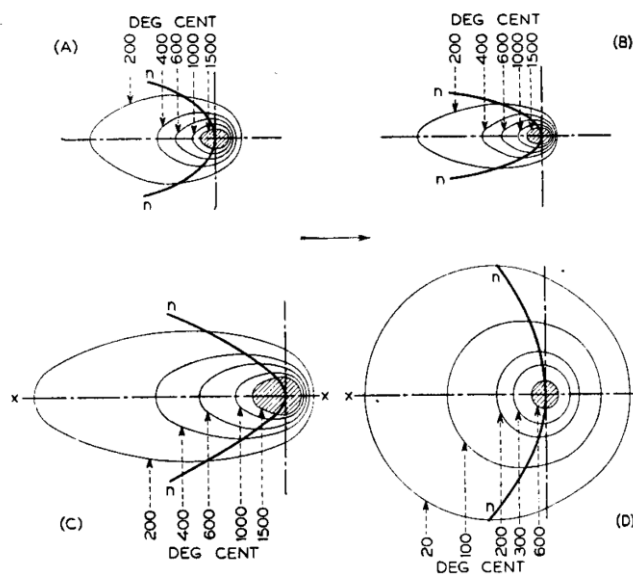
Isotermek osaturiko zeharkako sekzioek Rosenthalen teoriaren aplikazio industrial zuzena ahalbidetu zuten, mugarri bat ezarritik. Arku bidezko soldadura erabiliz, altzairuarekin eta aluminioarekin hainbat froga egin zituen, sarrera-parametroen araberako emaitza ugari definituz.



Irudia IV.4: Ertzeko soldadura ezberdinen temperatura-distribuzioen eskemak [Rosenthal, 1946]

Temperatura-eremuei dagokienez hurrengoa ondorioztatu zuen bere saiakuntzetatik:

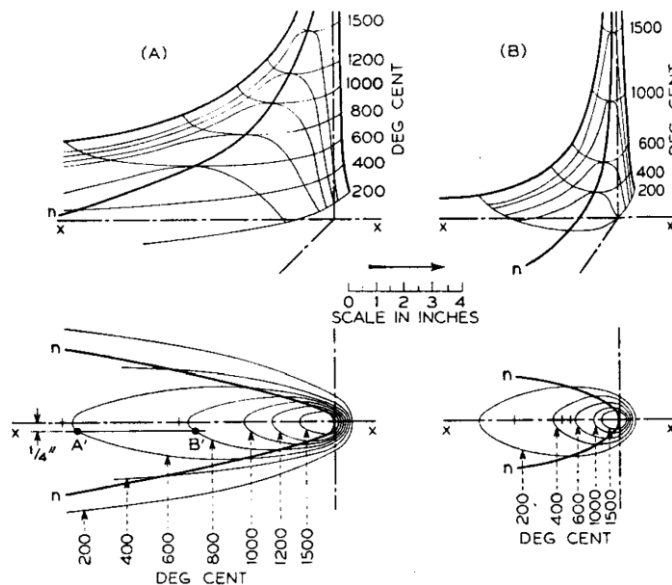
1. Temperatura-gradienteak askoz handiagoa da bero-iturriaren aurrealdean atzealdean baino.
2. Beroa ez denez berehala transmititzen, zeharkako sekzio bereko puntu ezberdinek ez dute temperatura berdina aldiune berean lortzen. Efektu hau materialaren difusibitatearen eta iturriaren aitzinapen-abiaduraren menpe dago.
3. Kurba baten bidez temperatura hazkorra duten puntuak temperatura beherakorra dutenengatik bereiz daitezke.



Irudia IV.5: Tope-loturako saiakuntza ezberdinen temperatura-distribuzioen eskemak [Rosenthal, 1946]

Soldatze-prozesuaren baldintzei dagokienez, hurrengo ondorioztatu zuen:

1. Aitzinapen-abiadura handituz gero, bero-eremua iturriak erasotutako gunean trinkoago banatzen da.
2. Potentzia handitzean, bero-eremua handitzen da, baina isothermen itxura ez da aldatzen.
3. Materialaren eroankortasuna eta difusibitatea aldatuz gero, bai isothermen itxura bai beraien tamaina aldatzen dira. Aldaketak are nabarmenagoak dira bero iturriaren aurrekaldeko gunean.
4. Materiala aurretiaz beroturik baldin badago, eragin zuzena izango du isothermen zenbakizko balioaren hazkundera, baina beraien itxura eta tamaina orokorrak berdin mantentzen dira. Era berean, aurretiaz berotu ez diren lan-piezekin erkatuz, horrela beroturiko materialek hozte abiadura ezberdina izango dute.
5. Sarrera-parametro berdinak aplikatuz, lan-piezen lodierak eragin zuzena dauka lortutako bero-eremuetan. Lodiera txikikoek bero-eremu sakabanatuagoa aurkezten dute, fluxua hiru dimentsiokoa izatetik bi dimentsiokoa izatera hurbiltzen baitoa.



Irudia IV.6: Altzairuan egindako tope-soldaduren tenperatura-distribuzioen eskemak: a) Pieza mehea; b) Pieza lodia [Rosenthal, 1946]

Ikerketa honen mugarik handiena, materialen propietate konstanteak ezartzeaz gain, egoera kuasi-egonkorra kontsideratu ahal izateko denboraren menpekotasunik eza da. Hortaz, Rosenthalek ondorioztatutako garapen matematikoa ez da nahikoa laser bidezko soldadura-prozesua bere horretan zehaztasunez eredutzeko, baina aurrerago garatu ziren teorema ugariaren oinarri bezala erabili izan da.

Aldi berean, Carslaw eta Jaegerrek lehenago burututako lan ezberdinak batu eta kondukzio bidez berotutako gorputzen analisi sakon eta mamitsua argitaratu zuten beraien *Conduction of*

heat in Solids bilduman [Carslaw, 1959]. Bertan, ekuazio diferentzialetatik abiatuz, era askotako agertokiak aztertu zituzten, bakoitzari dagokion soluzioa eskainiz. Beroaren sorkuntza, gainazalen berotze, urtze- eta hozte-prozesuak, material anisotropoak, gorputz mugikorrek edo propietate aldakorreko materialen ulertzea eta sakontzea ahalbidetu zuten. Rosenthalek azaldutako geometria errazez gain, beroak sortutako itxura ezberdinentzat (zilindroa, esfera edo konoa, adibidez) soluzio analitikoak aurki zitezkeen beraien lanean. Bestalde, integrazio metodoak, Laplaceren transformatua eta Greenen funtzioak erabili zituzten problema ezberdinak ebaztean. Dena den, eredu matematiko hauek beroaren hedatze teorikoa besterik ez zuten suposatzen, prozesu horretan gerta litezkeen fenomeno fisikoa anitzak, fase-aldaketak kasu, sor zitzaizketen ondorioak kontuan hartu barik.

Pavelicek eta bere ikerlari taldeak materialaren gainazalean disko itxurako bero-iturria proposatu zuten [Pavelic, 1969]. Lodiera txikiko piezetan arku bidezko soldadura erabiliz balioztatu zuten beraien modeloa, beroaren banaketa gaussiarra zela onartuz:

$$q(r) = q(0) \cdot e^{-Cr^2} \quad [31]$$

$$d = \frac{2}{\sqrt{C}} \quad d: \text{diskoaren zabalera} \quad [32]$$

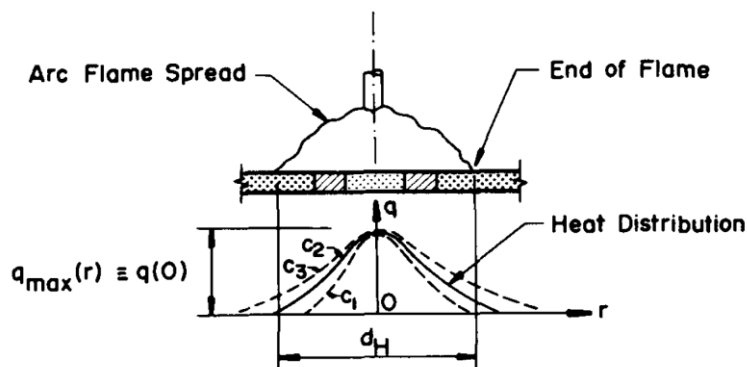
$q(r)$: azalerako fluxua r erradioan [$\text{W}\cdot\text{m}^2$]

$q(0)$: fluxu maximoa bero-iturriaren zentroan [$\text{W}\cdot\text{m}^2$]

C : kontzentrazio-faktorea [m^{-2}]

r : bero-iturriaren zentroarekiko distantzia erradiala [m]

Bertan, diskoaren d zabalera C kontzentrazio koefizientearen bidez zehaztu zuen, parametro hau iturriaren zabalaren menpe zegoelarik. Beraz, zenbat eta iturri kontzentratuagoa izan, orduan eta zirkulu txikiagoa sortzen zela ezarri zuen Pavelicek.



$$c_1 > c_2 > c_3$$

$d_H \equiv$ Hot Spot (Dia.)

$c \equiv$ Concentration Coefficient

Irudia IV.7: Disko itxuradun bero-iturriaren eskema [Pavelic, 1969]

Pavelicen ereduaren oinarriturik, urte batzuk geroago hainbat ikerlarik elementu finituetatik abiatutako bero-eremuaren banaketa berriak proposatu zituzten. Beraien artean, Friedmanek edo Krutzek banaketa gaussiar modifikatuak proposatu zituzten [Friedman, 1975],[Krutz, 1976].

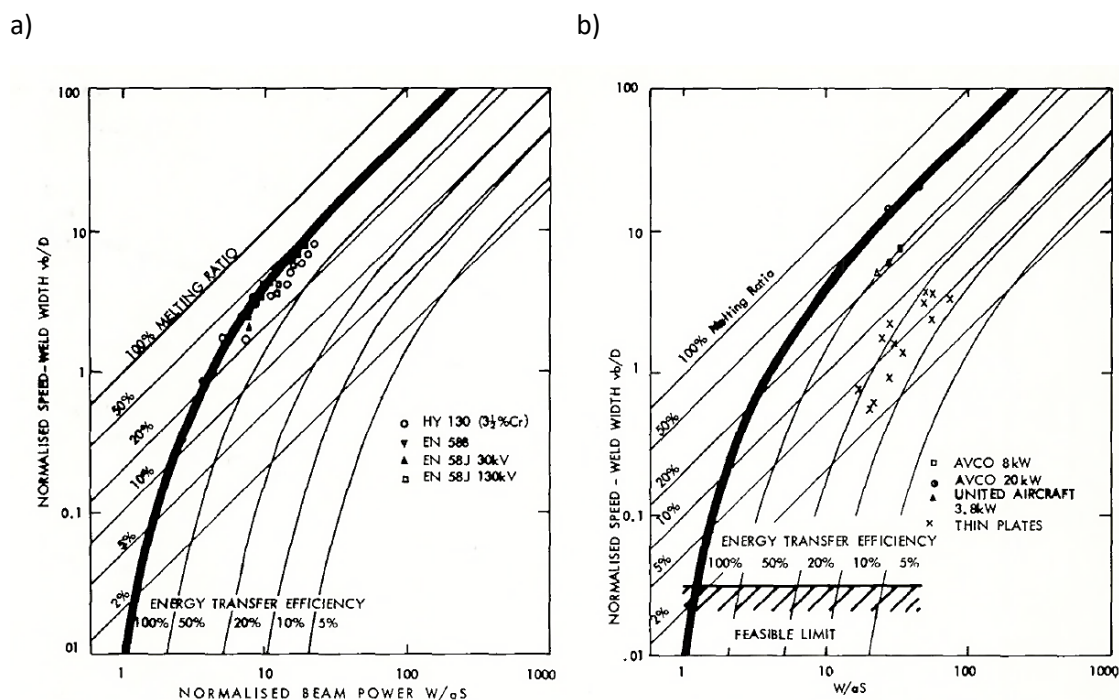
$$q(y, t) = \frac{3Q}{\pi \bar{r}^2} \cdot e^{-3\left(\frac{y}{\bar{r}}\right)^2} \cdot e^{-3\left(\frac{y t}{\bar{r}}\right)^2} \quad [33]$$

Q : aplikaturiko potentzia

\bar{r} : erradio maximoa

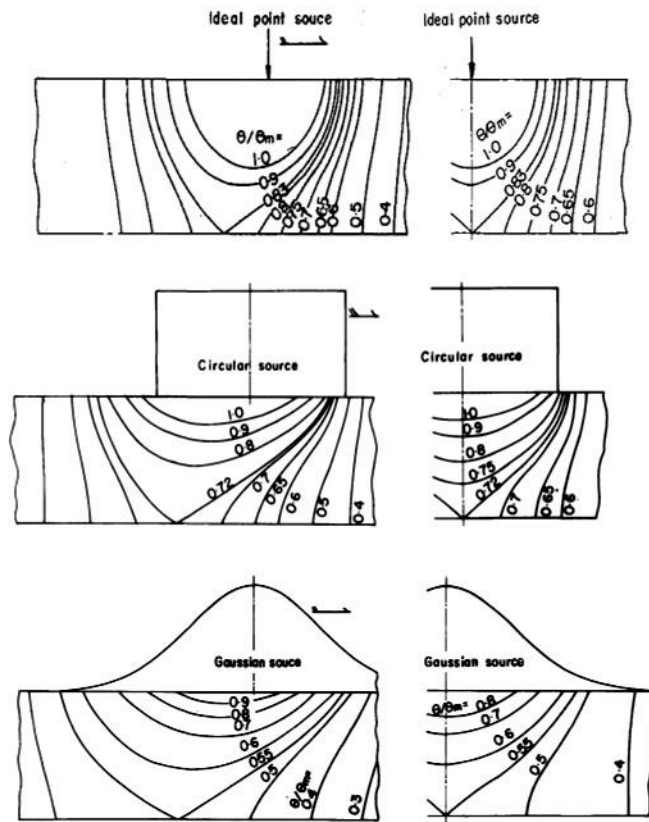
Energia-dentsitate handiko prozesuak, bai elektro-sorta bidezko soldadurak, bai laser bidezkoak, mota ezberdineko ereduak hornitzen hasi ziren. Horren adibidea da Swift-Hook ikerlariak 70eko hamarkadan aurrera eramandako lana. Bertan, soldadura sakonerako teoria aurkeztu zuen, *EBW*- eta *LBW*-teknikentzat baliagarria zelarik. Garaiko laserren efizientzia elektro-sortarena baino handiagoa zen arren, sakonera berdina lortzeko potentzia gehiago behar zutela baieztatu zuen. Aldiz, *EBW*-teknikaren huts-ganberaren beharrak eta elektrodoen bitzta laburrek laserra alternatiba lez agertzea ahalbidetzen zuen, eredu iragarleen premia zutelarik [Swift-Hook, 1973].

Emitza esperimentaletatik abiatuz, ordura arteko laser-soldadurari buruzko teoria balioztatzen saiatu zen Swift-Hook. Laser-sorta bidezko soldadura jarraiaeren analisia burutu zuen, bero-transferentzia konduktzioz baino gauzatzen ez zelarik. Kasu honetan, materialek propietate termiko aldakorrak zituztela ezarri zuen, hurbilketa sinplifikatzaileak egin barik, eta *keyhole*a barneratu zuen bere kalkuluetan. Hala ere, elektro-sorta bidezko soldaduran ez bezala, laser-soldaduran teoria emaitzekin guztiz bat ez zetorrela ondorioztatu zuen, aldaketa fisikoen ereduak, *keyhole*a kasu, gabeziak zituela agerian utziz.



Irudia IV.8: *EBW* (a) eta laser-soldaduraren (b) alderaketa emaitza enpiriko eta teorikoen artean

Aldi berean, 1974an Aratak eta Miyamoto karbono dioxidozko laserrek material metalikoetan zuten eragina ikertu eta eredu zuten. Bero-iturri mota ezberdinek sortutako tenperatura igoera isoterma bidez irudikatu zuten, bakoitzaren eragina bisualki aztertzeko.



Irudia IV.9: Dioxidozko laserren bidez bero-iturri ezberdinek sortutako isotermak [Arata, 1974]

Beraien saiakuntzetan, lan-piezen gainazalak tratamendu ezberdinekin landuz, eroankortasun-maila eta xurgapena nola aldatzen ziren ere aztertu zuten. Irakite-tenperatura baxuko eta eroankortasun altuko materialetan gainazal-akabera leuna izanez gero, piezen xurgapen-maila nabarmen igo egiten zela ondorioztatu zuten [Arata, 1974].

Energia-dentsitate handiko *EBW*- eta *LBW*-prozesuetan, ikerlariak *keyhole*aren fenomenoari erreparatu beharren garrantzia azpimarratu zuten beraien lanetan. Klemensek lurrunezko barrunbe hau sortzeko beharrezko baldintzak eta bere itxura definituko zuten alderdiak zehaztea ezinbestekotzat jo zuten. Laserrak egoera kuasi-egonkorrean lan egin zezakeela jakina zen arren, barrunbea ezegonkortasun-maila handiko geometria baitzen. Bere lanean, ordea, *keyhole*a ulertzeko lehen urratsa egonkorra balitz bezala tratatu zuten Klemensek, azterketa integrala arbuiauz [Klemens, 1976].

Aurkezturiko lan horretan, beroak erasotutako gainazalaren azterketa zatitua burutu zuten. Lehenik, urtutako materialaren portaera eraso gunearen aurrealdean eta alboetan. Bigarrenik, barrunbearen inguruan materiala nola mugitzen zen. Azkenik, atzealdeko gunea aztertu zuten Klemensek, hau da, bero-arrastoa edo buztana deritzona. Hortaz gain, lurrunezko barrunbearen barne-presioek eta bero-fluxuek nolako eragina zuten aztertu zuten. Hau guztiarekin, *keyhole*aren itxura zenbatetsi zuten, barne-presioen, gainazaleko tentsioen eta inguruan urtutako presio hidrodinamikoaren arteko orekak plasmaz beteriko barrunbea sortzen zuela ondorioztatu zuten.

Era berean, Klemensek laser-soldadurarako eredu hurbilduaren soluzioa lortu zuen:

$$r < r_c \quad T(r) = T_c + \frac{p}{4k} \cdot (r_c^2 - r^2) = T_c + \frac{p'}{4\pi k} \cdot \left(1 - \frac{r^2}{r_c^2}\right) \quad [34]$$

$$r > r_c \quad T(r) = T_c - \frac{p'}{2\pi k} \cdot \ln\left(\frac{r}{r_c}\right) \quad [35]$$

$$T_c = T_0 - \frac{p'}{4\pi k} \quad [36]$$

$$\left(\frac{r_0}{r_c}\right)^2 = e^{\left(\frac{4\pi k \cdot (T_c - T_v)}{p'}\right)} \quad [37]$$

r_0 : *keyhole*aren erradua

r_c : gune xurgatzailea ez-xurgatzailetik bereizten duen erradua

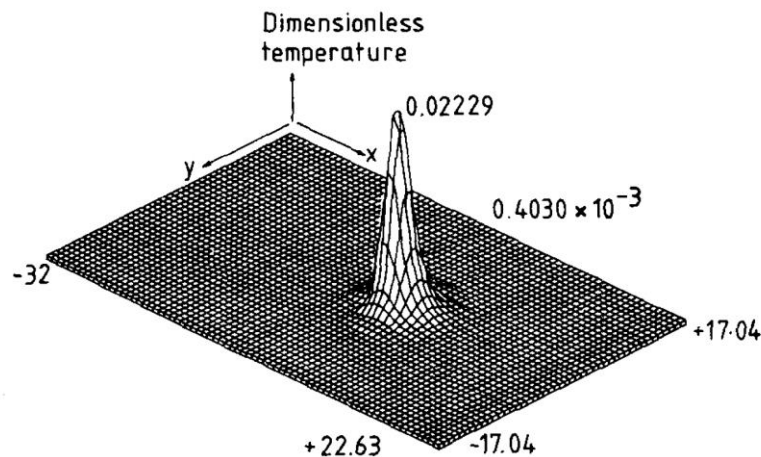
T_v : lurruntze-temperatura

T_c : temperatura r_c distantzian

p : xurgaturiko potentzia bolumen unitateko

p' : xurgaturiko potentzia sakonera unitateko

Horren ostean, Mazumder eta Steen ikerlariek zenbakizko ereduen bila jardun zuten. Urte askotako lanaren ostean, 1980. urtean potentzia baxuko laser-soldadura jarraituarentzat lehen zenbakizko ereduak garatu zuten. Bero-iturri gaussiar mugikorra oinarritzat hartuz, diferentzia finituen zenbakizko tekniken bidez hiru dimentsioko ereduak eratu zuten [Mazumder, 1980].



Irudia IV.10: Dimentsiorik gabeko gainazaleko temperatura-distribuzioa [Mazumder, 1980]

Beraien kalkuluetan, materialaren xurgapen-maila kontuan hartzean, *keyhole*ak gorputz beltz lez jokatu zuela ezarri zuten, hau da, behin lurruntze-temperatura gainditurik, puntu hauetan materialak ez zuela izpirik islatzen eta energia guztia xurgatzen zuela. Hala ere, *keyhole*ak zeharkatzen zuten heinean, Beer-Lambertek adierazitako xurgapen-koefizienteak plasmak islatu eta bereganatutako kantitatea adierazteko erabiltzen zuten Steenek eta Mazumderrek. Era

berean, babes-gasaren inguruan konbekziozko galerak zeudela ezarri zuten. Guztira, egoera kuasi-egonkorrean lan egiten zuen sistema kontsideratzen zuen lan honek, kalkuluak errazteko eta sinplifikatzeko *keyholea* bat-batean sortzen zela onartuz.

Swift-Hookeek garatutako eredu analitikoa aztertu ostean [Swift-Hook, 1973], sortutako lurrunezko barrunbearen sakonera kalkulatzeko mugak zituela baieztatu zuen Mazumderrek. Hortaz gain, Klemensen lanari erreparatuz [Klemens, 1976], nahiz eta aurrerapen nabarmenak gauzatu, *keyholearen* inguruan fluxu dimentsiobakarra baino ez zela kontuan hartzen kritikatu zuen. Beraz, gabezia hauei aurre egiteko, zenbakizko eredu propioa garatu zuen. Eredu hau lodiera finituko lan-piezen laser-soldadura simulatuz, goi eta behe gainazaletan bero galerak ezarriz, soldaduraren penetrazioa kalkulatzeko gai zen. Hala ere, bere mugen artean, materialaren propietateak konstante mantentzen direneko suposizioan oinarritzen dela azpimarratu beharra dago.

Eredu matematikoa garatzerakoan, hurrengo onarpen fisikoak hartu zituen kontuan Mazumderrek:

1. Laserra geldi mantentzen da, lan-pieza angelu zuzenean eta bere zabaleraren erdigunean erasotzen duelarik. Mugimendua simulatzeko, lan-pieza x norabide positiboan higitzen da, abiadura konstantearekin.
2. Lan-piezak luzera infinitua du (x norabidea), baina zabalera mugatua (y norabidea).
3. Egoera kuasi-egonkorra onartzen da, hau da, laser-sorta bat-batean sortzen dela kontsideratzen da, hasierako eratze-denbora eta honi erlazionatuta dagoen gune transitorioa arbuatuz.
4. Potentzia banaketa gaussiarra da, baldintza hau laser motaren arabera alda daitekeelarik.

$$P_{x,y} = \frac{P}{\pi r_b^2} \cdot e^{-2\left(\frac{r}{r_b}\right)^2} \quad [38]$$

P : aplikaturiko potentzia

r_b : sortaren erradioa non dentsitatea $1/e^2$ koefizienteagatik biderkatutik dagoen

[39]

5. Materialaren eroankortasuna, dentsitatea eta bero espezifikoaren tenperaturekiko independenteak dira.
6. Urtze-bero sorra solidotze-bero sorrarekin konpentsatzen da.
7. Behin irakite-tenperatura gainditurik, materialak erabateko xurgapen-maila dauka. Era berean, gune hori lurrundu egingo dela kontsideratzen da.
8. Goi- eta behe-gainazaletan erradiazioagatik eta babes-gasak eragindako konbekzio behartuagatik galerak kontuan hartzen dira.

$$k \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{x,y} = P_{x,y} \cdot \left(1 - \frac{r}{\bar{r}}\right) - (h_c - h_r) \cdot (T_{x,y,1} - T_a) \quad [40]$$

$$h_c = 13Re^{0.5} \cdot Pr^{0.33} \cdot \frac{k_{gas}}{B} \quad [41]$$

$$h_r = \sigma \cdot \left(1 - \frac{r}{\bar{r}}\right) \cdot (T_{x,y,1}^2 + T_a^2) \cdot (T_{x,y(goi)} + T_a) \quad [42]$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{x,y(behe)} = -(h_c - h_r) \cdot \frac{(T_{x,y(behe)} - T_a)}{k} \quad [43]$$

P : aplikaturiko potentzia

T_a : giro-tenperatura

Re : Reynoldsen zenbakia

Pr : Prandtlen zenbakia

k_{gas} : gasaren eroankortasuna

B : konbekzio-gasaren ahokoarekiko distantzia

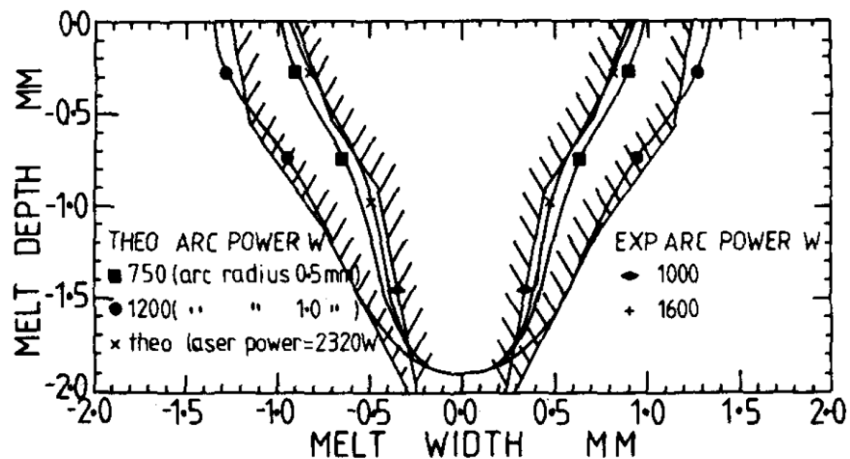
9. Piezak xurgatutako erradiazioaren bidezko penetrazioa Beer-Lambert legean oinarrituz kalkulatzen da.

$$P_{rad} = P \cdot e^{-\beta_k L} \quad [44]$$

L : uneko sakonera

P_{rad} : L sakoneran erradiatutako potentzia

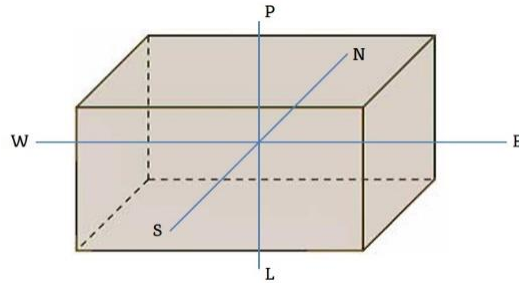
β_k : keyholearen xurgapen-koefizientea



Irudia IV.11: Iragarritako eta enpirikoki neurtutako urtutako guneak [Mazumder, 1980]

Agerikoa denez, ereduak alderdi fisiko ugari barneratzen hasi ziren, fenomeno anitzen eragina aintzat hartuz. Dena den, mota honetako ereduak bi muga nagusi dituzte. Alde batetik, materialaren propietateak aldatzen ez direla onartzen da, eroankortasunak edota dentsitateak temperaturarekiko duten erlazioa baztertuz. Bestetik, egoera kuasi-egonkorra simulatzeko asmoz, sortaren sorrera denbora eta *keyholea* egonkorra izan arte gerta daitezkeen aldaketak arbuizatzen dira. Ekuazio diferentzial partzialak ebazteko erlaxazio metodo iteratiboa aplikatu zuten Mazumderrek.

$$\begin{aligned}
 -k\partial y\partial z \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{PW} &- k\partial x\partial z \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{PN} &- k\partial x\partial y \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{PH} &+ k\partial y\partial z \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)_{EP} &+ k\partial x\partial z \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial y}\right)_{SP} \\
 -k\partial x\partial y \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)_{LP} &+ \rho c_p \partial y\partial z \cdot \left(\frac{T_W + T_P}{2}\right) &- \rho c_p \partial y\partial z \cdot \left(\frac{T_P + T_E}{2}\right) &= 0
 \end{aligned} \quad [45]$$



Bere ostean, urrats handia eman zen Goldaken eskutik, elementu finituetako eredu berri bat aurkeztu baitzuen. Ordura arteko ereduen gabeziak aztertu ostean, urtutako gunearen portaera azaltzeko zailtasuna aipatu zuen, gainazaleko tentsioek, bulkada indarrek eta urtutako materialaren likatasunak zuten eraginaren inguruko sakontze eta ulertzea urria baitzen. Soluzio lez, Goldakek hiru dimentsioko bero-iturriaren banaketak desberdina behar zuela ondorioztatu zuen [Goldak, 1984].

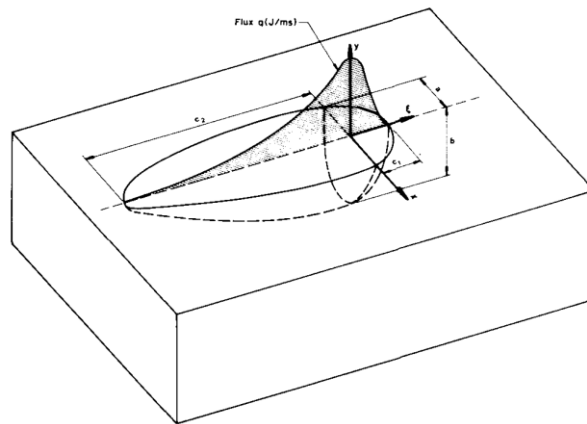
Banaketa tridimentsional hemiesferikoak eta elipsoidalak aztertuz, emaitzak teoriarekin bat ez zetozela ondorioztatu zuen eta proposamen berritzailea aurkeztu zuen: elipsoide bikoitzaren eredu.

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} \cdot e^{-3 \cdot \left[\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c}\right)^2 \right]} \quad [46]$$

$$q(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} \cdot e^{-3 \cdot \left[\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c}\right)^2 \right]} \quad [47]$$

a, b, c : zenbakizko koefiziente independenteak

f_r, f_f : atzealdeko eta aurrealdeko guneetan ezarritako bero-proporzioak, hurrenez hurren

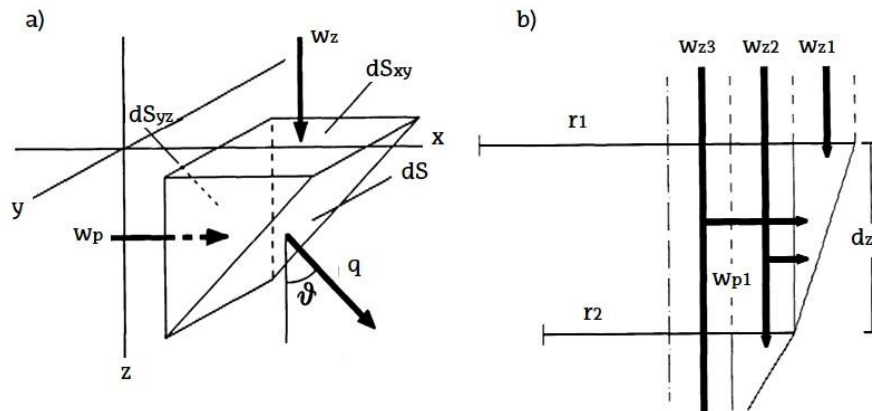


Irudia IV.12: Elipsoide bikoitzaren bero-iturria [Mazumder, 1980]

Eredu honen bidez, iturriaren aurrealdeak eta atzealdeak banaketa ezberdinaren beharra zutela ezarri zuen Goldakek, beraien itxura a , b eta c parametro geometrikoen menpe agertzen zelarik. Eredua enpirikoki balioztatu ostean, lortutako tenperatura banaketa iragartzeko, elipsoide bikoitzaren ereduak zehaztasun-maila handia eskaintzen zuela ondorioztatu zuen. Bero-iturria soilik gainazalean aplikatuz gero (soldadura-prozesu gehienetan ohikoa den lez), diskoen ereduak alderatuz, Goldaken ereduaren esperimenduetatik hurbilago zegoela ondorioztatu zen. Horrez gain, hozte-denborei dagokienez, Rosenthalen modeloak iragarri zezakeena baino zehatzago lan egiten du elipsoide bikoitzak. Dena den, urrutako gunearen behealdearen itxura (soldaduraren erroa) ez zetozen esperimenduetan lortutakoarekin bat. Beraz, nahiz eta geometrikoki eredu berritzailea izan eta denboraren parametroa barneratu, ereduak soilik potentzia-dentsitatea hartzen du kontuan, materialaren propietateen mailaz mailako aldaketa edota *keyhole*aren inguruan sortutako mugimenduak arbuatuz.

90eko hamarkadan sarturik, laser-soldaduraren industriak bere hazkundearekin jarraitu zuen, altzairu herdoilgaitzen eta superaleaziozko piezen lantzean hartutako garrantzia sendotuz. Bonollok material ezberdinen CO₂-ko laser bidezko soldadura-prozesuak berak garatutako eredu analitiko batekin alderatu zituen [Bonollo, 1993].

Eredu ezberdinek soldatze prozesuaren energia eta tenperatura banaketak baliagarriak zirela onartu arren, urrutako gunearen dinamikaren ulertzea oraindik urria zela zioen Bonollok. Teorian, *keyhole*ea eratzean laser-sorta baino apur bat handiagoa zen zilindro itxurako barrunbea agertzen zen. Bere lanean, *keyhole*aren elementuen oreka termikoa deskribatzeko ereduaren eratu eta esperimenduekin konparatu zuen.



Irudia IV.13: a) *Keyhole*ko hormaren elementu baten oreka termikoa; b) *Keyhole*aren sakoneraren kalkulua [Bonollo, 1993]

$$qdS = w_s dS_{xy} + w_p dS_{yz} \quad [48]$$

$$\tan \vartheta = \frac{w_z w_p + q \cdot \sqrt{(w_z^2 + w_p^2 - q^2)}}{q^2 - w_p^2} \quad [49]$$

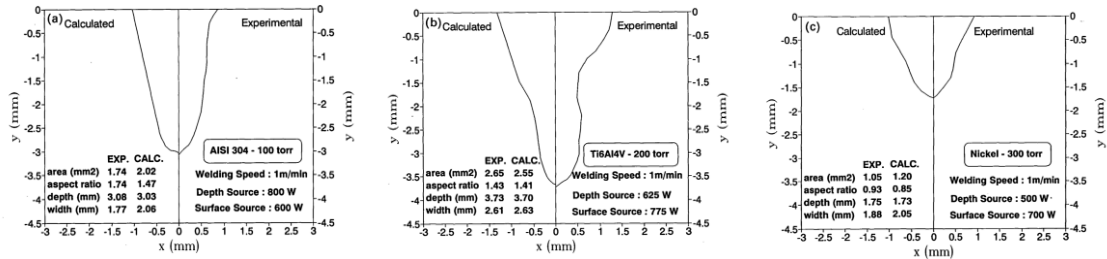
w_z : laserrak bolumen-unitatearen dS_{xy} aurpegitik sartzean emandako potentzia-dentsitatea

w_p : plasmak bolumen-unitatearen dS_{yz} aurpegitik sartzean emandako potentzia-dentsitatea

q : dS aurpegitik irtendako bero-fluxua

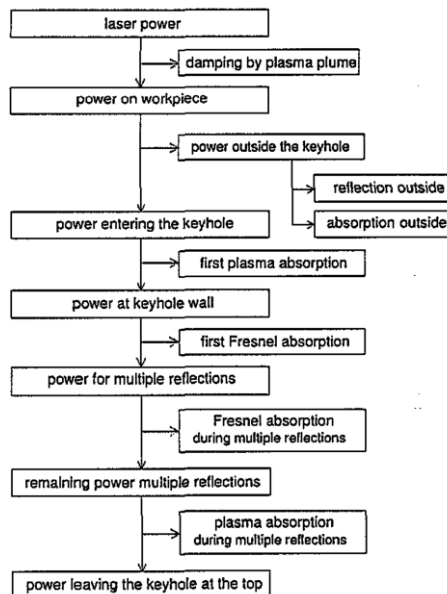
ϑ : z ardatzaren eta dS aurpegiarekiko normalaren arteko angelua

Bero-fluxua kalkulatzeko, lurrunezko barrunbearen hormak adiabatikoak zirela onartzen zuen bere lanean, eta teoria klasikoetan oinarrituz (Carslaw, adibidez), bolumen-unitateetatik irtendako bero-fluxu (q) ezberdinak lortzen zituen materialaren propietateen arabera. Errorea %5 eta %10 artekoa izatea lortu zuen Bonollok. Hala ere, sortutako materialaren barne-mugimenduak arbuizaten zituen.



Irudia IV.14: Soldadura esperimentalen eta modeloaren bidez iragarritakoen arteko alderaketa [Bonollo, 1993]

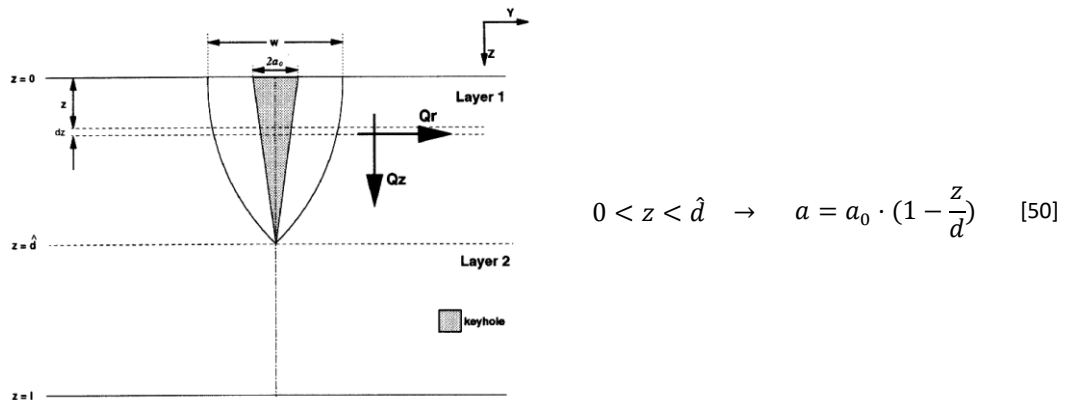
*Keyhole*aren eredutzean sakontzeko asmoz, Kaplanek barneko asimetria kontuan hartu behar zela onartu zuen, barrunbe honen gune bakoitzak bero transferentzia ezberdina zuelarik [Kaplan, 1994]. Era berean, islatzeak eta xurgatzeak nola banatzen ziren aztertu zuen, makinatik irtendako potentziaren mailaz mailako banaketa zehaztuz. Gauzak horrela, *keyhole*aren profil zehatza kalkulatzeko lehenengo prozedura garatu zuen.



Irudia IV.15: Laser-soldaduran gertatuako xurgatze-prozesuen fluxu-diagrama [Kaplan, 1994]

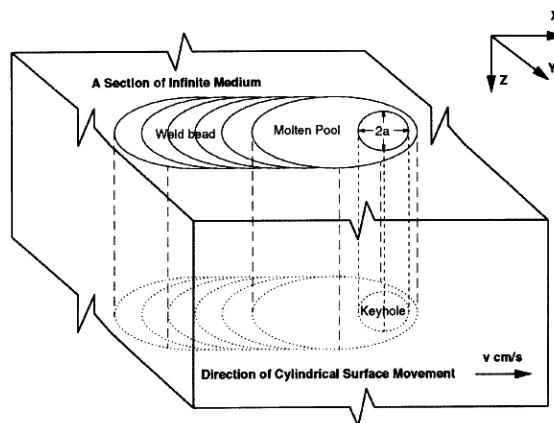
Aldi berean, Ducharmek laser bidez soldatutako metalezko xafla meheen itxura iragartzeko eredu matematikoa eratu zuen. Galda-bainuaren dimentsioak neurtuz eta *keyhole*ak xurgatutako energia plasma eta hormen artean banatzen zela aintzat hartuz, bi elementu hauen arteko erlazioa bilatu zuen [Ducharme, 1994]. Hala ere, entseguekin konparatzean, garatutako ereduak ez zuen galda-bainuaren atzealdea zehaztasunez deskribatzen konturatu zuen.

Lan horri jarraiki, Lankalapallik beroaren kondukzio bidimentsionalaren bidez *keyhole* konikoaren ideia erabili zuen bere eredua garatzeko [Lankalapalli, 1996].



Irudia IV.16: Bi dimentsioko *keyhole* konikoaren eskema [Lankalapalli, 1996]

Konoa dz lodiera infinitesimaleko xafletan bananduz, z norabidean zeharkako bero-fluxua arbuigarria zela onartu zuen, beroa soilik era erradialean transmitituz. Sekzio osoa erradio ezberdineko eta infinituki meheak diren zilindroetan bana daiteke, bakoitza bere geruzan zehar bero-iturriaren norabide berberean higitzen delarik.

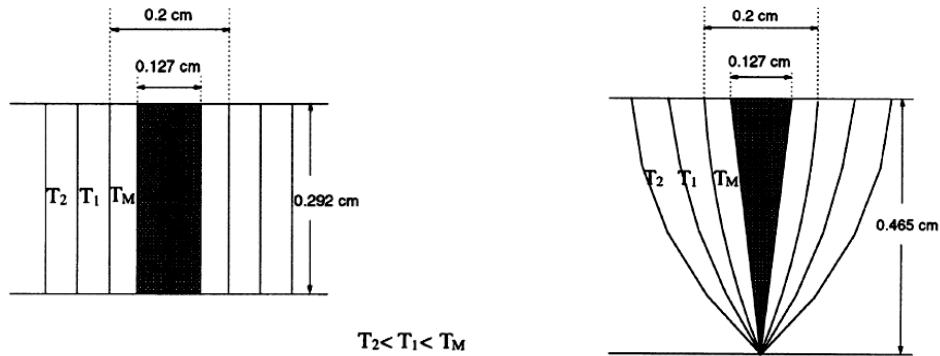


Irudia IV.17: Infinituki meheak diren zilindroen eskema *keyhole* konikoa eredutzeko [Lankalapalli, 1996]

Xurgatutako guztiko potentzia xafila infinitesimal guztiena batuz erdiesten zuen eredu honek. Itxura zilindrikoa lukeen *keyhole*ak sortutako tenperatura-eremuarekin diferentzia nabarmena azaltzen zuen Lankalapalliren ereduak, entseguekiko errore txikiagoa aurkeztuz.

a)

b)

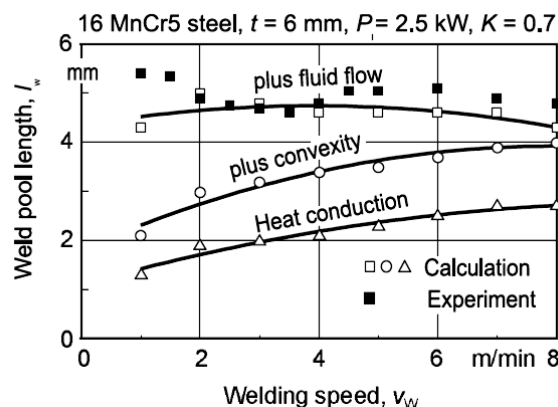


Irudia IV.18: Soldaduren geometrien eta isothermen arteko alderaketak: a) *Keyhole* zilindrikoarentzat; b) *Keyhole* konikoarentzat [Lankalapalli, 1996]

Penetrazioari dagokionez, *keyhole* konikoaren ereduak sortutako profila soldadura errealetik hurbilago zegoen. Dena den, kalkuluak errazteko, materialen propietate termikoak konstantetzat hartzen zituen.

XXI. mendean sarturik, Sudnikek soldatze-prozesuen abiadurak galda-bainuan zuen eragina aztertu zuen [Sudnik, 2000]. Gune urtuaren luzeraren zati bat (% 50 eta 90 artean) kondukzioaren ondorioz eratua eta beste zatia (% 50 eta 10 artekoa) konbekzioagatik zela onartuz, bien arteko proportzioa laserraren aitzinapen-abiaduraren arabera aldatzen zela ondorioztatu zuen. Era berean, galda-bainuaren portaeran bi alderdik eragina dutela ezarri zuen: alde batetik, lurrunezko barrunbean agertutako tentsioak eta marruskadura-indarrak; bestetik, hedapen termikoak eragindako itxura ganbila.

Urtutako materialaren fluxua azaltzeko, hiru abiadura-bektore independenteren batuketa proposatu zuen: *keyhole*aren inguruko mugimendu horizontala, gainazal-tentsioek sortutakoa (Marangoni-efektua) eta lurrunaren marruskadurak eragindakoa. Zenbakizko ereduak garatu eta abiadurak kalkulatu zituen, proba errealekin egiaztatuz. Gainera, piezen arteko hutsuneak, hau da, *gap*ak, sakoneran daukan eragina aztertu zuen.



Irudia IV.19: Galda-bainuaren neurketa esperimentalaren eta iragarritakoaren arteko alderaketa, kondukzioa eta Marangoni-efektua kontuan harturik [Sudnik, 2000]

Garaturiko ereduaren emaitzak aztertu ostean, hurrengo ondorioztatu zuen Sudnik: ereduak, fluxuaren mugimendua zehaztasunez deskribatzen zuen heinean, entsegu enpirikoekin bat zetorrela. Hortaz gain, aitzinapen-abiadura konstante mantenduz, potentzia ezberdinekin, galda-bainuaren luzera eta sakoneraren arteko ia erlazio lineala agertzen zela. Aldiz, potentzia konstante mantenduz eta aitzinapen-abiadurak aldatuz, ezin izan zuen abiadura eta galda-bainuaren geometriaren arteko erlazio zuzenik aurkitu, ordura arteko ereduak ziotenaren aurka.

Soldadura prozesuen egonkortasunari erreparatu zion Leek eta sor zitezkeen fluxuen arteko talkek galda-bainua kolapso egoerara eraman zitezkeen aztertu zuen [Lee, 2002]. *Keyhole* konikoa simulatuz eta Fresnelen teorian oinarriturik, barneko islatze anizkuna ezarri, bere zenbakizko ereduak lurrunaren eta hurrupadura-efektuaren presioak barneratzen zituen. Hala ere, kalkuluak errazteko, materialaren propietateak tenperaturekiko konstante mantendu zituen Leek.

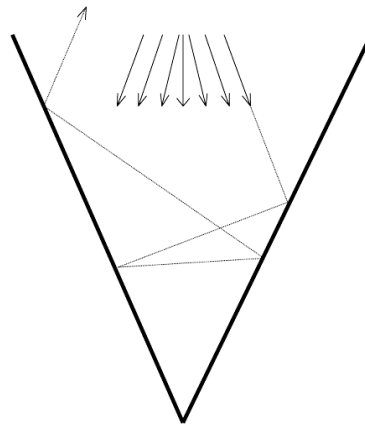
$$A_{\theta} = 1 - R_{\theta} = 1 - \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1 + (1 - \varepsilon \cdot \cos \theta)^2}{1 + (1 + \varepsilon \cdot \cos \theta)^2} + \frac{\varepsilon^2 - 2\varepsilon \cdot \cos \theta + 2 \cos^2 \theta}{\varepsilon^2 + 2\varepsilon \cdot \cos \theta + 2 \cos^2 \theta} \right) \quad [51]$$

p_{θ} : izpi zehatz baten eraginez xurgaturiko potentziaren proportzioa

R_{θ} : islatatutako potentziaren proportzioa

θ : izpi erasotzilearen angelua

ε : konstante dielektrikoa



Irudia IV.20: Barrunbe konikoan gertatutako islatzeen eskema [Lee, 2002]

Sistemak onar zezakeen potentzia gaindituz gero, hurrupadura-presioek eta gainazal-tentsioek goi eta behe fluxuaren arteko talka eragin zezaketela ondorioztatu zuen. Hala ere, ez zuen bere eredu esperimenduekin balioztatu eta, hortaz, ezin da eredu zuzentzat jo.

*Keyhole*aren barrunbean gertatutako islatzeen analisiarekin jarraituz, Chok beste eredu bat proposatu zuen, Fresnelen islatze-koefizienteetan ere oinarriturik. Balioztatzeke, Nd:YAG laser pultsatu bidezko soldaduren profilak aztertu zituen, emaitzak ereduarekin bat zetozela ondorioztatuz baina zehaztasun-maila handirik lortu gabe [Cho, 2006].

Tsirkasek, analisi termikoen ereduarekin beste urrats bat emateko asmoz, iragarritako eredu termikoak erabili zituen geroko analisi mekanikoa burutzeko. [Tsirkas, 2003]. Tenperaturekiko

menpekotasuna duten materialaren propietateak erabiliz, elementu finituetako programen bidezko emaitzak aztertu eta entseguen balioztatu zituen.

$$q = \frac{2P}{\pi r_0^2 H} \cdot e^{1 - \left(\frac{r}{r_0}\right)^2} \cdot \left(1 - \frac{z}{H}\right) \quad [52]$$

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} \cdot [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad [53]$$

q : bero-fluxua

r_0 : *keyhole*aren hasierako erradioa (goialdean)

r : *keyhole*aren uneko erradioa

H : *keyhole*aren guztizko sakonera

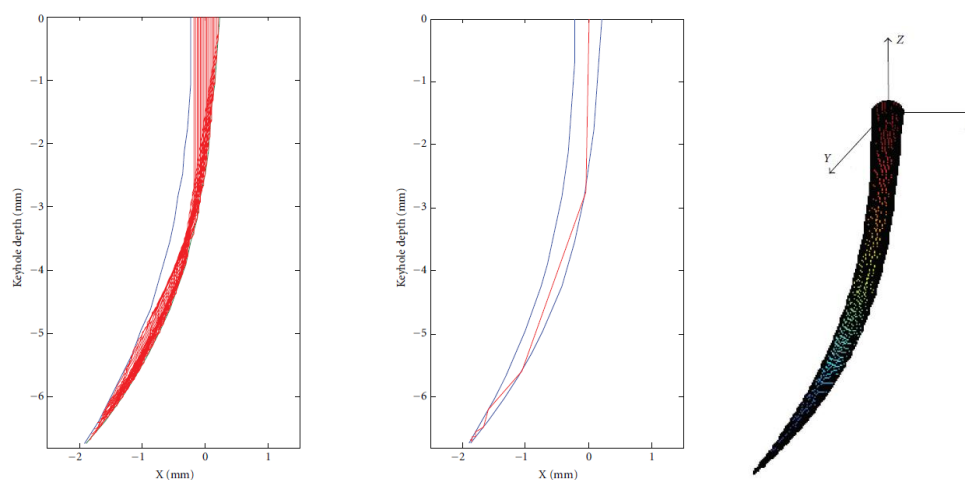
z : *keyhole*aren uneko sakonera

σ_v : Von Misesen tentsio baliokidea

$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$: tentsio nagusiak

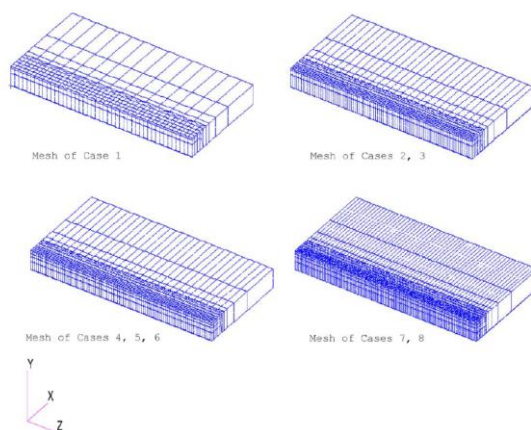
Beroaren banaketa gaussiarra erabili ostean, behin *keyhole*aren itxura koniko hurbildua lorturik, Von-Misesen irizpidea aplikatu zuen analisi mekaniko termo-plastikoa gauzatzeko. Era berean, konbekzio eta erradiazio galerez gain, ordura arteko eredu tridimentsionaletan ez bezala, materialaren fase-aldaketak kontuan hartzen zituen ereduak. Hala ere, ereduaren kostu konputazionalarekin arazo larriak zituen, aplikazio industrialetarako bere erabilera baztertuz.

Bide beretik jarraituz, Jinek *keyhole* hiru dimentsiotan simulatu zuen, barneko islatzeak eta Fresnelen xurgapena aintzat harturik. Bektore bidezko sistema bat sortuz, laserrak plasma zeharkatzean pairatutako islatzeak iragar zitzakeen bere ereduak, barrunbearen hormetako puntuek xurgatutako bero kantitatea definituz. Horrela, hurrengoia ondorioztatu zuen: *keyhole*aren goialdean, gainazaletik hurbil, aurrealdeak atzealdeak baino askoz ere energia gehiago xurgatzen zuela. Aldiz, behealdean, islatzeen ondorioz, aurrealdeak eta atzealdeak xurgatutakoa parekoa zela. Gainera, gero eta intentsitate handiagoa xurgatuz gero, bai lurrunak eragindako indarra bai hurrupadura-presioa handiagoak dira, *keyhole*aren behealdea zabalik mantentzea ahalbidetuz [Jin, 2012].



Irudia IV.21: Hiru dimentsioko *keyhole*aren diagrama, barneko islatzeak eta Fresnel xurgapena aintzat harturik [Jin, 2012]

Zenbakizko ereduez eta eredu analitikoek gain, elementu finituen metodoen erabilera ordenagailuen ahalmenaren handitzearekin hedatuz joan da. Zhang elementuen tamaina eta diskretizazio eskakizun minimoak bilatzen aritu zen, kasu ezberdinak entseguekin konparatuz [Zhang, 2004]. Hala ere, bere emaitzek aplikazio zuzen murrizta izan zuten.



Irudia IV.22: Elementu finituetako saretze ezberdinak tenperatura-eremua kalkulatzeko [Zhang, 2004]

Goldaken elipsoide bikoitzaren metodoa elementu finituekin uztartuz, Geryk bero-iturri mugikorra iragartzeko eredua garatu zuen, arku elektriko bidezko soldadura simulatzeko asmoz. [Gery, 2005].

$$q_f(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_f Q}{abc_f \pi \sqrt{\pi}} \cdot e^{-3 \cdot \left[\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c_f}\right)^2 \right]} \quad [54]$$

$$q_r(x, y, z, t) = \frac{6\sqrt{3}f_r Q}{abc_r \pi \sqrt{\pi}} \cdot e^{-3 \cdot \left[\left(\frac{x}{a}\right)^2 + \left(\frac{y}{b}\right)^2 + \left(\frac{z}{c_r}\right)^2 \right]} \quad [55]$$

$$k \cdot \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q_{int} = \rho c_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \quad [56]$$

$$q_c = h \cdot (T - T_0) \quad [57]$$

$$q_r = \varepsilon \sigma \cdot (T^4 - T_0^4) \quad [58]$$

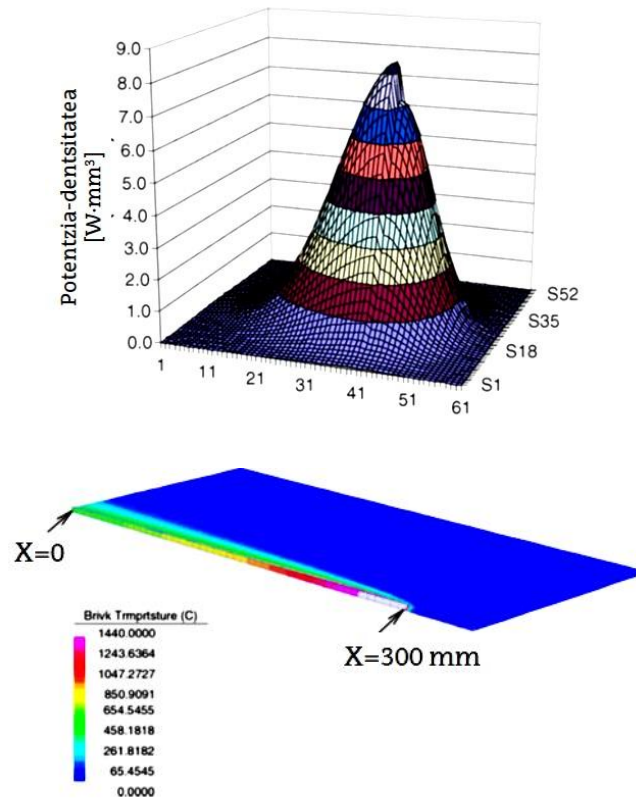
q_f, q_r : elipsoidearen aurrealdeko eta atzealdeko beroaren banaketa

a, b, c_f, c_r : elipsoidearen zenbakizko koefizienteak

Q_{int} : sorturiko barne-beroa

ε : emisibitate-koefizientea

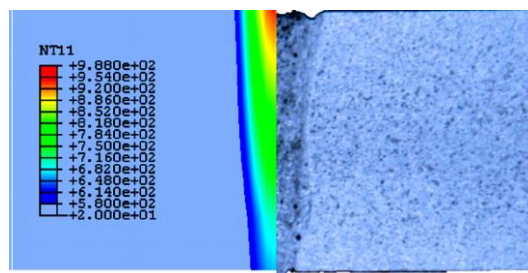
q_c, q_r : kondukziozko eta konbekziozko bero-fuxuaren galerak, hurrenez hurren



Irudia IV.23: Bero-iturri mugikorraren eredutzea Goldaken elipsoide bikoitza eta elementu finituak uztartuz [Gery, 2005]

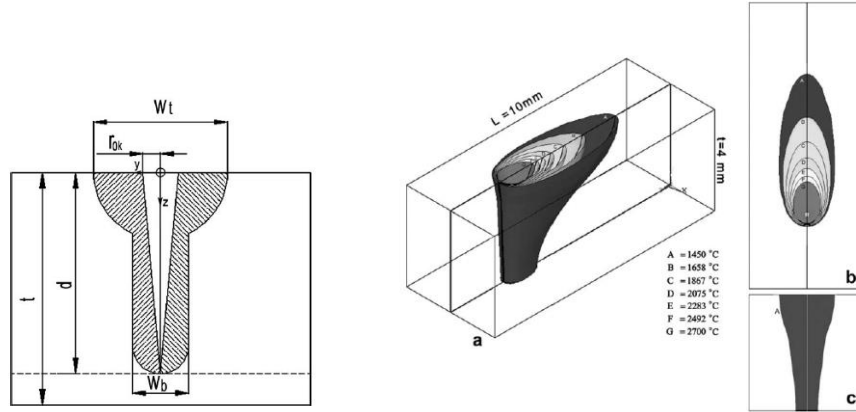
Aitzinapen-abiadurak, igorritako energiak eta bero-iturri barneko energiaren banaketak urrutako gunean eta beroak eragindako gunean eragin zuzena zutela ondorioztatu zuen. Era berean, eredu bidimentsionalen eta tridimentsionalen arteko diferentziak aztertu zituen, emaitza ezberdinak eskaintzen zituztela frogatuz. Hala ere, emaitza birtual argigarriak aurkeztu arren, lan honetan ez zituen bere emaitzak esperimenduekin balioztatu.

Agerikoa denez, ordenagailuen hobetzearekin batera elementu finituek indarra hartzen hasi ziren. Anlisi termikoaren osteko anlisi mekanikoa burutzeko, Spinak lehenik gainazaleko bero-iturri gaussiarra sakoneran zeharreko banaketa konikoarekin uztartu zuen bere ikerketan [Spina, 2007]. CO₂-ko laser soldadurarekin egindako esperimenduekin balioztatuz, bere eredu soldadura-profilen hurbilketa eta xaflek pairatutako deformazioak iragartzeko gai zen.



Irudia IV.24: Gainazaleko bero-iturri gaussiarra sakoneran zeharreko konikoarekin uztarketa eta entsegu enpirikoekiko alderaketa [Spina, 2007]

Ildoa jarraituz eta bero-iturria irudi geometrikoen banaketekin uztartuz, Kazemik Nd:YAG laserraren disko itxurako banaketa gausiarra gainazalean aplikatu eta sakoneran zeharreko bero lerroarekin eta *keyhole* konikoarekin konbinatu zituen [Kazemi, 2009]. Hiru dimentsioko elementu finituetako ereduak eratu zuen, eta altzairu herdoilgaitzaren gaineko entseguekin balioztatzean, eroankortasun-balio ezberdinak aplikatu zituen, hoberena bilatzeko. ANSYS programaren emaitzak azertu ostean, soldaduraren goialdeatik, hau da, koroatik hurbil zegoen zabalera simulatzean erreore handiegi agertzen zela ondoriozteatu zuen Kazemik.



Irudia IV.25: Disko itxurako banaketa gausiarra gehi *keyhole* konikoa [Kazemi, 2009]

Zain-ul-Abdeinek, aldiz, elementu finituetako ereduak esfera hutsa kono moztuarekin konbinatzen zituen. Entsegua balioztatzeko, 6056T4 aluminio aleaziozko xafiak laser bidez soldatu zituen, iragarritako distortsioak eta hondar tentsioak errealitatean lortutakoekin erkatuz [Zain-ul-Abdein, 2009]. Ereduak hurbilketa ona eskaintzen zuen arren, sartutako sinplifikazioek (urtutako gunearen barne-mugimendu eza, adibidez) errorea sortzen zuen. Eta ondorioz, ereduak ez litzateke balizkoa egoera ezberdinetan zehaztasun nahikoa lortzeko.

$$Q_v = Q_c + Q_s = \frac{9\eta Pf}{\pi(1 - e^{-3})} \cdot \frac{1}{(z_e - z_i) \cdot (r_e^2 + r_e r_i + r_i^2)} \cdot e^{-3 \cdot \left(\frac{r}{r_c}\right)^2} + \frac{3\eta P(1 - f)}{4\pi \cdot (r_{es} - r_{is})^3} \cdot d_s \quad [59]$$

$$Q_c = \frac{9\eta Pf}{\pi(1 - e^{-3})} \cdot \frac{1}{(z_e - z_i) \cdot (r_e^2 + r_e r_i + r_i^2)} \cdot e^{-3 \cdot \left(\frac{r}{r_c}\right)^2} \quad [60]$$

$$Q_s = \frac{3\eta P(1 - f)}{4\pi \cdot (r_{es} - r_{is})^3} \cdot d_s \quad [61]$$

$$r_c = r_i + (r_e - r_i) \cdot \frac{z - z_i}{z_e - z_i} \quad [62]$$

Q_v : guztizko bero-fluxu bolumetrikoa

Q_s : esfera hutsaren bero-fluxuaren banaketa lineala, soldadura-kordoiaren zabalera zehazteko

r_{es}, r_{is} : esfera hutsaren kanpo- eta barne-erradioak, hurrenez hurren

d_s : esfera hutsaren bero-fluxuaren banaketa-parametroa, non

$$d_s = 1 \text{ } r_{es} \text{ posizioan eta } d_s = 0 \text{ } r_{is} \text{ posizioan}$$

f : konoari emandako bero-fluxuaren proportzioa

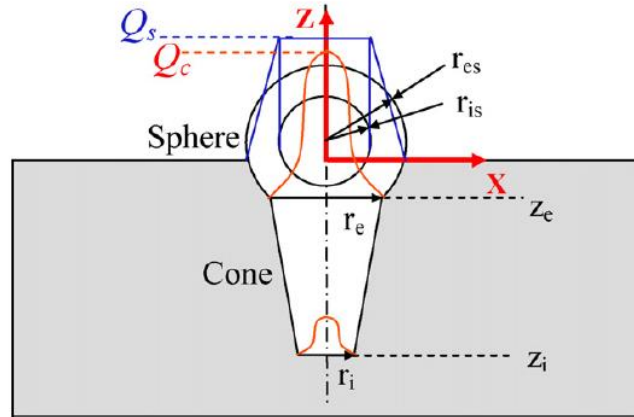
η : efizientzia (beste kasu batzutan, absorbitate-maila lez adierazten dena)

Q_c : konoaren bero-fluxuaren banaketa gaussiarra, keyholearen itxura zehazten duena

r_c : konoaren erradioa

z_e, z_i : konoaren goi- eta behe-posizioen koordinatuak, hurrenez hurren

r_e, r_i : konoaren erradio maximo eta minimoa, hurrenez hurren



Irudia IV.26: Bero-iturri konikoa gehi esfera hutsaren eredua [Zain-ul-Abdein, 2009]

Industriaren eskakizun berezietan erantzuteko, laser-soldadura eta arku bidezkoa bateratu zituen Kongek, prozesu hibrido honen simulazioa burutu zuelarik. Horretarako, laserra Goldakaren elipsoide bikoitzarekin eredutu zuen eta arkuak, aldiz, profil gaussiar zilindrikoarekin [Kong, 2011]. Agerikoa denez, teknika klasikoaren konbinaketa aintzat hartzen zuten ereduak hedatzen hasi ziren.

Yadavak, garaturiko elementu finituetako ereduari, bero-banaketa gaussiarra proposatu zuen, baina hurrengo berrikuntza sartuz: materialaren bero espezifikoaren uneko tenperaturarekin erlazionatuta zegoen, fase-aldaketako bero-sorraren efektua barneratuz. Inconel 718 aleaziozko xafletan diametro txikiko zuloak laser bidez burutu zituen eta eraikitako ereduak balioztatu zuen. Sarea konstante mantenduz, fase-aldaketaren frontea sarean zehar higitzen zihon, soldatze baldintzen arabera. Emaitza onak aurkeztu arren, bi dimentsioko ereduak zen Yadavarena, hiru dimentsioetara eramateko aukera aztertu gabe utzirik [Mishra, 2011].

Xiak sortutako ereduari, fibrazko laser bidez eratutako soldadurak azter zitezkeen, disko zirkular gaussiarra eta bero-iturri zilindrikoa uztartuz [Xia, 2014]. Azken honek Fresnelen islatzeen ondoriozko intentsitate hazkundera kontuan hartzen zuen. Bestalde, antzeko beste ereduarekin alderatuz, Xiarenak potentziaren banaketa zehazteko parametroak barneratzen zituen. Horrela, zati bat diskoarentzat bideratzen zen, eta bestea, zilindroarentzat. Hala ere, hiru dimentsioko eredu landua izan arren, ez zuen jarioaren mugimendua kontuan hartzen eta materialaren xurgapen-koefiziente konstantea onartzen zuen.

$$q_c(x, y) = \frac{3f_1\eta P}{\pi r_c^2} \cdot e^{-3 \cdot \left[\frac{(x^2+y^2)}{r_c^2} \right]}$$

Potentzia hazkorreko bero-iturri zilindrikoa (*keyhole*ko Fresnel absorzioa eredutzeko) [63]

$$q_v(x, y, z) = \frac{6f_2\eta P}{\pi r_v^2 h} \cdot e^{-3 \cdot \left[\left(\frac{x^2+y^2}{r_v^2} \right) \cdot \left(\frac{mz+r_v}{mh+2r_v} \right) \right]}$$

Bero-iturri zirkularra (plasmaren alderantzizko Bremsstrahlung xurgapena) [64] eredutzeko

η : efizientzia (beste kasu batzutan, absorbitate-maila lez adierazten dena)

r_c : bero-turri zirkularren erradioa

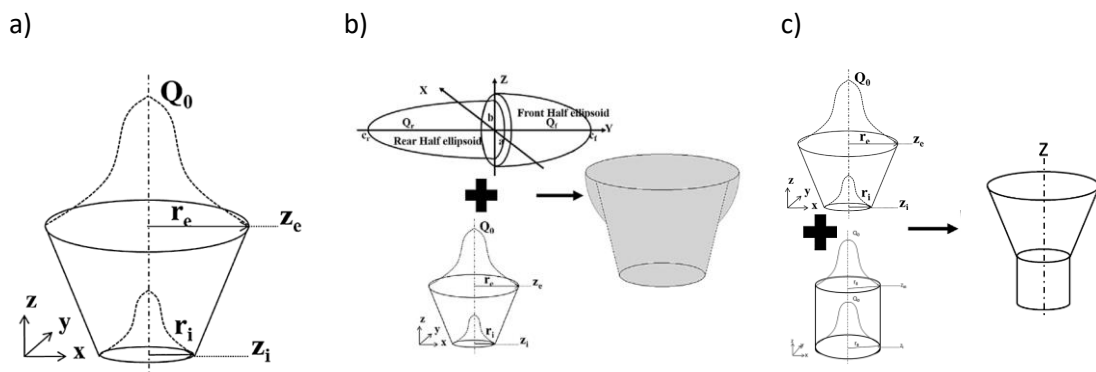
r_v : bero-iturri zilindrikoaren erradioa

f_1, f_2 : potentzia koaren eta diskoaren artean banatzeko parametroak

m : beroaren hazkunde-parametroa

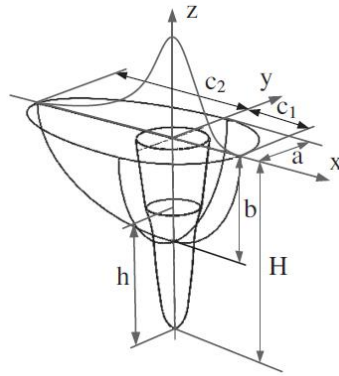
h : keyholearen sakonera

Irudi geometrikoekin jarraituz, Chukkanek hiru energia-banaketa ezberdin analizatu zituen: hiru dimentsioko kono moztua, hiru dimentsioko kono moztua gehi elipsoide bikoitza eta hiru dimentsioko kono moztua gehi oskol zilindrikoa. Elementu finituetako programen bidez azterketa termo-elasto-plastikoa gauzatu zuen. Profilen itxura geometrikoa, ziklo termikoa, hondar-tentsioak eta distortsioak iragartzeko gai zen ereduak. Nd:YAG laser bidezko soldadurekin altzairu herdoilgaitzaren entseguak egin eta hiru aukerekin konparatuz, hurrengoa ondorioztatu zuen: hiru ereduak emaitza onargarriak eman arren, emaitza hoberenak konoa gehi oskol zilindrikoa zuenak eskaintzen zituela [Chukkan, 2015]. Hala ere, saiakuntza kopurua urria zen, ereduak kasu oso zehatzerako mugatuz. Hortaz, ezin daiteke edonolako prozesu-baldintzekin zuzenean aplikatu.



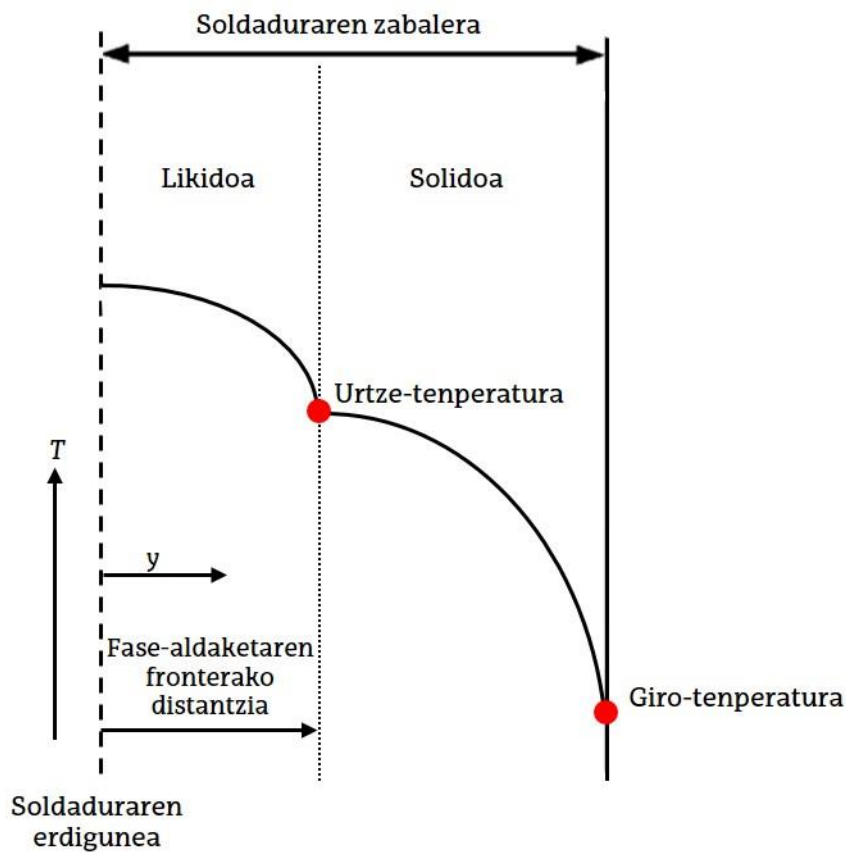
Irudia IV.27: Kono moztua oinarritzat duten energia-banaketak: a) Soila; b) Elipsoide bikoitza gehituz; c) Oskol zilindrikoa gehituz [Chukkan, 2015]

Jiangek, era berean, irudi ezberdinen batuketara erabili zuen bere ereduak sortzeko. Soldaduraren zabalera zehazteko, Goldaken elipsoide bikoitza erabili zuen. Sakonerarako, ordea, gorputz gaussiar birakor eta kono moztuaren batura, azken honen dimentsioa laserraren fokuen arabera izanik. Materialaren propietate konstanteak erabiltzen zituen ereduak, entseguekin balioztatzean errore geometriko handiak aurkeztuz [Jiang, 2016].



Irudia IV.28: Elipsoide bikoitza, gorputz gaussiar birakorra eta kono moztua uztartzen dituen eredu [Jiang, 2016]

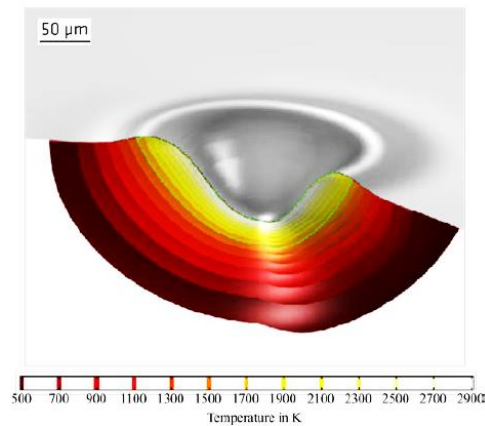
McCord eta bere taldea, aldiz, Jariakinen Dinamika Konputazionalaz (*Computational Fluid Dynamics – CFD*) baliatu zen Stefanen problema lez ezagutzen dena eredutzeko [McCord, 2016]. Hau da, solido- eta likido-egoeren arteko fase-aldaketa analitzeko eta bero iturriek sortutako gune urtuen eta solidoen portaera eta neurrien iragarpena burutzeko. Horretarako, soluzio analitikoak erdietsi zituzten, bai egoera iragankorrerako, bai egoera egonkorrerako.



Irudia IV.29: Stefanen problemaren eskema

Egun, oraindik eredu ezberdinen bila dabilta ikerlariak, entseguekin bat etor daitezkeen ereduaren emaitzen bila. Horren adibide dira Lange edo Coelho. Lehenak, laser pultsatu bidezko soldaduraren kasuan galda-bainuaren portaera definitzea helburu duen eredu sortu du. Marangoni-efektuak kontuan harturik, bero-iturri gaussiara eta Fresnelen islatzeak zehaztuz,

Yb:YAG bidezko entsegu empirikoekin alderatu du bere eredia. Hala ere, hobekuntzen beharra aitortzen du, balioztatzea zehatzagoa izan dadin [Lange, 2018].



Irudia IV.30: Bero-iturri gaussiarra, Fresnelen islatzeak eta Marangoni-efektua uztartzen dituen eredia [Lange, 2018]

Aipaturiko bigarren kasuan, Coelhok AA6013-T4 aluminiozko aleazio aeronautikoetako laser-soldadurak aztertu ditu. Bero-iturri berdina aplikatuz, lortutako emaitzen aldagarritasuna ondorioztatu du [Coelho, 2018]. Rosenthalek bere garaian, 1940an, aurkeztutako emaitzetan oinarritzen da Coelhoren lana.

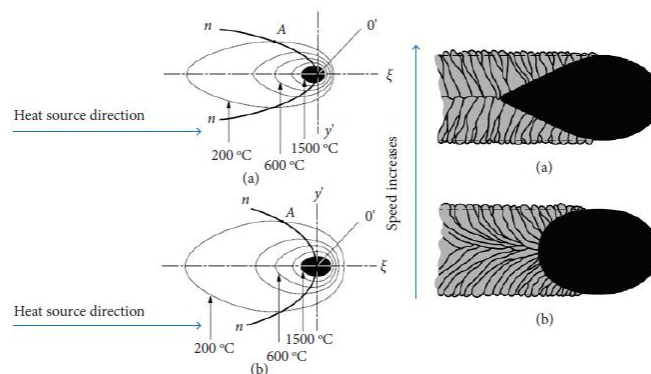


Figure 1. Thermal gradient and shape of the molten pool in different speeds (a) and (b) [Kannatey-Asibu Jr. 2009].

Irudia IV.31: Bero-gradiente eta galda-bainuaren profila abiadura ezberdinekin [Coelho, 2018]

IV.2.2. Ereduen garapenaren irakurketa

Aitzindarien lehen ikerkuntzetatik 80 urte igaro arren, soldadurarako erabilitako bero-iturrien eredutzea etengabeko hobekuntza-prozesuan murgildurik dago. Gainera, kapituluan zehar azaldutako ereduez gain, *wobble* bezalako soldadura-teknika konplexuek eskaintzen duten bideragarritasuna aztertu beharra dago. Aluminiozko edo titaniozko aleazioetan ikerlariek teknika hau aztertu arren, ez da nikel oinarritutako aleazioentzat eredu sendorik aurkitu. Hori dela eta, lan honetan mugimendu trokoidala oinarri duen laser-soldadura eredutzea izango da helburu, industria aeronautikoan erabiltzen diren piezetan aplikazio zuzena izan dezan.

V. Kapitulua. Garatutako eredia

V GARATUTAKO EREDUA

Laser bidezko soldaduren ereduak sortzean, hainbat alde aintzat hartu behar dira. Landutako materialaren propietate eta geometriaz gain, bero-iturria irudikatuko duen banaketa energetikoa aukeratu behar da. Banaketa hori laserraren ekarpenarekin bat etorri behar da, hau da, modu gaussiarra, *Top-Hat*, toroidala edo moduanitza irudikatuko duen eremua sortu beharra dago. Eremu horrek beroak erasotutako gunean aplikaturiko energiaren irudia emango digu. Behin hura definituta, bero-transmisioak sortutako tenperatura-aldaketak iragartzeko ekuazioak aukeratu behar dira.

Soldatze-prozesuan lortutako emaitzen aldagarritasuna aintzat harturik, ereduak orokortasun mugatua dutela onartu beharra dago. Gertatutako fenomenoak azaldu eta iragartzeko ekuazio ugari eta konplexuak aurkitu arren, ohikoena material eta laser mota bakoitzarentzat ekuazioak egokitu behar izatea da. Are gehiago, lan honetan aurkezten den *wobble* teknika bidezko soldaduraren eredian, orain arteko ekuazio klasikoek kontuan hartu ez dituzten faktore geometrikoak edota denbora-faktoreak barneratu dira. Horrela, prozesu enpirikoan gertaturiko mugimenduek eta igorritako potentziak duten eragina kuantifikatzeko gai da ereduak, hurbilpen errealistagoa lortuz.

Problema termiko bat ebazteko, hiru modu klasiko daude:

1. **Analitikoa:** bero-transmisioaren ekuazio diferentzialak integrazioaren bidez ebazten ditu. Baina, kasu errazak ebazteko baino ez du balio.
2. **Zenbakizkoa:** elementu finituen metodoan oinarriturik dago. Interpolazioen bidez, diskretizaturiko piezaren elementuen portaera banan-banan zehazten da. Hainbat software komertzial daude xede hau betetzeko.
3. **Diferentzia finituak:** elementuak banan-banan aztertzen dira metodo honekin. Deribatu partzialak gehikuntza finituetan bihurtuz, problema termikoa ebaztea lortzen da.

Lan honetan aurkezturiko eredian, bero-transmisioa definitzen duten integralak ebazteko Fourier-en transformatuaren teknika erabiltzen da. Hau da, modu analitiko batetik abiatuz eta integralak ebazteko zailtasunak kontuan harturik, tresna matematiko honetaz baliatzen da ereduak, zenbakizko tekniken oinarriaz baliatuz eta puntuz puntuko analisisa eginez.

Eskuratutako eremu termikoa azkar kalkulatzeko gai izateari esker, material edota laser mota ezberdinen aldaerak modu arinean txertatzeko aukera eskaintzen du ereduak. Hortaz gain, hiru dimentsiotako saretzea aplikatzeko aukerari esker, piezan zehar tenperaturaren eboluzioa zehaztasunez definitzea ahalbidetzen da.

Materialaren absortibitatea, eroankortasuna eta difusibitatea, aplikaturiko laser-izpiaren intentsitatea eta laser-sortaren higidura kontuan hartzen dituen oinarritik abiatuz, ereduak laser bidezko soldaduraren emaitza iragartzeko gai da. Simulaturiko soldadura-prozesuak sortutako hiru dimentsiotako eremu termikoa aztertuz, soldaduren profil geometrikoa iragar daiteke, fase aldaketek hura definitzen dutelarik. Era berean, mikroegituraren ezaugarriak kalkulaturako hozte-gradientearen bidez zehatz ditzake ereduak.

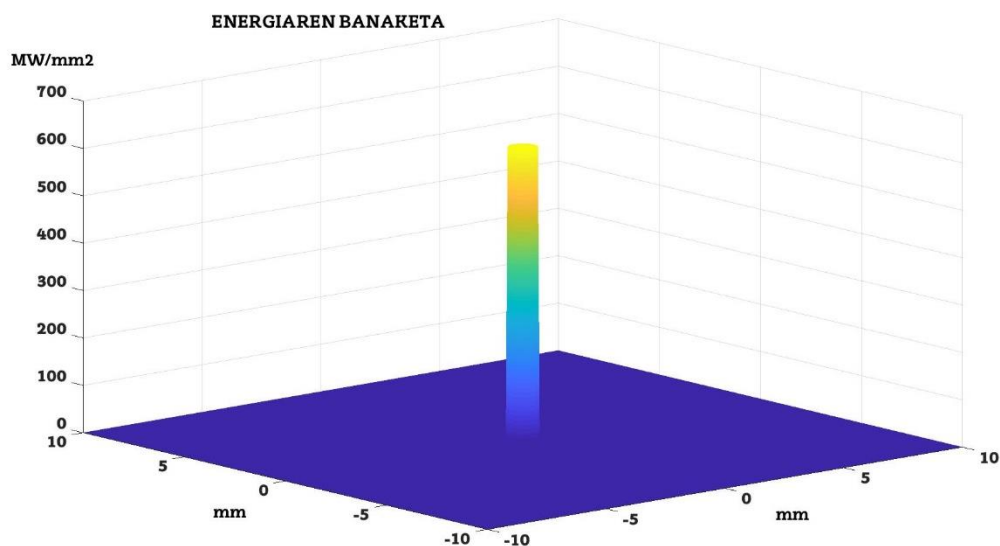
V.1. BERO-TRANSMISIOA

V.1.1. Energia-banaketa

Laserrak igorritako energiak piezaren azaleran nola eragiten duen eredutzeko, erasotutako gunean potentziaren banaketa-funtzioa definitu beharra dago. Erabilitako makineriaren arabera, energia-eremua ezberdina da, banaketa guztiz homogoneoa edo gaussiarra izan daitekeelarik, besteak beste. Azalera handiagoa betetzeko asmoz *spot* txikien bidez *wobble* teknika erabiltzean, aldiz, ereduan ondoriozko energia-banaketa hurbildua aintzat hartu beharko da.

Kasu honetan, banaketa zirkular homogoneoa erabili da, azalera osoko puntu guztiek potentzia-dentsitate berbera jasotzen dutelarik. Erasotutako gunearen diametroa harturik (d), erabilitako potentzia (P) azalera horretan zehar (x eta y ardatzen norabideetan) banatzen da, ondoriozko potentzia-dentsitatea zilindrikoa (I) lortuz. Hau da:

$$I(x, y) = \begin{cases} \frac{4P}{\pi \cdot d^2} & , \sqrt{x^2 + y^2} \leq \frac{d}{2} \\ 0 & , \sqrt{x^2 + y^2} > \frac{d}{2} \end{cases} \quad [65]$$



Irudia V.1: Energiaren banaketa zirkular homogoneoa azalerako

Era berean, laserraren higidura simulatzeko, garatutako ereduan erasotutako gunearen posizioa denboraren eta aitzinapen-abiaduraren menpe dago. Denbora-tarteak ezarritako irizpideen arabera zehaztuta daude, *wobble*ak sortutako ondoz ondoko eraztunen artean ahalik eta gainjartze txikiena egon dadin.

Eredua azalera zirkularreko bero-eremuak simulatzeko garaturik dago. Gainera, x norabide bakarreko aitzinapen-abiadura hartzen du kontuan, gainazalean zehar mugitzen delarik. Hau da, ereduan bero zirkulu bat piezaren azaleratik pasarazten da, higidura ardatz bakarrean gertatuz. Sinplifikazio hau bero-eredu klasikoetan aldaketak sartuz lortu da, mugimendu konplexuago bat, *wobblea* kasu, era errazean simulatu ahal izateko.

V.1.2. Carslaw-Jaeger

Beroaren problemari soluzioa bilatzeko, ebazpen analitikoa hartu da oinarritzat. Rosenthalen teoriaren arabera, bero-iturri puntual batek eragindako temperatura-igoera formula honen bidez defini daiteke:

$$T(x, y, z) = \frac{P_0}{2\pi k R} e^{-\alpha \cdot (x-x'+R)} \quad [66]$$

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + y^2 + z^2} \quad [67]$$

Baina nahiz eta laserraren eraso-gunea oso txikia izan, azalera bat bezala eredutzea beharrezkoa da errealitatekin ahalik eta hurbilen egon dadin. Igorritako energia piezaren gainazalean sakabanatuz, potentzia-dentsitatearen (I) kontzeptua barneratzen duen formula ezarri zuen Rosenthalek:

$$T(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{I(x', y')}{2\pi k R'} e^{-\alpha \cdot (x-x'+R)} dx' dy' \quad [68]$$

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2} \quad [69]$$

Temperatura kalkulatzeko era analitiko hau kasu orokorrerako erabil zitekeen, kasu zehatz bakoitzerako aldaketak aplikatu beharko zaizkiolarik eta landutako piezen geometriak formula baldintzatuz. Lan honetarako, Inconel 718 xaflen laser bidezko soldadurak eredutzeko, Carslawen eta Jaegerren 1946. urteko bildumatik beroa solido erdi-infinituetan nola hedatzen den definitzen duen hurrengo integrala hartu da:

$$T(x, y, z) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A \cdot I(x', y') \cdot W(x-x', y-y', z, v) dx' dy' \quad [70]$$

$$W = \frac{e^{\left[\frac{-v}{2\alpha} \cdot (x-x'+R)\right]}}{2\pi k R} \quad [71]$$

$$R = \sqrt{(x-x')^2 + (y-y')^2 + z^2} \quad [72]$$

Formula hauen arabera, materialaren propietateak (A absortibitatea, k eroankortasuna eta α difusibitatea) eta bero-iturriaren mugimendua aintzat hartzen dira. Difusibitateak materialaren dentsitatearekin eta bero espezifikoarekin erlazio zuzena du.

Materialak xurgaturiko potentzia-dentsitatea definitzeko, formulan $A \cdot I$ produktua erabiltzen da. Intentsitatearen banaketaren posizioa unez une kalkulatu, piezaren puntu ezberdinek beroa prozesuaren denboraren arabera jasoko dute. Horretaz gain, W funtzioak (ek. [71]), unitateak $K \cdot W^{-1}$ direlarik, bero iturri puntual bat lan-pieza erdi-infinituaren gainazalean zehar higitzeko balio du.

Guztira, $A \cdot I \cdot W$ produktua integral bikoitzean barneratuz, xurgatutako potentzia-dentsitatea eta W faktorearen x eta y koordenatuekiko konboluziozko biderketa definitzen da. Honen bidez, piezaren edozein puntuk zelako temperatura-igoera pairatu duen zehaztu daiteke.

Hala ere, soldatze-prozesuak, egoera egonkorrera heldu arte, egoera iragankorretik igaro behar du. Hori dela eta, denboraren eragina eredutuko duen adierazpena barneratu beharra dago (ek. [74]), temperatura-eremu trantsitorioak kontuan harturik. Carslawek eta Jaegerrek garatutako adierazpena orain arteko formularekin uztartuz:

$$T(x, y, z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} AI(x', y') W(x - x', y - y', z) U(R, t, v) dx' dy' \quad [73]$$

$$U(R, t, v) = \frac{R}{\sqrt{\pi}} \int_{1/\sqrt{\alpha t}}^{\infty} e^{-\frac{(R\tau^2 - \frac{v}{\alpha})^2}{4\tau^2}} d\tau = \frac{1}{2} \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{R - vt}{2\sqrt{\alpha t}} \right) + e^{Rv/\alpha} \left(1 - \operatorname{erf} \left(\frac{R + vt}{2\sqrt{\alpha t}} \right) \right) \right] \quad [74]$$

$$\tau = [\alpha(t - t')]^{-\frac{1}{2}} \quad [75]$$

Errore-funtzioa honela definiturik dago:

$$\operatorname{erf}(a) = \frac{1}{\sqrt{\pi}} \int_{-a}^a e^{-t^2} dt = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^a e^{-t^2} dt \quad [76]$$

Beraz, temperatura-eremua definitzeko ekuazio gidaria eraikia dago. Bertan, laserrak igorritako intentsitatearen banaketa, bere posizioaren arabera eragina eta denboraren menpeko iragankortasuna kontuan hartzen dira lan-piezaren edozein puntuko temperatura kalkulatu ahal izateko.

Aztertzen ari den puntu eta laserraren zentroaren arteko distantzia definitzen duen R parametroak posizio ezberdinak barnera ditzake. Gauzak horrela, laser-sortaren erdigunetik oso gertu dauden puntuen temperatura kalkulatzeko, R zerora hurbiltzen da, balio oso txikiak hartuz. Hau gertatuz gero, W parametroan singularitasuna agertuko da, R izendatzailean kokaturik baitago (ek. [71]). Arazoari irtenbidea emateko, R oso txikia den kasuetarako, W erabili beharrean, hurrengo W_0 parametroa erabili da:

$$W_0 = \frac{e^{-\frac{(v \cdot z)^2}{2\alpha}}}{2\pi \cdot k \cdot \Delta x \cdot \Delta y} \cdot \left[\Delta x \cdot \ln \left(\frac{w_1 + \Delta x}{w_1 - \Delta x} \right) + \Delta y \cdot \ln \left(\frac{w_2 + \Delta y}{w_2 - \Delta y} \right) - 4z \cdot \left(\arctan \left(\frac{w_1}{2z} \right) + \arctan \left(\frac{w_2}{2z} \right) \right) + 2z \cdot \pi \right] \quad [77]$$

$$w_1 = \sqrt{\left(\frac{\Delta^2 x + 4z^2 \cdot \cos^2 \beta}{\sin^2 \beta} \right)} \quad w_2 = \sqrt{\left(\frac{\Delta^2 y + 4z^2 \cdot \sin^2 \beta}{\cos^2 \beta} \right)} \quad \beta = \arctan \frac{\Delta y}{\Delta x} \quad [78]$$

Hau da, $z=0$ eta $R \ll 1$ denean, W parametroaren ordez $\lim_{z \rightarrow 0} W_0$ erabiltzen da. Horrela, singularitasunaren arazoa ekiditeaz gain, bero-iturriaren erdigunean gertatutakoa ondo aztertu eta analizatzeko aukera dago.

Arestian aipatu lez, metodo analitikoaren desabantaila nagusienetakoa ebazpena lortzeko zailtasuna izan ohi da. Integral bikoitzak beste metodo batzuekin ebatz daitezkeen arren (integrazio anitzeko iteraziozko metodoa, adibidez), metodo horiek oso geldoak dira Fourier-en transformatuarekin alderatuz. Eta eredu honekin bilatu nahi izan dena moldakortasun eta arintasun handiko simulatzeko tresna da. Hori dela eta, integralak ebazteko Fourier-en transformatuen bidezko metodoa erabili da, MATLAB programa komertzialaren moduluak, FFT2 kasu, eskainitako aukeraz baliatuz.

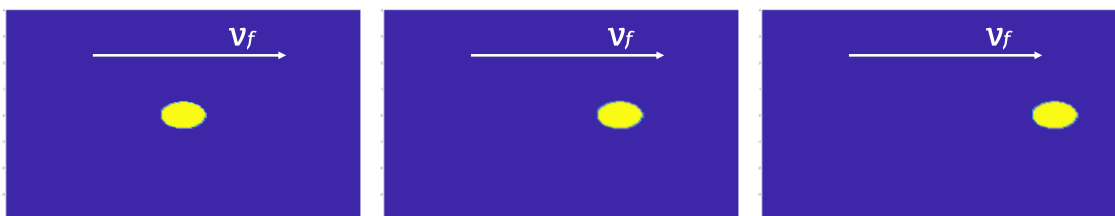
V.2. FOURIERREN TRANSFORMATUA

Ebazpen analitikoaren zailtasunak saihesteko asmoz, bi aukera aztertu izan dira: integrazio anitza eta Fourier-en transformatua.

Lehenengo kasuan, kostu konputazionala gehiegizkoa zela ondorioztatu zen. Ondorioz, bi dimentsiozko Fourier-en transformatua programazio kodean barneratzeari ekin zitzaion. Konboluzioaren bidezko metodoa aprobetxatuz, tenperatura-eremuaren kalkulurako definitutako integral bikoitza ebazten du ereduak. Horrela, saretearen puntu guztiak independenteki kalkulatu dira, metodo analitiko batetik sasi-zenbakizko batera igaroz.

Lehenik eta behin, garatutako ereduak intentsitatearen transformatua burutzen du. Sartutako potentzia simulatu nahi den azalergatik zatituz, potentzia-dentsitatea lortzen da (ek. [65]). Honen ostean, programan sorturiko saretearen puntuak banan-banan aztertzen dira, beroak erasotutako gune zirkularraren barnean aurkitzen diren jakiteko. Hala gertatuz gero, puntu horri intentsitate balio zehatza esleitzen zaio.

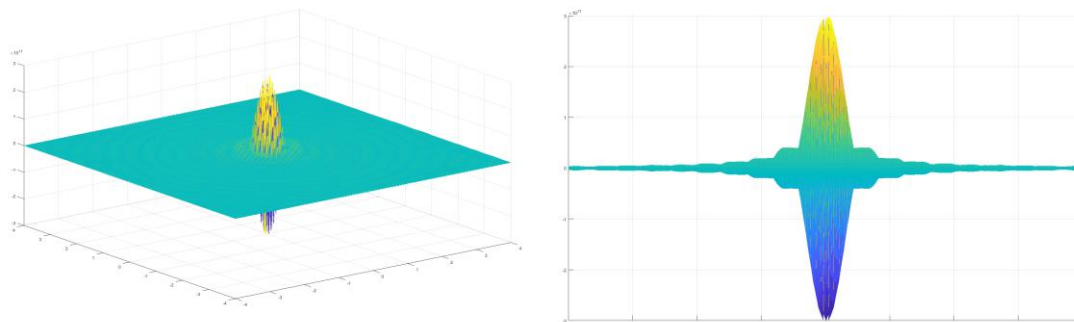
Agerikoa denez, azaleraren bi dimentsio osorik barne hartzen dira, geruza horizontalak sortuz eta z altuera ezberdinak independenteki aztertuz. Era berean, denbora une bakoitzean, bero-iturria higitzen doan heinean, kalkulaturiko $F(l)$ intentsitatearen Fourierren transformatua aldatuz joango da.



Irudia V.2: Bero-iturriaren mugimendua denboran zehar

Beraz, higidura barneratzen duen aldea bero-iturriaren mugimendu linealarekin eredutzen da. Hortaz, R parametroan ez da higidura barneratzen.

Intentsitatearekin egin legez, W eta U parametroekin gauza bera burutzen du ereduak. Puntu bakoitzerako balio ezberdinak lortuz, beraien arteko biderketaren Fourierren transformatua kalkulatu du, hau da, $F(W \cdot U)$.



Irudia V.3: Energiaren banaketa zirkular homogeneoaren Fourierren transformatua

Horren ostean, Fourierren transformatuaren bidez eraldaturiko I , W , eta U parametroen bi aldean arteko biderketa egiten da. Hortaz, behin temperatura-eremuaren bi dimentsioko Fourier transformatua lortu ostean ereduak puntu bakoitzaren temperatura-igoera kalkulatzeko, alderantzizko Fourierren transformatua erabiltzen du. Horren ostean, puntu bakoitzaren absorbitate (A) eta saretze-unitateen azalera (dS) kontuan hartzen dira (eskalarrak izanda, prozesuaren amaieran biderka baitaitezke) eta emaitzari hasierako temperatura gehitzen zaio (giro-tenperatura, 293 K).

$$T(x, y, z, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} A \cdot I(x', y') \cdot W(x - x', y - y', z) \cdot U(R, t, v) dx' dy' \quad [79]$$

$$F(T) = A \cdot F(W \cdot U) * F(I) \quad [80]$$

$$T(x, y, z, t) = A \cdot F^{-1}(F(T)) \cdot dS + T_0 \quad [81]$$

Alta, teoria klasikoetatik hartutako ekuazioek ez dute higidura trokoidala duen prozesua eredutzeko gaitasunik. Beraz, *wobble* teknika ereduaren barneratu ahal izateko, hainbat egokitzapen egikaritu behar izan dira. Beraien artean, *spotak* sortutako eraztunen azalera eta azalera zirkularra bete ahal izateko igarotako denbora definitu behar dira, horretarako, azalera-eta denbora-faktoreak eraikiz.

V.3. WOBBLE

Higidura hau erabiltzen duten laserrek bi mugimendu uztartzen dituzte. Alde batetik, aitzinapen-mugimendu linealarekin bat datozenak, bero iturriak azalera zeharreko ardatzean

zehar aurrera egin dezan. Bestetik, aldi berean mugimendu zirkularrak eraikiz doa *spota*, bete behar duen azaleraren arabera lan-piezen gainazalaren zabalera zehatz baten eraginez.

Gauzak horrela, bi mugimendu hauek ereduaren barneratzeko, hainbat alderdi hartu dira kontuan:

1. **Aitzinapen-abiadura lineala (v_l).** Izatez, teoria klasikoetako ekuazioetan v parametroak ordezkatzeko duena.
2. **Abiadura periferikoa (v_p).** *Wobbleak* eraiki nahi dituen eraztunen perimetroa deskribatzeko abiadura.
3. **Sortutako eraztun elipsoidalen neurriak.** Higidura honen bidez, elipse antzeko irudiak sortuz joango da *spota*. Hori dela eta, luzera eta zabalera zehatzeko aukera eskaintzen dute eskannerrek. Hala ere, luzera eta zabalari balio berbera ematea erabaki da, eraztunei ahalik eta itxura borobilena emateko eta eroankortasunak eta difusibitateak eragindako bero-gradienteak norabide guztietan ahalik eta berdinenak izan daitezzen.

Eredua sortzean, aukeretako bat *spotak* deskribatzen duen mugimenduaren ekuazioa zuzenean eraiki eta barneratzea izan zen. Baina honek arazo handi bat sortu zuen: kostu konputazional izugarri handia. Laserrak sortutako tenperatura-eremua kalkulatu nahi izanez gero, eredu sasi-zenbakizkoa izanda, *wobblearen* irudi osoan zehar *spotaren* posizio guztiak kontuan hartu behar zituen. Eta posizio bakoitzean potentzia-banaketa eta bere integrala burutzeari ekin behar zitzaion. Bestalde, aipatu lez, ekuazio klasikoek aitzinapen-abiadura kontuan hartzen zuten, baina ez periferikoa.

Beraz, bi aukera agertu ziren. Lehena, *spotaren* posizio guztiak kalkulatu, izugarriko kostu konputazionala zuen eredu sortzea (lan honen hasierako helburuaren aurka) edo abiadura periferikoarentzat teorian "toki" bat aurkitzea, ekuazioetan barnera zitezten. *Spotak*, posizio bakoitzaren ostean, hurrengo posizio berri bat hartuko luke. Honen irizpidea hurrengo litzateke: denbora-urrats bakoitzean, *spota* piezaren gainazalaren toki zehatz baten agertuko zela, sistemaren kalkuluan bero iturriaren kokapen hau oinarritzat hartuz.

Abiaduraren v parametroaren ordezkari higidura zirkularraren eta linealaren erresultantea erabiliz, adibidez, emaitzak ez zetozen bat ondorengo entsegu enpirikoekin. Gainera, kalkulak burutzeko oso eredu geldoa zenez, modifikazioak sartzeko eta emaitza berriak egiaztatzeko, denbora askoren beharra zuen. Hainbat frogaren ostean, tresnaren bideragarritasuna aztertu eta aukera hau baztertu zen.

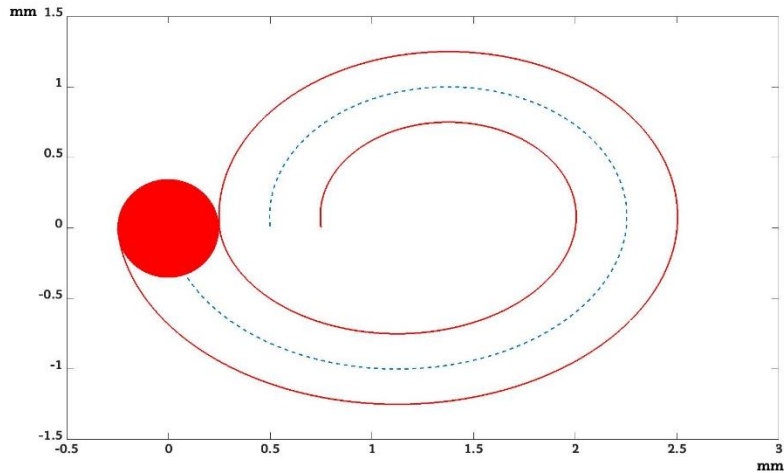
Hori dela eta, *wobbling* teknika barnera zezakeen eredu sortzeko asmoz, hurrengo bigarren aukerari heldu zitzaion. Honetan, arestian aipatutako *spotaren* berehalako agerpenaren irizpidea hartu zen aintzat. Baina aldaketa nabarmen batekin: denbora-urrats bakoitzean agertutako bero iturria ez zen *spota* izango, baizik eta honek sortutako eraztuna.

Honen ondorioz, eraztunek soilik higidura lineala izango zuten, teoria klasikoarekin bat etorritik eta abiadura periferikoaren arazoa saihestuz. Hala ere, bi arazo berri agertu ziren: energiaren banaketa berriaren egokitzapena, eta honen ondoriozko eroankortasun-efektu berriak kontuan hartzea.

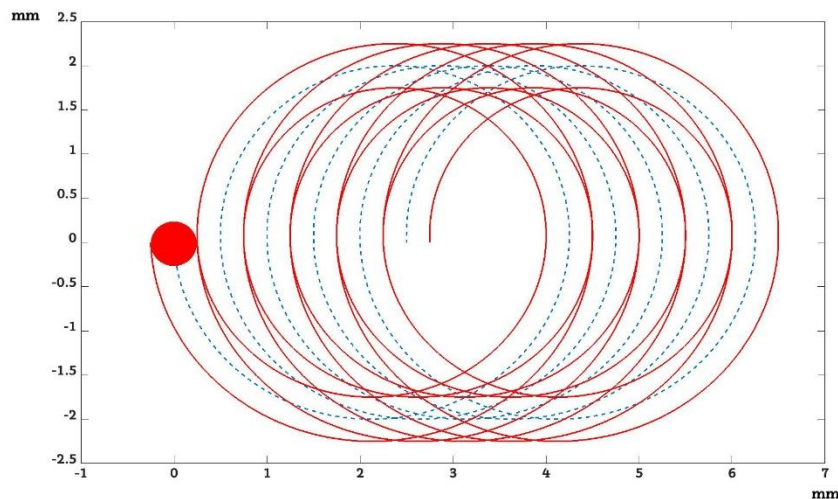
V.4. BARNERATUTAKO FAKTOREAK

V.4.1. Azalera-faktorea

Higidura zirkularra linealarekin uztartzean, ezinezkoa da eraztun itxiak lortzea. Hau da, *spota* hasierako puntura berrizteltzen saiatzean, ardatzean distantzia bat aurreratu egin denez, irudi irekia marraztuko da.



Irudia V.4: Wobble-higidura trokoidalak eratuak oinarritzko irudia



Irudia V.5: Wobble-teknikaren bidez deskribaturiko ibilbidearen diagrama

Hori dela eta, garaturiko eredu sinplifikazio bat barneratu da: eraztun itxiak bata besteari ondoan agertzen dira denbora-une bakoitzean. Abiadura periferikoa aitzinapen-abiadurarekin alderatuz askoz handiagoa denez, eraztunak bat-batean sortzearen kontzeptua onartzen du ereduak. Horrela, irudi zehatzak izateari esker, energiaren banaketa diskretua buru daiteke. Era

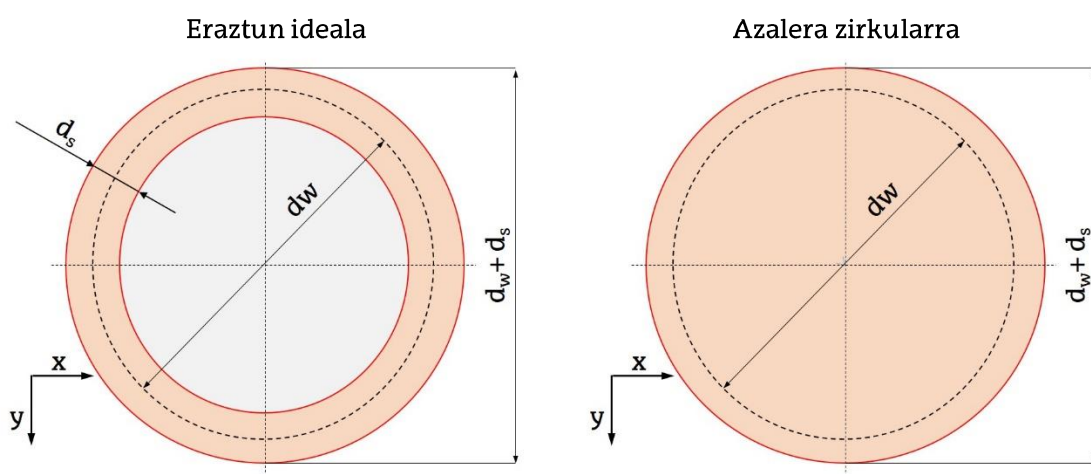
berean, bi eraztunen artean ahalik eta gainjartze txikiena gerta dadin, abiadura linealaren eta periferikoaren artean erlazio zuzena eraiki da.

Potentzia-dentsitateari dagokionez, ereduak zirkulu betea hartzen du kontuan. Aldiz, eraztun kontsekutiboen idealizazioan, azalera kalkulatzeko unitatea eraztuna bera izango da. Beraz, bien arteko erlazioa bilatu beharra dago.

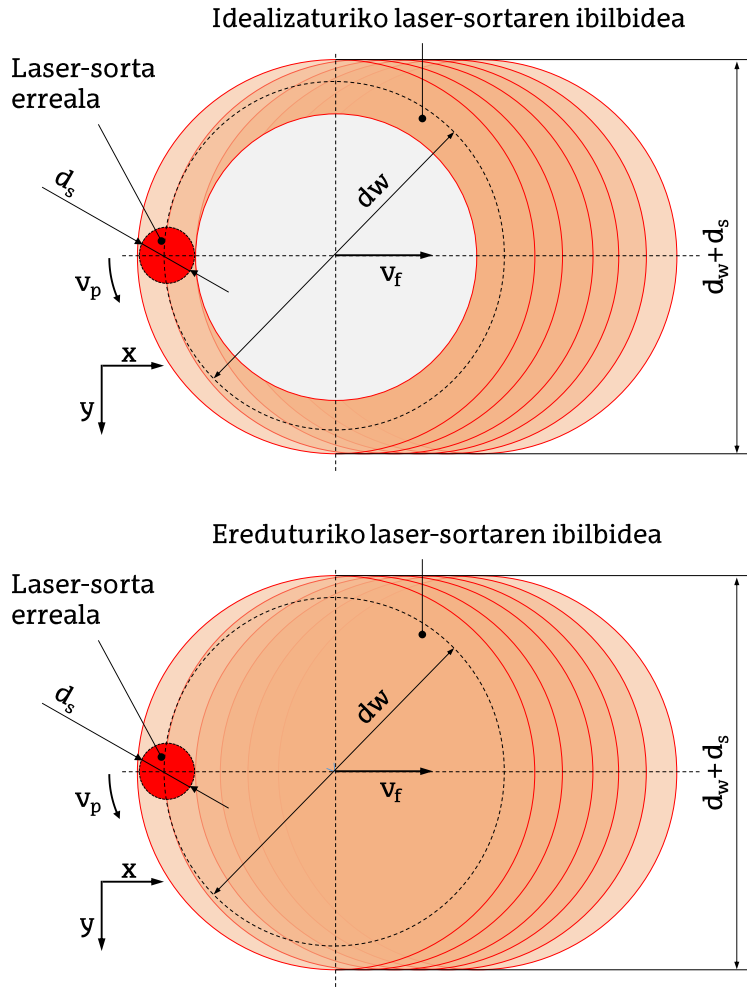
Kontuan harturik bai *spot*aren diametroa (d_s), hauxe makineriak behartutako parametroa izanik, bai *wobble* mugimenduak deskribaturiko diametroa (d_w), eskanerra kontrolatzen duen softwarearen bidez alda daitekeena, bi parametro hauen gehiketak eraztunaren kanpoko diametroa definitzen du. Simulaturiko azalera mugikorra (zirkulu betea, S_{sim}) idealizaturiko eraztunarena (S_{ideal}) baino handiagoa da. Hori dela eta, potentzia berdina erabiliz eta energiaren banaketa egiterako orduan, potentzia-dentsitate txikiagoa izango luke ereduko azalera, *wobble* teknika erabiltzean sortutako uztai azalaren balioetatik urrunduz. Desoreka hau konpontzeko, azalera-faktorea (S_{factor}) deritzon parametroa definitu da ereduan barneratua izan dadin. Horrela, azalaren arteko erlazioa eraikiz, eraztun batek jasotzen duen potentzia-dentsitatea zirkulu betean aplikatzen da. Simulaturiko potentzia-dentsitatea (P_{sim}) eraztunen hurbilpenak (P_{real}) jasotzen duenarekin berdinduz, bien arteko erlazioa eratu da.

$$\frac{P_{sim}}{S_{sim}} = \frac{P_{real}}{S_{ideal}} \quad [82]$$

Aukera hau baino lehenago, ereduan sartutako potentzia soilik eraztunaren azalera banatzea proposatu zen. Nahiz eta banaketaren eratzak zailtasun handirik ez izan, iragarpenek ez zuten soldadura-kordoen profil koherenterik ematen. Azalpena hurrengoa da: eredu analitiko ia zenbakizko bihurtzean, eraztunak urratsez urrats agertzerara behartzen dira, uztaien barnealdea denbora-une bakoitzean hutsik geratuz. Honen ondorioz, barnealdeko puntuek ez lukete potentziarik jasoko. Eraztunak, aldiz, potentzia guztia banatuko luke, desberdintasun oso handia sorraraziz bi gune hauen artean eta hurrengo denbora-uneari tenperatura-eremu oso kontzentratu bat esleituz. Hortaz, efektu hau leuntzeko, zirkulu beteen ereduak garatzearen beharrezkoa adostu zen.



Irudia V.6: *Wobble*-eraztun ideala eta azalera zirkularren aldeko alderaketa



Irudia V.7: Idealizaturiko eta ereduturiko laser-sorten ibilbideen alderaketa

$$S_{sim} = \frac{\pi \cdot (d_w + d_s)^2}{4} \quad [83]$$

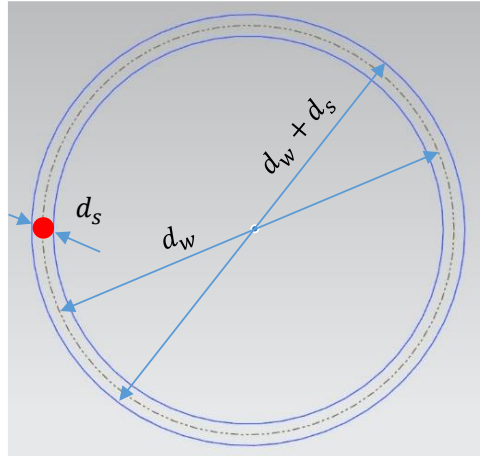
$$S_{ideal} = \frac{\pi \cdot (d_w + d_s)^2}{4} - \frac{\pi \cdot (d_w - d_s)^2}{4} = \pi d_w d_s \quad [84]$$

$$S_{factor} = \frac{S_{sim}}{S_{ideal}} \quad [85]$$

$$P_{sim} = P_{real} \cdot S_{factor} \quad [86]$$

Behin energiaren banaketan egokiturik, ondoz ondoko eraztun idealen posizioak zehazteri ekin zitzaion. Elkarren jarraiko bi uztairen artean hutsunerik egon ez dadin eta ahalik eta gainjartze txikiena lortzeko asmoz, errealitatean uztaien irudiak eraikitze denborak aztertu dira.

Eraztun itxi bat sortzeko denbora (t_{loop}) eta soldadura-kordioaren x ardatzean aurreratutako distantzia $spot$ aren diametroaren berdina lortzeko denbora (t_{width}) berdinduz, aitzinapen-abiadura eta abiadura periferikoaren arteko erlazio zuzena lortzen da.



Irudia V.8: Wobble-eratzun idealaren eskema eta spotaren kokapena

$$t_{loop} = \frac{loop\ length}{v_p} = \frac{\pi d_w}{v_p} \quad [87]$$

$$t_{width} = \frac{spot\ width}{v_f} = \frac{d_s}{v_f} \quad [88]$$

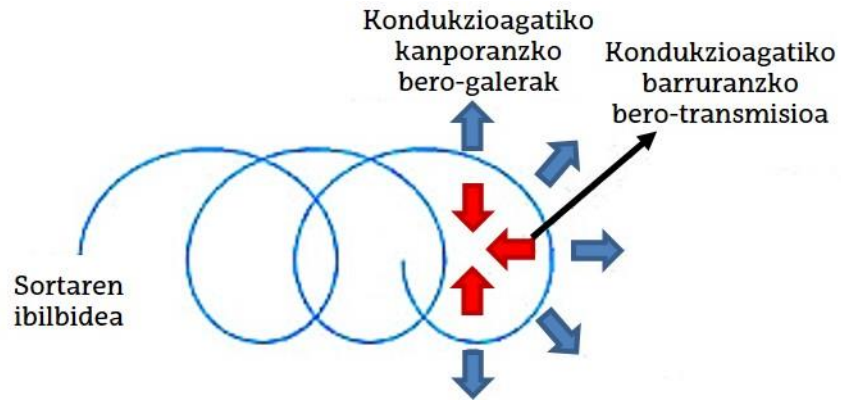
$$v_p = \frac{v_f \cdot (loop\ length)}{spot\ width} = \frac{v_f \cdot (\pi d_w)}{d_s} \quad [89]$$

Ereduan erlazio hau ezarririk, analizatu beharreko denbora-uneak denbora hauekin kointzidituarazi dira, ereduaren *step* bakoitza denbora horrekin berdinduz.

$$t_{step} = t_{width} = \frac{d_s}{v_f} \quad [90]$$

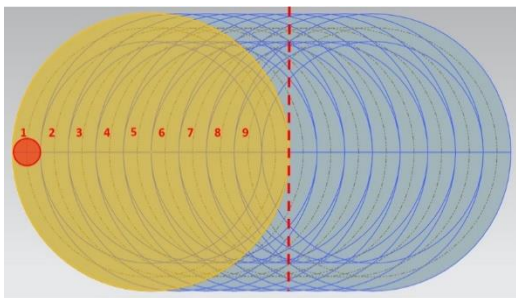
V.4.2. Denbora-faktorea

Behin azalaren arteko erlazioa ereduari sarturik, beste alderdi bati erreparatu behar zaio. *Spot*ak egindako ibilbidean, eratzun bakarrak hutsunea uzten du erdigunean. Hutsune hau betetzen joango da eratzun berriak agertzen doazen heinean. Era berean, hutsune honetan bero-iturriak ez du pieza erasotu, beraz, gune “hotz” legez kontsidera daiteke, eratzunaren beroa kondukzio bidez bai kanporantz bai barnerantz transmititu daitekeelarik.



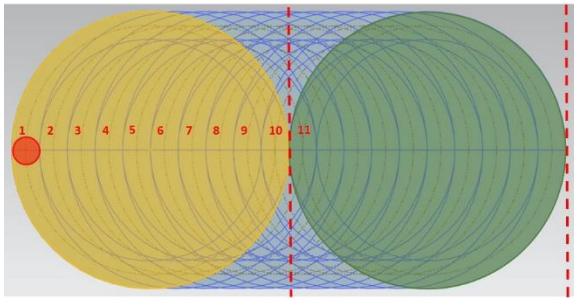
Irudia V.9: Wobble-higiduran zehar gertaturiko bero-transmisioen eskema: kanporanzko eta barruranzko bero-galerak

Lehenik eta behin, ereduak bero iturria zirkulu betea balitz bezala kontsideratzen duela aintzat hartuz, zirkulu hori eratzeko zenbat eratzun behar diren kalkulatu beharra dago. Horretarako, *wobble*ak deskribatutako diametroa eta *spot*aren tamaina kontuan hartuko dituen erlazioa bilatu da. Irizpide lez, kalkulu guztietan d_w/d_s zatikia zenbaki osoa izan behar dela ezarri da.



Zirkulu bat betetzeko behar den eratzun kopurua:

$$\frac{d_w + d_s}{d_s} - 1 \quad [91]$$



Bi zirkulu betetzeko behar den eratzun kopurua:

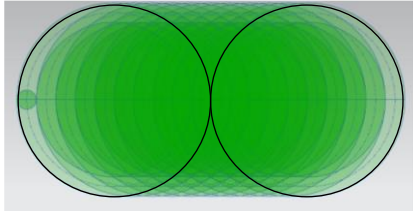
$$\frac{d_w + d_s}{d_s} + 1 \quad [92]$$

Irudia V.10: Zirkulu bete bat eta bi lortzeko eratzunen eskema

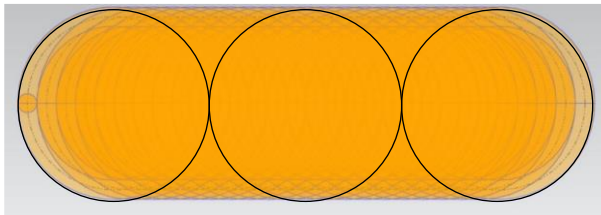
Ikusten denez, eratzunen atzealdea zirkulu horia betetzen doan heinean, aurrealdea zirkulu berdea betetzen joango da. Beraz, soldadura-kordoiaren lehen eta azken zirkuluak izan ezik, beste zirkulu guztie dagokien azalera energiarekin bi aldiz erasotzen da. Hau da, nahiz eta ondoko eratzunen arteko espazio minimoa programatu, azalera zirkular bakoitza bi aldiz betetzen da.

Horregatik, azalaren eraikitze prozesu hau analizatzeko, *wobble* bidez azalera zirkular soil bat sortzeko behar den denbora zehaztu zen. Horretarako, lehenik eta behin lau zirkulu kontsekutiboren irudia aztertuz, geometria honetan *spot*aren pasaldiak eta uztai kopuruak

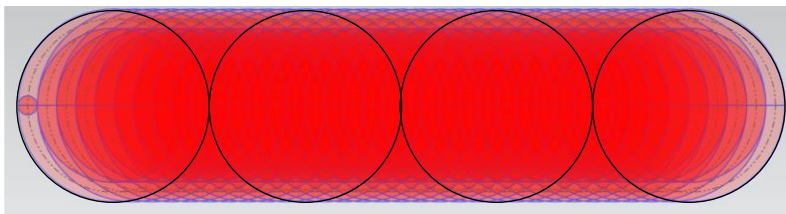
zehaztu ziren. Kalkuluak errazteko asmoz, geometria minimoak bi zirkuluz osatutakoa behar zuela onartu zen, hortik aurrera zirkulu osoak (eta ez zatiak) banaka gehi zitezkeelarik. Nahiz eta hiru zirkuluz osaturiko irudia nahikoa izan (hasiera eta amaiera zirkuluak gehi erdikoa, zeinek energia bi aldiz jasotzen duen), lau zirkuluz osatutako irudiak egonkortasun tarte oblongoa baimentzen zuela onartu zen, lehen eta azken zirkuluetan hurrupadura efektuak ager baitaitezke, besteak beste.



$$\frac{d_w + d_s}{d_s} + 1 \quad [93]$$



$$\frac{2 \cdot (d_w + d_s)}{d_s} + 1 \quad [94]$$

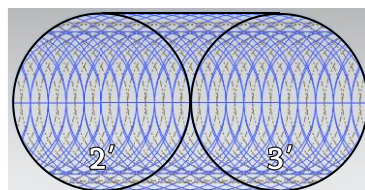
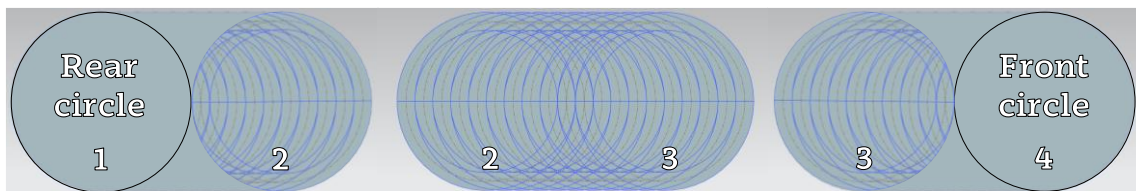


$$\frac{3 \cdot (d_w + d_s)}{d_s} + 1 \quad [95]$$

Irudia V.11: Soldadura-kordioa lortzeko eraztunen eskema

Hortaz, *wobble* bidezko eredu honetan, n zirkulu betez osaturiko kordioa sortzeko, eraztun kopuruak $[(n-1) \cdot (d_w + d_s) / d_s] + 1$ izan behar du.

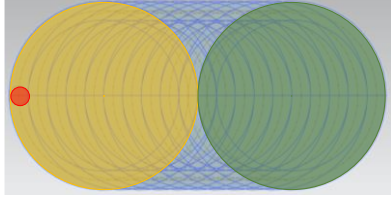
Lehen eta azken zirkuluak alde batera utzita (energia soilik behin jasotzen baitute), bi zirkulu betez eratutako geometria oblongoak $[(d_w + d_s) / d_s] + 1$ eraztun behar ditu sortua izateko. Hala ere, eraztun kopuru hau handiagoa da, pasaldi partzial gehiago jasotzen baititu atzeko eta aurreko zirkuluen eraginagatik:



Irudia V.12: Oinarriko soldadura-kordoi minimoa lortzeko eraztunen eskema

Beraz, nahiz eta 2-3 geometria sortzeko eratzun kopurua zehatza izan, 2'-3' geometriak *spot*aren pasaldiak ere jasotzen ditu, irudi oblongoan eratzun partzialak barneratuz.

Hau da, 2-3 bezalako geometria izango bagenu, *spot*ak igorritako potentzia P_s izanik, azalera hori betetzeko behar den energia hurrengoa litzateke.



$$N_{loops\ oblong} = \frac{d_w + d_s}{d_s} + 1 \quad [96]$$

$$t_{oblong} = t_{loop} \cdot N_{loops\ oblong} = \frac{\pi \cdot d_w}{v_p} \cdot \left(\frac{d_w + d_s}{d_s} + 1 \right) \quad [97]$$

$$E_{oblong} = P_s \cdot t_{oblong} = P_s \cdot \frac{\pi \cdot d_w}{v_p} \cdot \left(\frac{d_w + d_s}{d_s} + 1 \right) \quad [98]$$

Irudia V.13: Azalera oblongoa lortzeko eratzunen eskema

Azalera teorikoa (laukia gehi zirkulua):

$$A_{oblong} = (d_w + d_s)^2 + \frac{\pi}{4} \cdot (d_w + d_s)^2 \quad [99]$$



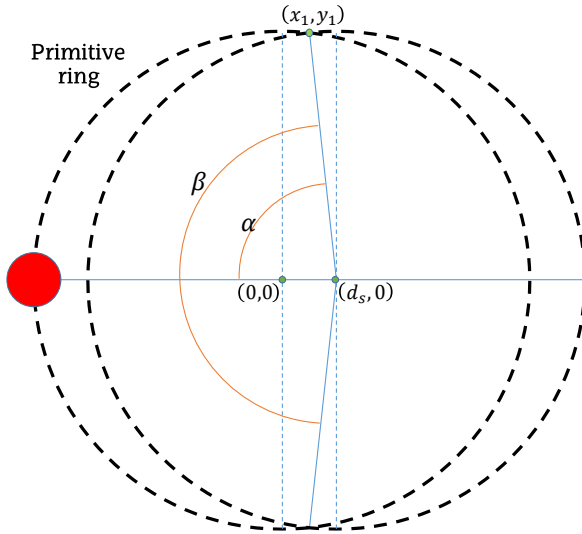
Eratzunen azalera kontuan harturik:

$$A_{oblong\ ideal} = A_{ring} \cdot N_{loops\ oblong} = \frac{\pi}{4} \cdot [(d_w + d_s)^2 - (d_w - d_s)^2] \cdot \left(\frac{d_w + d_s}{d_s} + 1 \right) \quad [100]$$

Irudia V.14: Wobble-higidurak eraturiko azalera oblongoa

Teorian energia-dentsitatea definitzeko hurbilpen egokia izan arren ($E_{oblong}/A_{oblong\ ideal}$), honek ez du prozesu erreala zehaztasunez eredutzen. Puntu honetara heldurik, hurrengoa ondorioztatu da: zirkulu guztiek, lehena eta azkena izan ezik, eratzun osoek emandako energiaren gain, pasaldi partzialen energia ere jasotzen dutela. Gauzak horrela, *spot*aren mugimendua geometrikoki aztertzea erabaki zen, *wobble*ak deskribaturiko uztai erako irudien posizioak unez unez behatuz. Hala ere, kordioaren luzera jakinik, ekuazio hauek eratzun kopuruen estimazioa egiteko baliagarriak dira (ek. [100]).

*Spot*aren zentroak sortutako ibilbidea aintzat harturik, sinplifikaturiko uztai kontsektiboaren geometriak aztertu dira. Jatorrizko uztaiaren koordenatuak ezarriz, pasaldi partzialen luzera kalkulatzeko hurrengo uztaiekin dituen ebaketa-puntuak (x_n, y_n) erabili dira. Azken finean, perimetro partzialen batuketak burutuz, *spot*ak zirkulu bete batean zehar egiten duen guztirako ibilbidea zehatz daiteke.



Irudia V.15: Oinarrizko eraztunaren eta hurrengoaren arteko mozketaren

Jatorrizko eraztuna:

$$x^2 + y^2 = \left(\frac{d_w}{2}\right)^2 \quad [101]$$

Eraztun orokorra:

$$(x - x_n)^2 + (y - y_n)^2 = \left(\frac{d_w}{2}\right)^2 \quad [102]$$

$$x_n = n \cdot d_s ; y_n = 0$$

Zirkulu beretik igarotako eraztun kopurua:

$$n = 1, \dots, N \rightarrow N = \frac{d_w}{d_s} \quad [103]$$

Ebaketa-puntua:

$$x_1^2 = (x_1 - nd_s)^2 \rightarrow x_1 = \frac{nd_w}{2} \quad [104]$$

Ordezkatuz:

$$\left(\frac{nd_s}{2}\right)^2 + (y_1)^2 = \left(\frac{d_w}{2}\right)^2 \quad [105]$$

$$y_1 = \pm \sqrt{\left(\frac{d_w}{2}\right)^2 - \left(\frac{nd_s}{2}\right)^2} = \pm \frac{1}{2} \sqrt{d_w^2 - n^2 d_s^2} \quad [106]$$

$$\tan \alpha = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{\frac{1}{2} \sqrt{d_w^2 - n^2 d_s^2}}{nd_s - \frac{nd_s}{2}} = \sqrt{\left(\frac{d_w}{nd_s}\right)^2 - 1} \quad [107]$$

$$\beta = 2\alpha = 2 \cdot \arctan \left(\sqrt{\left(\frac{d_w}{nd_s}\right)^2 - 1} \right) \quad [108]$$

Hortaz, *spot* eraztun berri bat eratzeko jatorrizko zirkuluaren barrutik deskribaturiko ibilbidea, β angelua perimetro osoarekiko kontuan harturik:

$$\text{loop length} \cdot \left(\frac{\beta}{2\pi}\right) = 2\pi \frac{d_w}{2} \cdot \left(\frac{\beta}{2\pi}\right) = d_w \cdot \arctan \left(\sqrt{\left(\frac{d_w}{nd_s}\right)^2 - 1} \right) \quad [109]$$

Kontuan izanik zirkulu bat betetzeko behar den eraztun kopurua $[(d_w + d_s)/d_s]-1$ dela, *spot* egindako ibilbide partzialen batuketak (L_{in}) guztirako ibilbidearen hurbilketa emango du:

$$L_{in} = d_w \cdot \sum_{n=1}^{\frac{d_w+d_s}{d_s}-1} \arctan\left(\sqrt{\left(\frac{d_w}{nd_s}\right)^2 - 1}\right) \quad [110]$$

Ibilbide partzial hauek guztiak burutzeko beharrezko denbora erreala kalkulatzeko, beharrezko eraztun kopurua, hau da, $[(d_w + d_s)/d_s]-1$, aitzinapen tarteen denborarekin biderkatuz lor daiteke:

$$t_{circular\ area}^{(linear)} \cong \left(\frac{d_w + d_s}{d_s} - 1\right) \cdot \frac{d_s}{v_f} \quad [111]$$

Hala ere, denbora hau ez da *spot*aren denbora efektiboa zirkulua betetzeko. Horretarako, soilik barnetik doan ibilbidea hartuko da kontuan. Perimetro partzialak zirkulu bakoitzetik bi aldiz igarotzen direnez (aitzinapena gertatzen den heinean, uztaien aurrealdeak eta ondoren atzealdeak erasotzen baitute), L_{in} bikoiztu egin beharra dago. Beraz, igorritako energiak zirkulu bat betetzeko behar duen denbora efektiboa perimetro osoa eta perimetro partzialen batuketaren berdina izango da:

$$t_{circular\ area}^{(effective)} \cong \frac{[2L_{in} + \pi \cdot d_w]}{v_p} \quad [112]$$

Faktore hau definiturik, ereduan dagoen azalera zirkular betea sortzeko beharrezko denbora efektiboa barneratu da. Azalera bat-batean sortu beharrean, horretarako denbora zehatza behar duela jakinda, uztaien barnealde hutserantz (ikus Irudia V.9) kondukzioz transmititutako beroaren eragina eredu du da, t_{factor} deritzon denbora-faktorearen bidez. Hortaz, tenperaturaren igoera leuntzeko asmoz, potentzia faktore honen bidez zatitu da. Faktore hau definitzeko, bero-iturriaren neurriak edota aitzinapen-abiadura bezalako sarrera-parametroen eragina aztertu beharra dago, beraz, entsegu enpirikoen bidez kalkulatu da.

$$P_{sim} = \frac{P_{real} \cdot S_{factor}}{t_{factor}} \quad [113]$$

Era berean, *spot*ak zirkulu bat betetzeko erabili beharreko azalera efektiboa zein den jakiteko, aurreko kalkuluetan oinarritu daiteke bere balio hurbildua lortzeko. Guztira, azalera efektiboa eraztun baten azalera (S_{ideal}) gehi eraztunen sekzio guztien batuketa izango da.

$$S_{circular\ area}^{(effective)} = S_{ideal} \cdot \left[1 + 2 \cdot \sum_{n=1}^{\frac{d_w+d_s}{d_s}-1} \arctan\left(\sqrt{\left(\frac{d_w}{nd_s}\right)^2 - 1}\right) \right] \quad [114]$$

Ereduan erabilitako azalera

Azalera erreal hurbildua



Irudia V.16: Ereduan erabilitako eta errealitatean hurbildutako azalera zirkularren erkatzea.

V.5. HIRU DIMENTSIOKO SARETZA ETA PUNTUZ PUNTUKO ANALISIA

Garatutako eredu laserrak igorritako beroaren eragina hiru dimentsiotan aztertze gai da. Horretarako, x eta y koordenatuetan azalera horizontalak definitu ostean, z norabidean, hau da, piezaren sakoneran zehar posizio ezberdinak zehaztuz, xaflaren geruza ezberdinetan agertutako temperatura-aldaketak kalkula daitezke.

Analisa burutzerakoan, bero-ekarpenak puntu bakoitzean nola eragiten duen kalkulatu da, analisi hau gainontzeko puntuetan burututakoarekiko independentea izanik.

Honek guztiak abantaila handia eskaintzen du zenbakizko ereduak alderatuz, zeinetan puntu bakoitzak besteengan eragin zuzena daukan. Honek elementu guztietan zeharreko bero-transferentzia aldi berean ebaztera behartzen du eta kostu konputazionala izugarri handitzen da.

V.6. KONBEKZIOA

Konbekzioaren gertakaria ereduaren barneratzeko, goiko eta beheko geruzak kontuan hartzen dira. Behin bi dimentsioko azalera eraturik (x eta y koordenatuek definiturikoak), z -ren posizioa aztertzen du ereduak. Baldin eta 0 bada, goiko geruzan dagoela esan nahi du eta konbekzioaren fenomeno aplikatzen zaie geruzako puntu guztiei. Era beran, baldin eta z -k sarturiko balio maximoa baldin badu, konbekzioak eragindako bero-galerak aintzat hartuko dira piezaren beheko aurpegiko puntu guztietan.

Kontuan izanik soldadura-prozesu gehienetan babes-gasa erabiltzen dela bai soldaduraren sakonera bermatzeko bai herdoiltze eta korrosioaren aurka lan egiteko, ereduaren konbekzio behartuaren fenomeno inplementatu da. Horretarako, h_{conv} parametroa erabili da.

$$q_{conv} = h_{conv} \cdot T(x, y, z) \quad [115]$$

$$FQ_{conv} = F(q_{conv}) \quad [116]$$

$$FT_{conv} = FW * FQ_{conv} \quad [117]$$

$$T_{conv}(x, y, z) = F^{-1}(FT_{conv}) \cdot dS \quad [118]$$

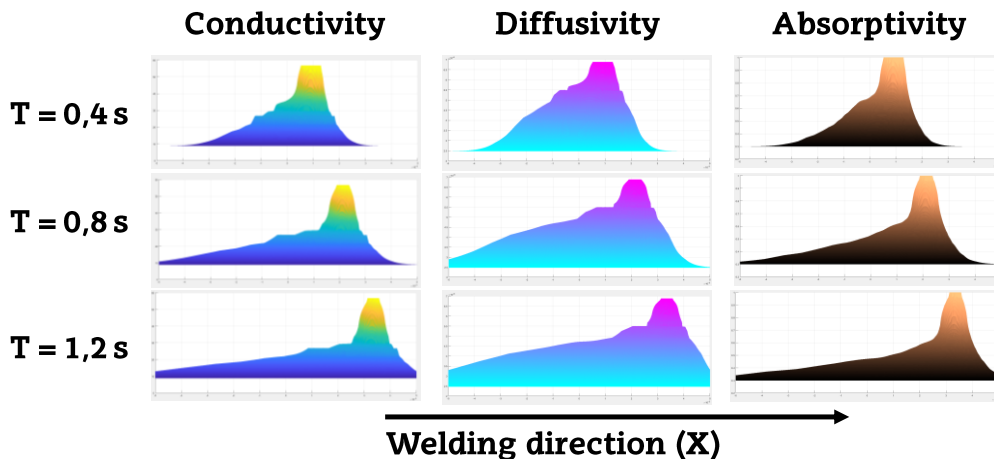
$$T(x, y, z) = T(x, y, z) - T_{conv}(x, y, z) \quad [119]$$

V.7. JARAUNTSITAKO TEMPERATURA-EREMUA ETA PROPIETATEEN UNEKO ALDAKETA

Eredu analitiko klasikoek, beroaren hedapena integralen bidez definitzen dutenez, temperatura-eremua denbora-une ezberdinetan iragartzeko gai dira. Hala ere, gehienek ez dute materialaren propietateen aldakortasuna aintzat hartzen, une bakoitzeko egoera kalkulatzeko propietate finkoak erabiltzen dituztelarik.

Garaturiko ereduan, analitikoa izatetik sasi-zenbakizkoa izatera igarotakoan, lan-piezaren edozein punturen egoera independenteki zehatz daiteke. Zenbakizko ereduak elementu ezberdinen arteko bero-transferentziak gerta daitezkeela kontuan hartzen duten bitartean, lan honetako ereduan elementuek pairatzen duten temperatura-igoera zehazterakoan erabiliko diren materialaren propietateak aurreko denbora-unean duten temperaturaren menpe egongo dira. Hau da, hasierako t_0 unean elementu guztiek temperatura berdina izanda (eredututako kasu honetan, giro-temperatura), t_1 unean puntu bakoitzak temperatura jakin bat izango du. Hortik abiatuz, orain t_2 uneko egoera kalkulatzeko, t_1 unean lortutako hiru dimentsioko temperatura-eremua abiapuntutzat hartuko du ereduak. Baina kasu honetan, jada temperaturaren banaketa ez da homogenea izango, beraz, puntu bakoitzari esleitzen zaizkion propietateak kalkuluak burutzean temperaturaren arabekoak izango dira.

XZ view
z = 0 mm



Irudia V.17: Kondukzioaren, difusibitatearen eta absorptibitatearen aldaketaren adibidea denboran zehar garatutako ereduan

Ereduan temperaturaren menpe dauden propietateak hurrengoak dira: absorptibitatea (A), eroankortasuna (k), dentsitatea (ρ) eta bero espezifikoa (C_p). Era berean, formulatan difusibitatea (α) barneraturik dago, azken hau beste propietateen menpekoea delarik.

$$\alpha(T) = \frac{k(T)}{\rho(T) \cdot c_p(T)}$$

[120]

Unean uneko egoera aztertzean, arestian aipatu legez, aurreko temperatura-eremua kontuan hartzen du ereduak. Irizpide honetatik abiatuz, nodo bakoitzaren temperatura kalkulatzeko burutu beharreko eragiketetan, materialaren propietateak unez une aldatzen joango dira. Materialen propietateen taulak oinarritzat hartuz, temperatura bakoitzari propietateen balio bat dagokio.

Egoera	Temperatura
1	$T_1 = T_0$
2	$T_2 = f(A_1, k_1, \rho_1, c_{p_1})$
3	$T_3 = f(A_2, k_2, \rho_2, c_{p_2})$
...	...
Q	$T_Q = f(A_{Q-1}, k_{Q-1}, \rho_{Q-1}, c_{p_{Q-1}})$
...	
Lurruntzea (vap)	$T_{vap} = f(A_{vap-1}, k_{vap-1}, \rho_{vap-1}, c_{p_{vap-1}})$

Taula V.1: Kalkulaturiko temperaturak eta beraien erlazioa aurreko urratseko propietateekin

Beraz, kalkuluetarako abiapuntua aurreko denbora-une zehatz batean eraikitako propietateen sarea izan dadin, progresio linealaren metodoa erabili da. Hau da, t_m uneko temperatura-eremua kalkulatzeko, t_{m-1} unean lorturikoa aintzat hartuko du ereduak. Baina t_m egoeran, ohikoena puntuen temperaturek materialen taulen temperaturekin ez kointziditzea da. Horregatik, progresio lineal hori burutzeko, hurrengo irizpidea kontuan hartu da (x, y, z) posizio guztietako propietate aldakorrak zehazteko:

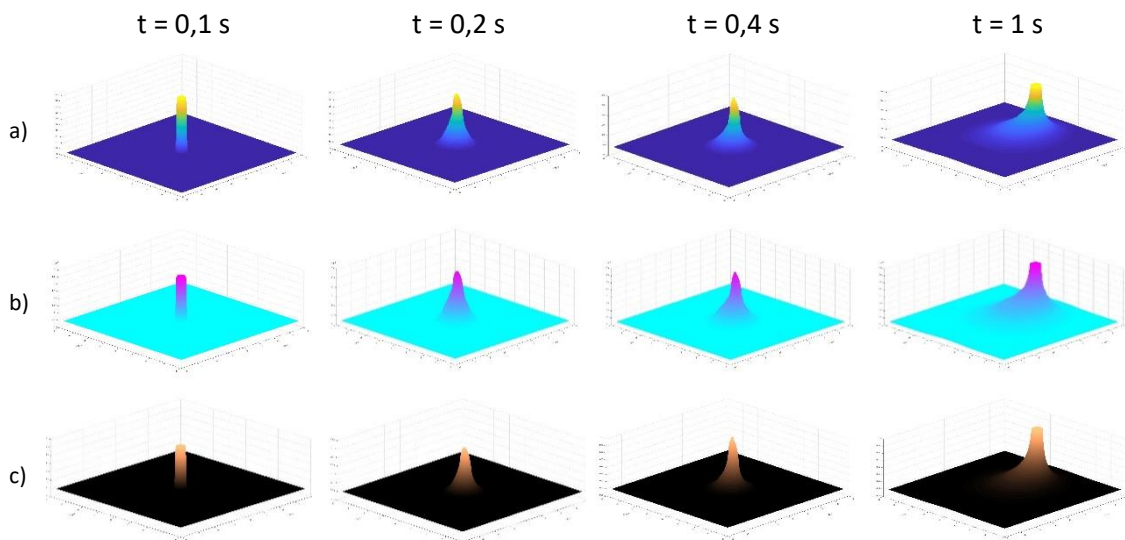
	$g = \frac{T_m - T_Q}{T_{Q+1} - T_Q}$	[121]	
	$A_m(x, y, z) = (A_{Q+1} - A_Q) \cdot g + A_Q$	[122]	
	$k_m(x, y, z) = (k_{Q+1} - k_Q) \cdot g + k_Q$	[123]	
$T_Q < T_m < T_{Q+1}$	\rightarrow	$\rho_m(x, y, z) = (\rho_{Q+1} - \rho_Q) \cdot g + \rho_Q$	[124]
		$c_{p_m}(x, y, z) = (c_{p_{Q+1}} - c_{p_Q}) \cdot g + c_{p_Q}$	[125]
		$\alpha_m(x, y, z) = \frac{k_m(x, y, z)}{\rho_m(x, y, z) \cdot c_{p_m}(x, y, z)}$	[126]

Taula V.2: Propietateen uneko aldakuntza progresio linealaren bidez

Behin t_m unean lorturiko propietateak zehazturik, eredu t_{m+1} uneko tenperatura-eremua kalkulatzeko prest dago. Kasu berezien artean, bi definitu dira. Alde batetik, hasierako egoera, non puntu guztiek giro-tenperaturako propietateak izango dituzten. Bestetik, lurruntze-tenperatura gaindituz gero, puntu horiek T_{vap} egoerako propietateak hartuko dituzte, inolako progresiorik aplikatu gabe.

		$A_m(x, y, z) = A_{vap}$	[127]
		$k_m(x, y, z) = k_{vap}$	[128]
$T_m \geq T_{vap}$	→	$\rho_m(x, y, z) = \rho_{vap}$	[129]
		$c_{p_m}(x, y, z) = c_{p_{vap}}$	[130]
		$\alpha_m = \frac{k_{vap}}{\rho_m \cdot c_{p_m}}$	[131]

Taula V.3: Propietateen finkatzea behin lurruntze-tenperatura erdietsita

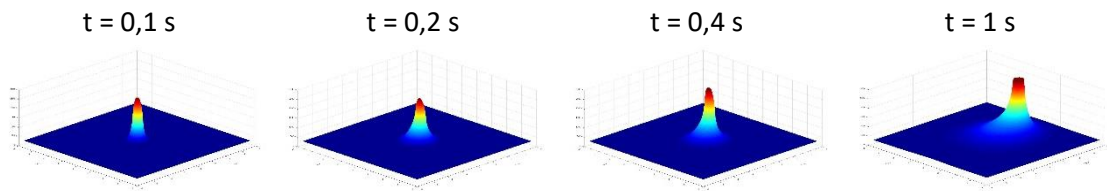


Irudia V.18: Propietate-eremu aldakorrak denboran zehar: a) Eroankortasuna; b) Difusibitatea; c) Absortibitatea (350 W, 3 mm·s⁻¹ eta *wobble* diametroa 1 mm)

Eredututako azalera zirkularrak bata bestearen ondoren ahalik eta gainjartze txikienarekin ager daitezten, denboraren balioak t_{step} parametroaren arabera programatzen ditu ereduak. Ondorenka eredututako azalera zirkularren arteko distantzia t_{step} parametroaren bidez zehazten da ereduari, non t_{step} eta aitzinapen abiaduraren arteko biderketak laser-izpiaren zentroak aurreratzen duen distantzia definitzen duen. Distantzia hau *spot*aren diametroaren (d_s) berdina izango da. Horrela, nahiz eta eredu zenbakizkoa izatera hurbildu, prozesuari jarraikotasunaren kontzeptua eman zaio. Honi esker, bai propietateen bai tenperatura-eremuen eboluzioa azter daiteke, beraien artean nola elkar eragiten duten ulertuz eta sakonduz.

$$t_{m+1} = t_m + \Delta t = t_m + t_{step}$$

[132]



Irudia V.19: Temperatura-eremu aldakorak denboran zehar piezaren gainazalean, egoera egonkorra lortu arte (350 W , $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ eta *wobble* diametroa 1 mm)

Ereduan metodo hau barneratuz, Carslaw-Jaeger ekuazioen zentzu teorikoari denboraren menpeko egoeren erlazioa gehitu zaio. Orain arte, teoria hori piezaren temperatura-igoera iragartzeko gai zen, denbora-unea edozein zelarik. Hau da, ez zion ardurarik $t=2 \text{ s}$ uneko egoera kalkulatzeko, adibidez, ea aldiune horretara heltzeko puntuen absortibitatea bidetik handituz edo txikituz joan den. Beraz, ez zuen aintzat hartzen piezaren uneko temperatura eta ondorioz, bere propietateak, giro-tenperaturarekiko desberdinak izan litezkeelarik. Garatutako erudian, ordea, bai. Adibidez, $t=0 \text{ s}$ unetik $t=2 \text{ s}$ unera heltzeko, $\Delta t=t_{step}$ ezarriz, eredu klasikoaren unez uneko egoeren korrelazio bat lor daiteke. Analogia bat eginez, pelikula baten fotogramak bata bestearen ostean nola sortu diren zehaztu da, fotograma jakin baten eraketarako bere aurrekoaren aztarna erabili behar delarik.

V.8. IRAGANKORTASUNA ETA EGOERA EGONKORRA

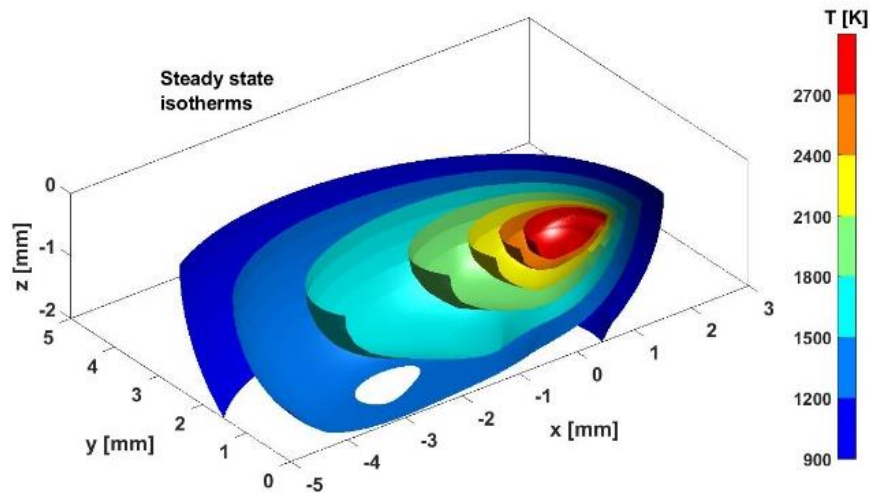
Laserrak igorritako sortak pieza erasotzen duen momentutik, *keyhole*aren eraketa-prozesua hasten da. Sortutako barrunbean, lurruna ionizatu eta plasma agertzen da. Prozesu hau, eredu askotan, kalkuluak errazteko berehalako prozesua dela onartzen da. Horren ostean, barrunbearen hormen aurkako presioaren eta aitzinapen-abiaduraren arteko oreka lortzen denean sistema egoera kuasi-egonkorrean dagoela onartzen du. Hau da, ikuslea bero iturriaren zentroan kokatuz gero, ez luke aldaketarik somatuko.

Lan honetan garatutako erudian, aurreko guztia irudikatzeko asmoz, inplementaturiko denboraren menpeko $U(R,t,v)$ faktoreari esker, temperatura-eremua uneoro ebalua daiteke. Hori dela eta, eremu hauen aldakuntza behatzeaz gain, ereduak soldadura-prozesua konstante izatera noiz heltzen den zehatz dezake.

Egoera egonkorra noiz erdiesten den jakiteko, ereduak ondoz ondoko egoerak aztertzen ditu. Baldin eta bi temperatura-eremu kontsekutiboan artean diferentziarik ez badago, egoera egonkorra lortu dela onartzen du ereduak eta aztertzeari utziko dio. Azterketa hau puntuz puntu burutzen du ereduak, kontuan izanik bero-iturria zenbat aurreratu den.

Hala ere, tenperaturaren aldakuntza txikiak onartzen dira, 5 K-ekoak hain zuzen ere, Fourierren transformatua eta sarezearen unitateen tamainaren arabera MATLAB programak emaitza apur bat ezberdinak eman ditzakeelako. Balio honekin, ondoz ondoko bi tenperatura-eremu erkatzean, egoera egonkorra erdietsi dela baieztatu daiteke.

$$T_{m+1} \left(i + \frac{d_s}{v_f \cdot \Delta x}, j, k \right) - T_m(i, j, k) \leq 5 \quad [133]$$



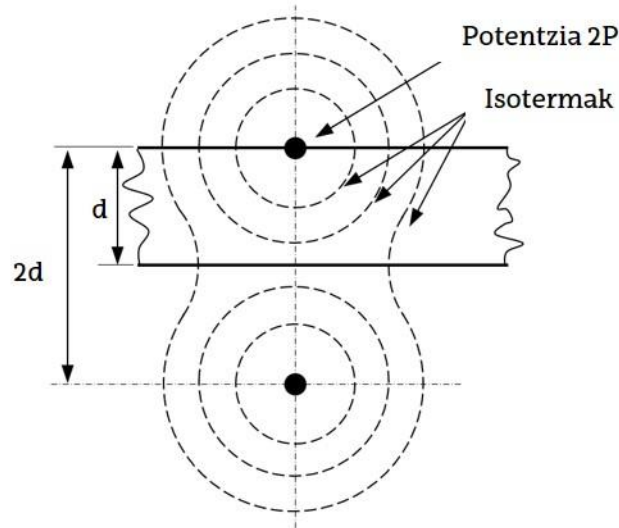
Irudia V.20: Tenperatura-eremu egonkorraren adibidea garatutako ereduan (350 W, 3 mm·s⁻¹ eta wobble diametroa 1 mm)

V.9. ROSENTHAL

Orain arteko analisisian hainbat berritasun barneratu arren, Carslaw-Jaegerren teorian oinarrituriko ereduak ez ditu aintzat hartzen galda-bainua sortzen den momentutik hasita agertzen diren jariakinaren barne mugimenduak [Carslaw, 1959]. Horretarako, bai Marangoni-efektua bai aitzinapen-mugimenduak sorturiko fronteen arteko lekualdatzea ereduak dira. Bero-polo anitzen ideian oinarriturik, alde batetik, ereduak urrutako fronteak aurrera egitean duen portaera kontuan hartzen du, eta bestetik, galda-bainua sakoneran zehar nola higitzen den.

Hau guztia ereduan sartzeko, Nunes-ek argitaraturiko eta Rosenthalen teorietan oinarrituriko ekuazioak egokitu eta barneratu dira. Lan horretan [Nunes, 1983] egileak beroaren ekuazio klasikoari materialaren barne mugimenduak gehitu zizkion.

Lehenengo eta behin, Rosenthalen eredu klasikoa barneratzeko, xafla baten aplikaturiko bero-iturri puntuala monopoloen banaketa geometriko errepikakorraren bidez irudikatzen da. Xaflaren z sakoneran zehar beroaren eragina zehazteko, 2d distantziaz aldendurik dauden 2P potentziako bero-iturriak definitzen dira, d xaflaren lodiera delarik.



Irudia V.21: Rosenthalen eredua: monopoloen eskema

Bero-transmisioaren ekuazioen soluzioetako bat V izanik eta (ξ, η, ζ) bero-iturriaren posizioa, monopoloen eredua horrela definitu zuten Rosenthalek:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = -\frac{v}{\alpha} \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad [134]$$

$$V = \frac{1}{4\pi k} \cdot \frac{e^{-\frac{v}{2\alpha}(R+x-\xi)}}{R} \quad [135]$$

$$R = \sqrt{(x - \xi)^2 + (y - \eta)^2 + (z - \zeta)^2} \quad [136]$$

$$T - T_0 = 2P \cdot \left[V(n=0) + \sum_{n=1}^{\infty} (V(r_n) + V(r'_n)) \right] \quad [137]$$

$$r_n = \sqrt{x^2 + y^2 + (z - n \cdot d)^2} \quad [138]$$

$$r'_n = \sqrt{x^2 + y^2 + (z + n \cdot d)^2} \quad [139]$$

Ostean, Nunesek dipoloen fase-aldaketa geometrikoki irudikatu zuten. Galda-bainuak aurrera egin ahala, aurrealdea urtzen joango da. Atzealdea, aitzitik, solidotzen. Gauzak horrela, bero-iturria aurkako poloen bidez adieraz daiteke. Poloen arteko distantzia $+(\Delta\xi)/2$ eta $-(\Delta\xi)/2$ da, bi poloen artean elkarren aurkako irudi multzoa sortuz. Era berean, egoera egonkorrean eragindako tenperatura-igoera definitzeko, materialaren bero-sorra kontuan hartu beharra dago.

$$\Delta T = \oint_{S'} \rho L v V(\xi, \eta, \zeta) d\eta d\zeta \quad [140]$$

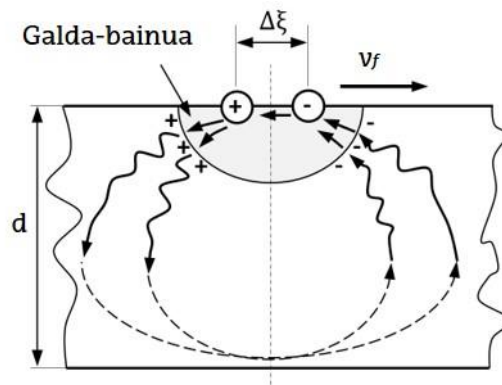
$$\Delta T \approx 2P \cdot \left[V \left(\frac{\Delta \xi}{2} \right) - V \left(-\frac{\Delta \xi}{2} \right) \right] \approx 2P \cdot \Delta \xi \cdot \left[\frac{V \cdot \left(\frac{\Delta \xi}{2} \right) - V \left(-\frac{\Delta \xi}{2} \right)}{\Delta \xi} \right] \quad [141]$$

$\Delta \xi$ zerora hurbiltzen denean:

$$\Delta T \approx Q'_\xi \cdot \left(\frac{\partial V}{\partial \xi} \right)_0 = Q'_\xi \cdot V_0 \cdot \left[\left(1 + \frac{x}{R} \right) \cdot \frac{v}{2\alpha} + \frac{x}{R^2} \right] \quad [142]$$

$$Q'_\xi = \lim_{\Delta \xi \rightarrow 0} 2P \cdot \Delta \xi \quad [143]$$

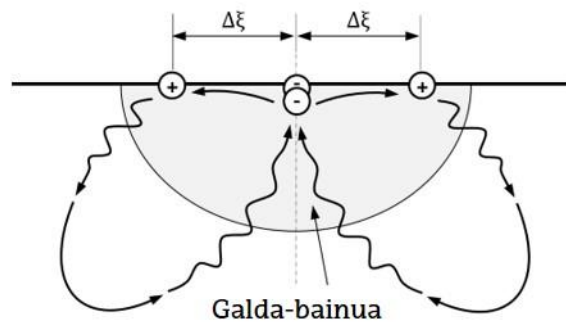
$$V_0 = \frac{1}{4\pi k} \cdot \frac{e^{-\frac{v}{2\alpha} \cdot (R+x)}}{R} \quad [144]$$



Irudia V.22: Rosenthalen eredua: dipoloen eskema

Monopoloen eta dipoloen eragina ereduan barneraturik, kuadripoloek sorturiko mugimendua aztertu zuen Nuneseke. Urtutako materialaren barne-zirkulazioa hainbat alderdiren menpe dago: sulfuro kontzentrazioak edota soldatze-prozesuan erabilitako parametroek eragin zuzena daukate barne-mugimendu hauetan eta, ondorioz, lorturiko soldadura-kordoiaren sakoneraren eta zabaleraren arteko erlazioan. [Mills, 1998].

Zirkulazio hauek gainazal-tentsioek sorturikoak dira hein handi baten, urtutako galda-bainuaren erdigunean, non beroa handiagoa den, tentsioa beste tokietan baino baxuagoa baita. Horrela, mugimendu hauen bidez, erdiguneko beroa soldaduraren alboetara edo hondora bideratzen da.



Irudia V.23: Rosenthalen eredua: kuadripoloen eskema

$$\Delta T = 2P \cdot \Delta \xi^2 \cdot \left\{ \frac{\left[\frac{V(\xi + \Delta \xi) - V(\xi)}{\Delta \xi} \right] - \left[\frac{V(\xi) - V(\xi - \Delta \xi)}{\Delta \xi} \right]}{\Delta \xi} \right\} \quad [145]$$

$$\Delta T \approx Q''_{\xi\xi} \cdot \left(\frac{\partial^2 V}{\partial \xi^2} \right)_0 \quad [146]$$

$$Q''_{\xi\xi} = \lim_{\Delta \xi \rightarrow 0} 2P \cdot (\Delta \xi)^2 \quad [147]$$

$$Q''_{\eta\eta} = \lim_{\Delta \eta \rightarrow 0} 2P \cdot (\Delta \eta)^2 \quad [148]$$

ξ eta η norabideetan ez bezala, ζ norabidean beroak ez du aurkako irudiaren beharrik higitzeko. Beraz, potentziaren eragina ez da bikoizten:

$$Q''_{\zeta\zeta} = \lim_{\Delta \zeta \rightarrow 0} P \cdot (\Delta \eta)^2 \quad [149]$$

$Q''_{\xi\xi}$, $Q''_{\eta\eta}$ eta $Q''_{\zeta\zeta}$ koefizienteen zeinuk eragin zuzena izango dute materialaren zirkulazio-norabideetan, urtutako jariakina soldaduraren zentrotik koroaren aldera higitu edo, aldiz, sakoneran zehar murgil daitekeelarik, kordoiaren errorantz mugituz. Adibidez, baldin eta $Q''_{\xi\xi}$ eta $Q''_{\eta\eta}$ positiboak badira, jariakina zentrotik x eta y norabideetan kanporantz mugituko da. Hortaz gain, $Q''_{\zeta\zeta}$ negatiboa bada, beroak koroarantz joko du. Honela, soldadura-kordoi zabal eta ez oso sakona lortuko luke ereduak. Aldiz, $Q''_{\xi\xi}$ eta $Q''_{\eta\eta}$ negatiboak badira eta $Q''_{\zeta\zeta}$ positiboa, kordoa estua eta sakona izango da. Beraz, koefiziente hauek eredututako materialaren arabera doitu beharko dira, zirkulazioa norabideak ezberdinak izan baitaitezke.

$$\Delta T = Q''_{\xi\xi} \cdot \left(\frac{\partial^2 V}{\partial \xi^2} \right)_0 + Q''_{\eta\eta} \cdot \left(\frac{\partial^2 V}{\partial \eta^2} \right)_0 + Q''_{\zeta\zeta} \cdot \left(\frac{\partial^2 V}{\partial \zeta^2} \right)_0 \quad [150]$$

$$\left(\frac{\partial^2 V}{\partial \xi^2} \right)_0 = V_0 \cdot \left[\left(1 + 2 \frac{x}{R} + \frac{x^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{v}{2\alpha} \right)^2 + \left(-1 + 2 \frac{x}{R} + 3 \frac{x^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{v}{2\alpha} \right) \cdot \left(\frac{1}{R} \right) + \left(-1 + 3 \frac{x^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{R} \right)^2 \right] \quad [151]$$

$$\left(\frac{\partial^2 V}{\partial \eta^2} \right)_0 = V_0 \cdot \left[\left(\frac{y^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{v}{2\alpha} \right)^2 + \left(-1 + 3 \frac{y^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{v}{2\alpha} \right) \cdot \left(\frac{1}{R} \right) + \left(-1 + 3 \frac{y^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{R} \right)^2 \right] \quad [152]$$

$$\left(\frac{\partial^2 V}{\partial \zeta^2} \right)_0 = V_0 \cdot \left[\left(\frac{z^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{v}{2\alpha} \right)^2 + \left(-1 + 3 \frac{z^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{v}{2\alpha} \right) \cdot \left(\frac{1}{R} \right) + \left(-1 + 3 \frac{z^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{R} \right)^2 \right] \quad [153]$$

P potentziako bero-iturri batek xafla bat erasotzen duenean, v aitzinapen-abiadurarekin higituz, hurrengo tenperatura-igoera sortuko du:

$$T = T_0 + P \cdot \left[G(n=0) + \sum_{n=1}^{\infty} (G(r_n) + G(r'_n)) \right] \quad [154]$$

$$\begin{aligned}
 G(R) = \frac{1}{2\pi k} \cdot \frac{e^{-\frac{v}{2\alpha}(R+x)}}{R} & \\
 \cdot \left\{ 1 + \left(\frac{Q'_{\xi}}{P} \right) \cdot \left[\left(1 + \frac{x}{R} \right) \cdot \frac{v}{2\alpha} + \frac{x}{R^2} \right] + \left(\frac{Q''_{\xi\xi}}{P} \right) \right. & \\
 \cdot \left[\left(1 + 2\frac{x}{R} + \frac{x^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{v}{2\alpha} \right)^2 + \left(-1 + 2\frac{x}{R} + 3\frac{x^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{v}{2\alpha} \right) \cdot \left(\frac{1}{R} \right) \right. & \\
 + \left. \left. \left(-1 + 3\frac{x^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{R} \right)^2 \right] + \left(\frac{Q''_{\eta\eta}}{P} \right) \right. & \quad [155] \\
 \cdot \left[\left(\frac{y^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{v}{2\alpha} \right)^2 + \left(-1 + 3\frac{y^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{v}{2\alpha} \right) \cdot \left(\frac{1}{R} \right) + \left(-1 + 3\frac{y^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{R} \right)^2 \right] & \\
 + \left(\frac{Q''_{\zeta\zeta}}{P} \right) & \\
 \cdot \left[\left(\frac{z^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{v}{2\alpha} \right)^2 + \left(-1 + 3\frac{z^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{v}{2\alpha} \right) \cdot \left(\frac{1}{R} \right) + \left(-1 + 3\frac{z^2}{R^2} \right) \cdot \left(\frac{1}{R} \right)^2 \right] & \left. \right\}
 \end{aligned}$$

Kalkuluak errazteko, eta batukariaren barneko balioak txikiagotzen doazela kontuan harturik, ereduaren prozesu errepikakor mugatua barneratu da, infinituraino kalkulatu beharrean prozesua sarearen puntu bakoitzarentzat 5 aldiz burutuz (hortik gorako eragina arbuigarria dela frogatu baita). Hortaz, puntuen arteko independentzia duen eredu sasi-zenbakizkoa sortu da, puntuek elkarri nola eragiten dioten ekuazioetan inplizituki barneratuta dagoelarik. Aplikaturiko potentziari, *wobble*-teknika barneratua izan dadin, azalera-faktorea eta denbora-faktorea aplikatu zaizkio, V.4.1 eta V.4.2 ataletan definituak izan direnak, hurrenez hurren.

Monopoloen, dipoloen eta kuadripoloen teoria garatutako ereduaren barneratu dira, urrutako materialaren barne mugimenduak aztertuak izan daitezela. Ereduaren bigarren zatia honetan, lehenengoan legez, ereduak aldaketak era arin baten sartzea ahalbidetzen du, eraginak eta agertoki ezberdinak behatu, ulertu eta sakontzeko asmoz.

Nunesez garaturiko ereduarekin alderatuz, lan honetan aurkezturiko Rosenthalen garapen matematikoaren aldaerak ez du giro-tenperatura aintzat hartzen. Horren ordez, Rosenthalen T_0 tenperatura gisa, Carslaw-Jaegerren oinarritik lorturiko egoera egonkorraren tenperatura-eremua aplikatuko da. Hau da, eredu bi zatitan banatu dela uler daiteke: alde batetik, Carslaw-Jaegerren teorian oinarriturikoa soldadura-kordoiaren zabalera eta tenperatura-igoera iragartzeko; bestetik, egoera egonkorra behin lorturik, Rosenthalen ereduaren aplikatu da materialaren mugimenduak sorturiko barne-mugimenduak simulatzeko.

VI. Kapitulua. Ereduaren balioztatzea

VI EREDUAREN BALIOZTATZEA

Garatutako eredia Inconel 718 aleaziozko xaflekin esperimentalki balioztatu egin da. Ereduaren aplikazio industrial zuzena biltzeko helburuarekin, hegazkinetako turbina aeronautikoetan erabilten diren LODIERA berdintsuko xaflekin balioztatu da. Laser bidezko soldadura erabiliz eta *wobble* teknika uztartuz, bai prozesuaren bideragarritasuna bai MATLAB bidez sortutako ereduaren egokitasuna aztertu dira. Era berean, eredian barneraturiko parametro batzuk, denbora-faktorea edota Rosenthalen eredian oinarrituriko dipolo eta kuadripoloen koefizienteak, adibidez, enpirikoki doitu eta inplementatu dira.

Sarrera-parametro ezberdinekin entseguak burutzeko, xaflen euste-sisteman babes-gasa hornitzeko tresna fabrikatu egin da, argoia soldadura-koroaren eta -erroaren guneetan hedatua izan dadin. Entseguetan foku-posizioaren eragina aztertu da, distantzia fokalaren araberako emaitzak analizatuz. Batu beharreko bi xaflen arteko distantzia edo *gapari* dagokionez, honek soldaduraren sakoneran izan lezakeen eragina behatu da. Horretarako, soldatze-parametro berdina erabiliz, lehenik bi xafla batuz eta ondoren pieza bakarrean sorturiko profilak alderatu dira. Bestalde, entseguetan pirometroarekin hartutako neurketak ereduak emandako tenperatura-eremuekin erkatu dira, *wobblea* erabiltzeak prozesuan lortutako tenperaturetan duen eragina zenbatesteko.

Potentzia, abiadura, *wobblearen* parametroak eta babes-gasaren balio ezberdinak erabiliz, lan-piezetan lorturiko soldaduren profil geometrikoak eta mikroegitura aztertu dira. Horretarako, behin xaflak baturik, piezak ebaki, probetak sortu, leundu eta kimikoki erasotu dira. Osteen, mikroskopioan neurketak egin dira, ereduak emandako emaitzekin alderatzeko asmoz.

VI.1. INCONEL 718[®]: PROPIETATEAK ETA PIEZEN NEURRIAK

Hegazkinetako gas-turbinetako atal askotan nikel oinarrituen aleazioak erabiltzen dira. Beraien artean, Inconel 718 materiala da nagusi, indar mekanikoen edota korrosioaren aurka eskaintzen dituen ezaugarri onak direla eta.

Al	B	C	Co	Cr	Cu	Fe	Mn	Mo	Ni
0,55	0,004	0,054	0,28	18,60	0,05	18,60	0,24	3,03	52,40
P	S	Si	Ti	Nb	Ta	Bi	Pb	Ag	
<0,005	<0,002	0,06	0,98	4,89	<0,05	<0,00003	<0,0005	<0,0002	

Taula VI.1: Erabilitako Inconel 718 aleazioaren konposizio kimikoa (pisuzko %) [Haynes, 2015]

Agerikoa denez, aleazio honen pisuaren erdia, gutxi gora behera, nikelak emandakoa da. Material hauen nahasketaren ondorioz, hegazkinetako motoreetako baldintzekin lan egiteko egokia den aleazioa lortzen da. Hala ere, soldatzearen ondorioz lortu nahi diren soldadura-kordioak eraikitzeke, prozesuan erabilitako sarrera-parametroen kontrolak eragin zuzena izango du amaierako itxura eta egituran.

Propietateei dagokionez, hainbat ikerketa daude temperaturaren arabeko dentsitatea, bero espezifikoa, eroankortasuna edota difusibitate termikoa zehazteko. Baina ikerketa gehienetan ez da 1800 K ingurutik gorako daturik ematen.

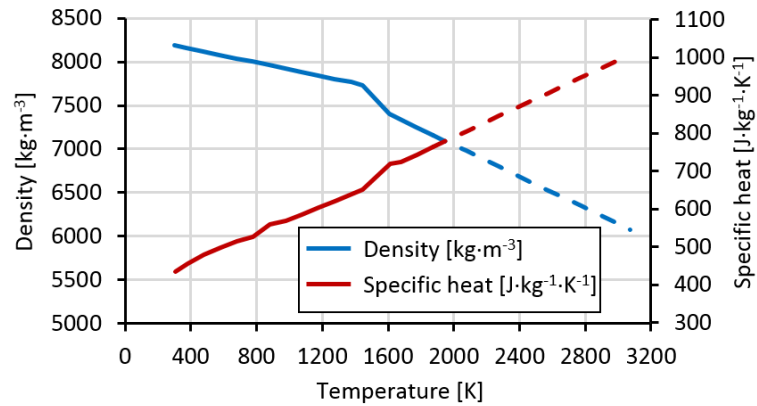
Temperatura [K]	Dentsitatea [kg·m ⁻³]	Bero espezifikoa [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Eroankortasun termikoa [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Difusibitate termikoa [m ² ·s ⁻¹]
298	8190	435	8,9	2,50
373	8160	455	10,8	2,91
473	8118	479	12,9	3,32
573	8079	497	15,2	3,79
673	8040	515	17,4	4,20
773	8001	527	18,7	4,43
873	7962	558	20,8	4,68
973	7925	568	21,9	4,87
1073	7884	585	23,9	5,18
1173	7845	603	25,8	5,45
1273	7806	620	26,7	5,52
1373	7767	640	28,3	5,69
1443	7727	650	29,3	5,83
1609	7400	720	29,6	6,07

Taula VI.2: Inconel 718 aleazioaren propietateak *liquidus*-tenperaturara arte [Mills, 2002]

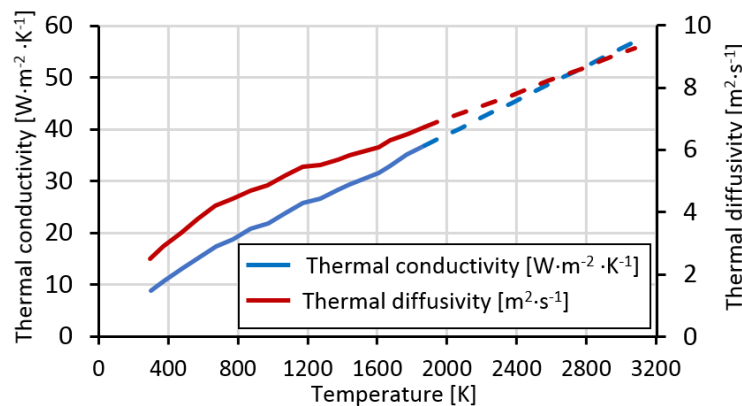
Beraz, ereduan temperatura horretatik gorako kalkuluak burutu ahal izateko, taula luzatu egin da. Nikelaren lurrunze-tenperatura aintzat harturik (≈ 3100 K), propietateak temperatura horretara arte linealki luzatu dira 1609 K-etik aurrera.

Temperatura [K]	Dentsitatea [kg·m ⁻³]	Bero espezifikoa [J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	Eroankortasun termikoa [W·m ⁻¹ ·K ⁻¹]	Difusibitate termikoa [m ² ·s ⁻¹]
1673	7340	723	33,5	6,31
1773	7250	743	35,1	6,52
1873	7160	764	36,8	6,73
1973	7070	784	38,5	6,95
2073	6980	804	40,1	7,15
2173	6890	825	41,8	7,35
2273	6800	845	43,5	7,57
2373	6710	865	45,1	7,77
2473	6620	886	46,8	7,98
2573	6530	906	48,5	8,20
2673	6440	926	50,2	8,42
2773	6350	947	51,8	8,61
2873	6260	967	53,5	8,84
2973	6170	987	55,2	9,06
3073	6080	1008	56,8	9,27

Taula VI.3: Inconel 718 aleazioaren propietateen luzapen hurbildua *liquidus*-tenperaturatik aurrera

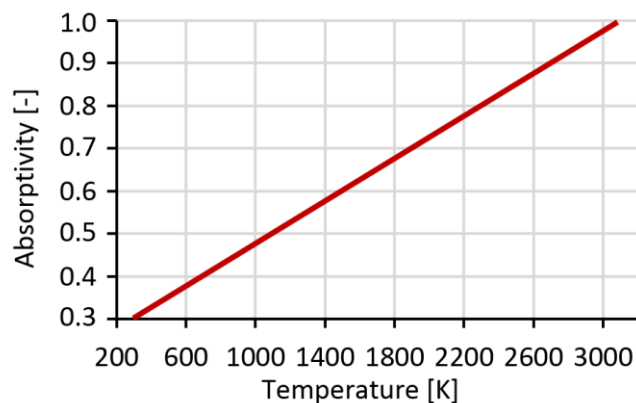


Irudia VI.1: Ereduan barneratutako dentsitatearen eta bero espezifikoaren diagrama tenperaturaren arabera (marra etena: luzatutako propietateak)



Irudia VI.2: Ereduan barneratutako eroankortasun eta difusibitate termikoaren diagrama tenperaturaren arabera (marra etena: luzatutako propietateak)

Era berean, absorbitzitatearen balioa giro-tenperaturan 0,3 dela jakinik eta *keyhole*ak gorputz beltza balitz bezala jokatzeko duela [Mazumder, 1983], absorbitzitatea ere linealki definitu da, nikelaren lurruntze-tenperaturara heltzean 1 izan arte.



Irudia VI.3: Ereduan barneratutako absorbitzitatearen diagrama tenperaturaren arabera Soldatu beharreko lan-piezen lodiera 2 mm-koa da. Horrela, entsegu hauetatik lortutako emaitzek industrian zuzeneko aplikazioa izatea bermatu da.

VI.2.MEKANIZAZIO-ZENTROA: KONDIA AKTINOS 500®

Entsegu guztiak Bilboko Ingeniaritza Eskolako Mekanika Saileko tailerlean burutu dira. Horretarako, Kondia Aktinos 500 mekanizazio-zentroa erabili da. Zentro honek hiru ardatz lineal ditu, beste bi gehi dakizkiokeelarik mahai birakari bat barneratuz gero.



Irudia VI.4: Kondia Aktinos 500 mekanizazio-zentroa

Mahaiaren distantzia zoruraino	850 mm
Lan-ibiltarteak	
Luzerakoa, x	600 mm
Zeharkakoa, y	400 mm
Bertikala, z	380 mm
Boladun torlojua	32 x 32 x 32 mm
Aitzinapena	
Azkarra x-y ardatzetan	24000 mm·min ⁻¹
Azkarra z ardatzean	20000 mm·min ⁻¹

Laneko	5000 mm·min ⁻¹
Motore nagusiaren potentzia	7,5 kW
Pisua	3100 kg
Zentroaren neurriak	
Oinplanoa	1940 x 1950 mm
Altuera	2240 mm
Doitasuna	
Posizionatzea	± 0,01 mm
Errepikagarritasuna	± 0,005 mm
Bereizmena	0,001 mm

Taula VI.4: Kondia Aktinos 500 mekanizazio-zentroaren espezifikazioak

Zentroaren zenbakizko kontrola Fagor 8070[®] da. Hala ere, lan honetako entseguetan eskanerra erabilienez, gehien bat fokoaren posizioa finkatzeko (z ardatza mugituz) eta pieza lan-eremuaren barnean kokatzeko erabili da.

VI.3.ERABILITAKO LASER-MAKINERIA: ROFIN FL 010[®]

Lan honetan burututako entseguak Rofin FL 010 laserrarekin egin dira. Laser hau Aktinos 500 zentroan lan egiteko egokituta dago. Hamabi diodo-moduluen bidez kitzikaturiko zuntzeko Yb:YAG laser industrial honek hurrengo ezaugarriak ditu:

Irteerako potentzia nominala	
(kolimatzailearen ostean)	100 - 1000 W (Egonkortasuna ± % 2)
BPP laser-sortaren parametroen produktua (kolimatzailearen ostean)	
Modo sinplea	< 0,4 mm·rad
Modoanitza (zuntzaren arabera)	50 μm ≤ 2,5 mm·rad
	100 μm ≤ 5 mm·rad
Uhin-luzera	1,08 μm (1080 nm ± 10 nm)
Giro-tenperatura	5 - 40 °C
Neurriak	

Zabalera	1160 mm
Sakonera	900 mm
Altuera	1700 mm
Pisua	550 kg
Kanpo-kontrolerako gailuak	
Seinale digitalak	24 V DC
Potentzia kontrola	0-10 V DC
Sistema eragilea	Microsoft Windows CE®
Diodo-moduluen bizitza erabilgarriaren ezaugarriak	
Itxurazko potentzia	5,7 kVA
Potentzia aktiboa	5,3 kVA
Korronte-kontsumoa	9 A
Hozte-sistema (ur bidez)	
Emaria	2000 l·h ⁻¹
Hozte-ahalmena	≥ 5 kW
Tenperatura	15 - 19 °C (± 2 °C)

Taula VI.5: Rofin FL 010 laserraren moduluaren espezifikazioak



Irudia VI.5: Rofin FL 010 laserraren modulua

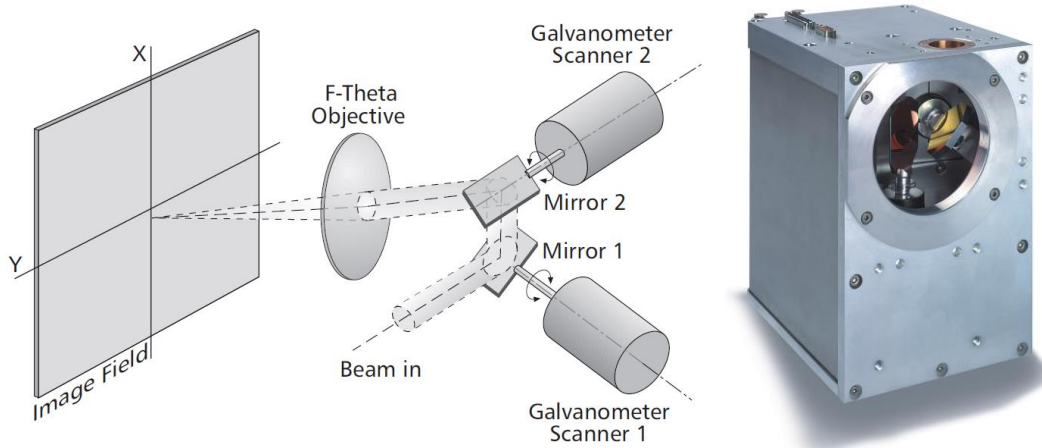
Laserrak igorritako potentzia definitzeko, Rofinen zenbakizko kontrola erabili da. Horren bidez, aplikaturiko potentziak era jarraian edo pultsatuan lan egitea defini daitezke *duty cycle*aren eta maiztasunaren bitartez.



Irudia VI.6: Rofin FL 010 laserraren parametroak zehazteko pantaila

VI.4.ESKANERRA: hurrySCAN25®

Laser-sorta azkar islatzeko eta geometria trokoidalak lortzeko, hurrySCAN 25 eskanerra erabili da, barnean bi ispilu dituelarik (a1 eta a2).



Irudia VI.7: hurrySCAN 25 eskanerra

Buruaren barneko laser-sortaren diametroa maximoa	25 mm
Doitasuna	$\pm 0,408$ rad
Baimendutako eskaneatze-angelu maximoa	$a1 = \pm 0,26$ rad $a2 = \pm 0,42$ rad
Potentzia horniketa	$\pm (15 \pm 1,5)$ V DC, 6 A polo bakoitzeko
Errorea	< 5 mrad

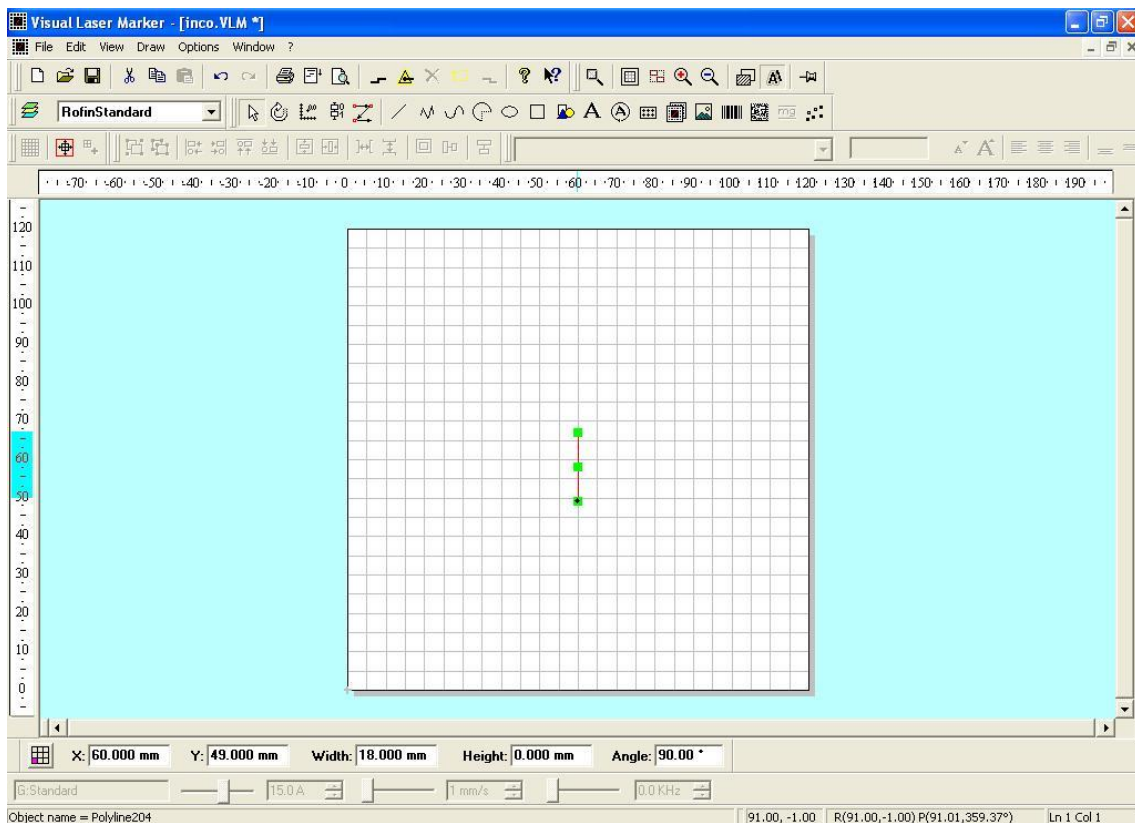
Konpentsazioa	< 5 mrad
Inklinazioa	< 1,5 mrad
Linealtasun eza	< 3,5 mrad
Errepikagarritasuna	< 22 μ rad
Lanaldi luzearen osteko tolerantzia (8 ordu)	< 0,6 mrad
Markatze errorea	< 0,50 ms
Posizionatze-abiadura	
Orokorra	30 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
Maximoa	40 $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$
Markatze-abiadura	0,8 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Hozte-sistema	
Aire-emia	20 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$
Ur-emia	20 $\text{l}\cdot\text{min}^{-1}$
Ispiluak	
Estalketa-geruza	Errendimendu altuko dielektrikoa
Laneko uhin-luzera	1064 nm
Islatze-maila	
1064 nm	> % 99,5 ispiluko
630 – 670 nm	> % 70 ispiluko
Onarturiko batez besteko potentzia maximoa	750 W
(Deskribaturiko hozte-sistemeekin)	(1500 W)
Onarturiko potentzia-dentsitate maximoa uhin jarraiarekin	
(Deskribaturiko hozte-sistemeekin)	500 $\text{W}\cdot\text{cm}^2$
Kalte-atalasea laser pultsatuarekin	(1000 $\text{W}\cdot\text{cm}^2$)
	5 $\text{J}\cdot\text{cm}^2$

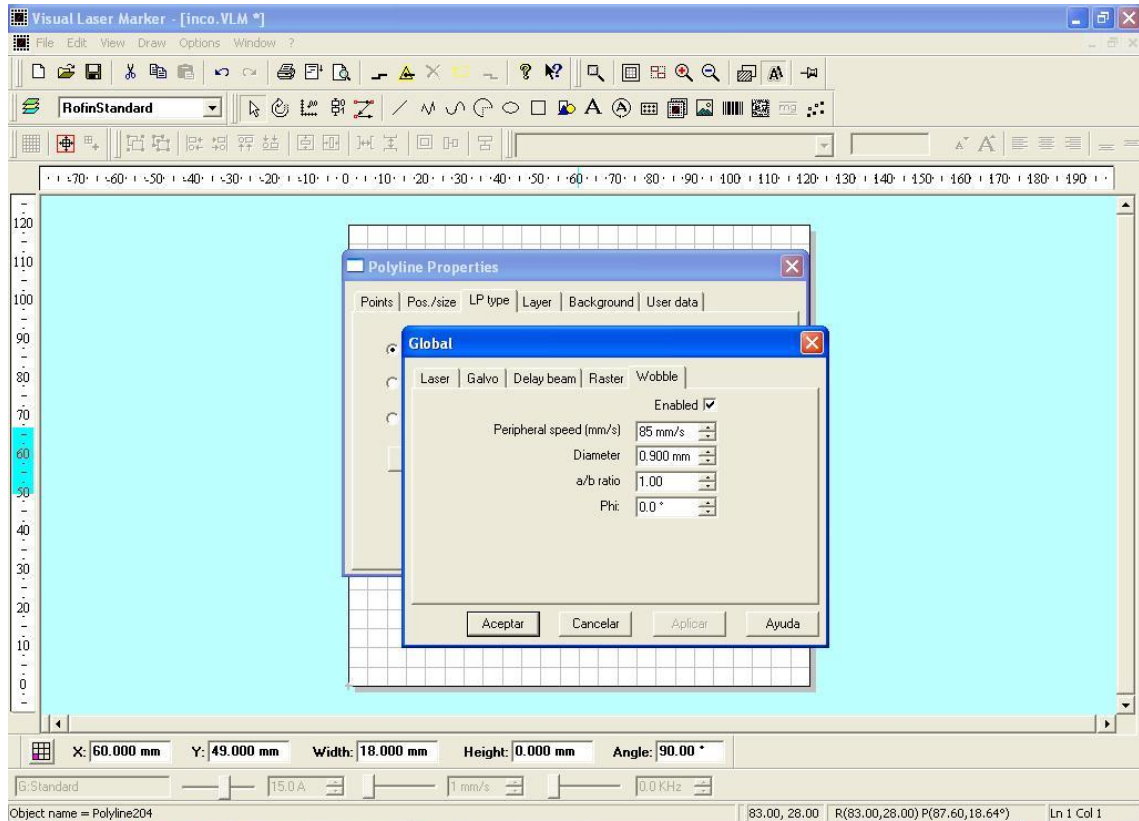
Taula VI.6: hurrySCAN 25 eskanerraren espezifikazioak

VI.5.ESKANERRAREN ZENBAKIZKO KONTROLA: VLM[®]

Rofin motako laserrek CAD softwarea barneratzeko aukera eskaintzen dute. Laserrak igorritako izpia eskanerrera bideratu eta honek irudi eta ibilbide zehatzak egin ditzan, VLM programa erabili da. Programa honi esker (*Visual Laser Marker*), higidura trokoidalaren parametroak defini daitezke: luzerako aitzinapen-abiadura x ardatzean, abiadura periferikoa eta sortutako elipsoideen neurriak. Era berean, geometria ezberdinak sortzeko aukera eskaintzen du, lerro sinpleez gain (soldadura-kordioen ibilbidea) irudi konplexuagoak deskribatzea ahalbidetuz eta ekorketa-estrategia ezberdinak definituz.

Software programa honen bitartez, eskanerrak aginduak jasoko ditu barneko ispiluak mugitzeko eta programaturiko ezaugarriak betetzeko (abiadura, *wobble* neurriak, irudia, estrategia...)

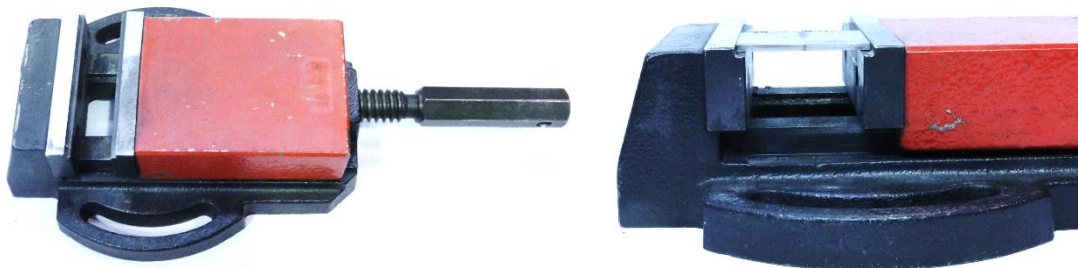




Irudia VI.8: VLM zenbakizko kontrola

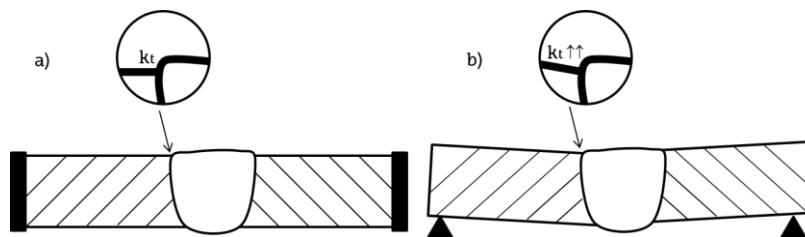
VI.6.XAFLEN EUSTE-SISTEMA: BARAILA

Piezak laser bidez batzeko, barailaren bidez eutsi dira. Xafla handiago batetik abiatuz, xafla txikiak binaka prestatu dira, eta soldatu beharreko bi aldeen arteko espazioa (*gapa*) ahalik eta txikiena izan dadin, kontaktuan dauden gainazaletan agerturiko bizarrak leundu egin dira.



Irudia VI.9: Piezak eusteko baraila

Barailari esker, tentsio-kontzentrazioen faktorearen agerpena saihestea ahalbidetzen da. Piezak beroarekin erasotzean, dilatazio eta uzkuertze termikoek lerrotatze eza moduko distortsioak eragin ditzakete. Ondorioz, akats horiek soldaduraren ertzetan agertutako tentsio-kontzentrazio faktore estatikoa (k_t) handi dezakete. Hori dela eta, piezek tentsio handiagoeekin lan egin beharko lukete. Faktore hau gune zehatz bateko tentsio maximoa (σ_{max}) eta nominalaren (σ_{nom}) arteko ratioa bezala definitzen da. Hau da, $k_t = \sigma_{max} / \sigma_{nom}$. Entsegu-piezak barailaren bidez eutsiz gero, koroan eta erroan ager daitezkeen bat-bateko tentsio igoerak saihesten dira.



Irudia VI.10: Tentsio-kontzentrazio faktore estatikoa: a) Barailarekin; b) Baraila barik

VI.7.HOZTE-MAKINERIA: KKT KRAUS OLB 5[®]

Laserraren makinaren kanpoaldean KKT Kraus OLB 5 hozte-dorrea dago kokaturik, ingurune-aktiboaren ponpaketan sorturiko beroa kontrolatua izan dadin.

Kontsumituriko potentzia	3,2 kW
Hozgarria	R134a
Edukiera	60 l

Taula VI.7: KKT Kraus OLB 5 hozte-makinariaren espezifikazioak



Irudia VI.11: KKT Kraus OLB 5 hozte-makinaria

Fibrzko laserra eskanerrarekin batera erabiltzean, bigarren honek eskaintzen dituen mugimendu azkarren eta posizionatze kontrolatuen abantailak aprobetxatu dira eta horrek *wooble* teknika aplikatzea ahalbidetu du.

Entsegu guztiak 100 µm-ko zuntzarekin egin dira, higidura trokoidala zehazteko beste parametro batzuk erabili direlarik (aitzinapen-abiadura, abiadura periferikoa, deskribaturiko elipseen ardatzen neurriak, kordioaren luzera).

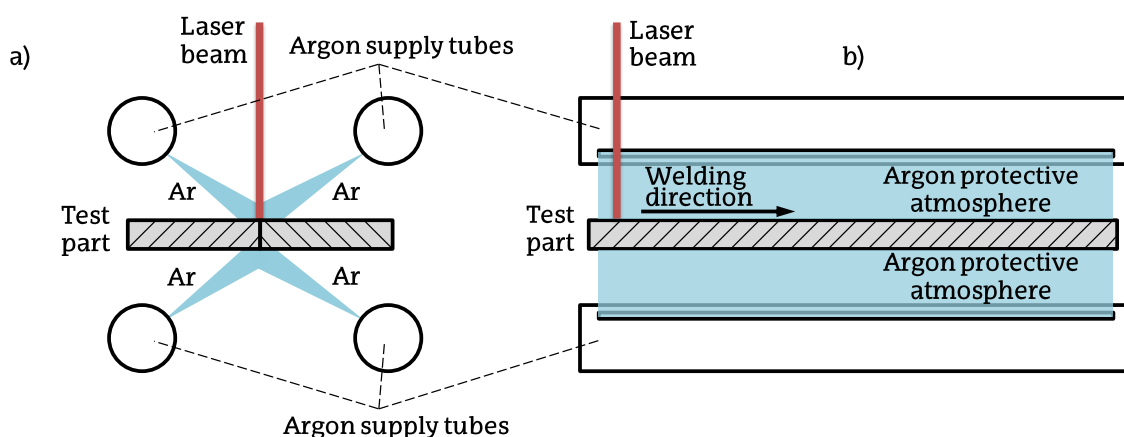
VI.8.BABES-GASAREN HORNITZE-SISTEMA

Piezen herdoiltzea saihesteko eta atmosfera geldoa sortzeko asmoz, espreski entsegu hauek gauzatzeko tresna eraiki da, soldadura-kordioaren gune guztian zehar egoki hedatua izan dadin. Bai koroaren gunea bai erroarena argoiarekin babestu dira, xaflen luzeran zehar lau hodi zulatuen bidez. Bi hodi xaflen gainetik kokatuz eta beste biak azpitik, kordioa apuntatuz, guztizko babesa lortu da argoiaren bidez.

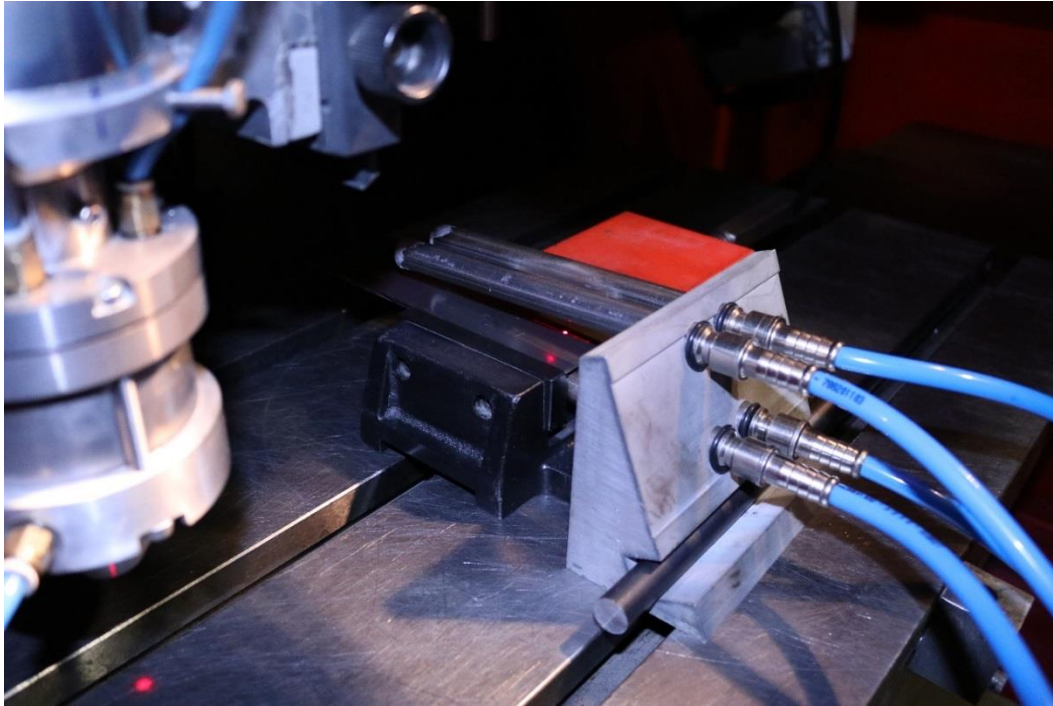
Gasaren konposizioari dagokionez, erabilitako argoia Ar2X motakoa da.

Purutasuna	% 99,998
Ezpurutasunak	
H ₂ O	< 4 ppm
O ₂	< 3 ppm
N ₂	< 15 ppm
HC	< 1 ppm

Taula VI.8: Ar2x babesgasaren espezifikazioak



Irudia VI.12: Babes-gasaren hornitze-sistemaren eskema



Irudia VI.13: Babes-gasaren hornitze-sistema

VI.9.PROBETEN PRESTAKETA

VI.9.1. SOLDADURA-KORDOIEN EBAKETA: REMET TR 100 EVOLUTION®

Behin piezak soldaturik, azterketa burutzeko kordioak zeharka ebaki dira. Horretarako, Remet TR100 Evolution zerra metalografikoa erabili da.

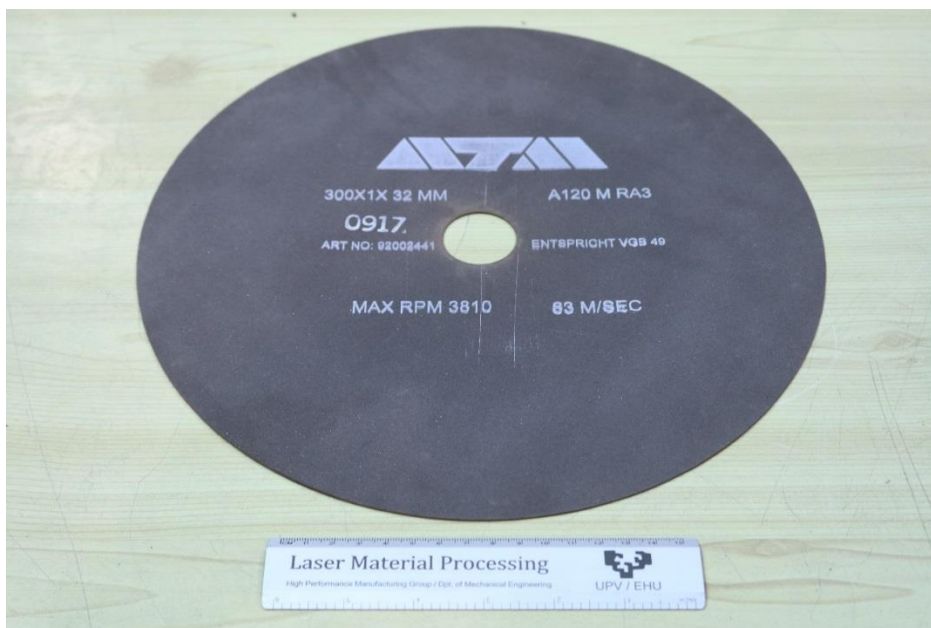


Irudia VI.14: Remet TR100 Evolution zerra metalografikoa

Mozketa-diametro maximoa	100 mm
Diskoaren diametroa	300 mm
Ardatza eta zoruaren arteko distantzia	240 mm
Motorearen potentzia	2,2 kW
Edukiera	20 l
Tentsioa	380 V
Pisua	100 kg
Neurriak	
Luzera	625 mm
Altuera	730 mm
Sakonera	570 mm

Taula VI.9: Remet TR100 Evolution zerra metalografikoaren espezifikazioak

Bertan, superaleazioak mozteko ATM® markako disko zirkular bereziak erabili dira, kasu honetan korindoizko oinarriak.



Irudia VI.15: ATM mozketa-disko zirkularra

Diametroa	305 mm
Lodiera	1 mm
Oinarria	Errubia

Taula VI.10: ATM mozketa-disko zirkularren espezifikazioak

VI.9.2. KAPSULATZEA: REMET IPA 40 EVOLUTION®

Soldadura-kordioen zeharkako sekzioak lortuta, analisirako probetak sortu dira. Horretarako, xafletatik lortutako zatiak kapsulatu egin dira, piezak ATM® markako erretxina fenoliko hautsekin inguratuz.

Urtze-tenperatura	150 – 170 °C
Urtze-egoeran mantendu beharreko denbora	6 – 8 min
Hozte-tenperatura minimoa	60 °C

Taula VI.11: ATM erretxina fenolikoaren espezifikazioak



Irudia VI.16: Remet IPA 40 Evolution kapsulatze-zentroa

Kapsulatze-diametroa	40 mm
Kapsulatze-tenperatura maximoa	200 °C
Kapsulatze-denbora maximoa	99 min
Potentzia	0,65 kW
Tentsioa	220 V
Pisua	25 kg
Neurriak	
Luzera	220 mm
Zabalera	480 mm
Altuera	680 mm

Taula VI.12: Remet IPA 40 Evolution kapsulatze-zentroaren espezifikazioak

VI.9.3. PROBETEN LEUNTZEA: REMET LS1®

Piezen mikroegitura eta soldaduren profila analizatu ahal izateko, moztutako eta kapsulaturiko probetei leunketa prozesua aplikatu zaie. Horretarako, maila ezberdinetako diskoen aurka marruskatzen dira. Lan honetan erabilitako diskoak Akasel® markako diamantezko lixa metalikoak izan dira. Era berean, behin tamaina batera heldurik, diamantezko espraiarekin lainoztaturiko oihal bereziak erabili dira.

Diskoen ale tamaina	201; 68; 30,2; 18,3 μm
Oihaletan lainoztaturiko ale-tamaina	9, 3 eta 1 μm

Taula VI.13: Akasel leuntze-diskoen espezifikazioak



Irudia VI.17: Remet LS1 leuntze-zentroa

Diskoaren diametroa	200 mm
Biraketa-abiadura	300 rpm
Potentzia	250 W
Tentsioa	220 V
Pisua	31 kg
Neurriak	
Luzera	370 mm
Altuera	500 mm
Zabalera	300 mm

Taula VI.14: Remet LS1 leuntze-zentroaren espezifikazioak

VI.9.4. ERASO KIMIKOA: MARBLE

Behin leunketa prozesua gauzaturik, soldadura-kordoen mikroegitura eta profila beha daiteke. Hala ere, ezaugarri hauek errebelatzeko, beharrezkoa da eraso kimikoa burutzea. Lan honetan, helburu hori lortzeko, Marble erreaktibo kimikoa erabili da. Probetak 10 segundo likidoarekin kontaktuan mantenduz, soldadura-gunea gainontzeko oinarriarengandik bereizten da, analisi eta neurketa mikroskopikoa ahalbidetuz.

CuSO ₄	4 g
HCl	20 ml
H ₂ O	20 ml

Taula VI.15: Marble soluzioaren espezifikazioak

VI.10. PROBETEN NEURKETA

VI.10.1. PROFIL GEOMETRIKOA: LEICA Z6 APO® eta LEICA DFC 295®

Soldadura-kordoen profil geometrikoa aztertzeko, Leica Z6 APO mikroskopia erabili da. Bertan, Leica DFC 295 kolorezko kamera mikroskopiko digitala barneratu da, bereizmen handiko argazkiak ateratzeko.



Irudia VI.18: Leica Z6 APO mikroskopia eta Leica DFC 295 kamera digitala

Leica Z6 APO	
Handipena	6,3:1 (motorizatua)
Handipen-faktorea	0,57x, 0,8x, 1x, 1,25x 1,6x, 2x, 2,5x, 3,2x 3,6x
Pisua	2,170 kg
Lan-distantzia	112 mm
Leica DFC 295	
Pixel kopurua	3 megapixel, 2048 × 1536
Pixel tamaina	3,2 μm × 3,2 μm
Esposizio-denbora	0,1 ms – 2 s

Taula VI.16: Leica Z6 APO mikroskopioren eta Leica DFC 295 kamera digitalaren espezifikazioak

VI.10.2.MIKROEGITURA: Nikon OPTIPHOT 100[®] eta Infinity 1[®]; Leica DCM3D[®]

Mikroegitura aztertzeko, lehenik eta behin Nikon OPTIPHOT 100 mikroskopia eta Infinity 1 kamera erabili dira. Hauei esker, oinarri-materiala, beroak erasotutako gunea eta soldaduraren arteko gunek desberdindu dira. Gainera, soldadura-kordoiaren ertzetatik, oinarri materialarekin kontaktuan dauden guneeetatik, dendritak nola hazten diren dokumentatu da.

Nikon OPTIPHOT 100	
Handipen-faktorea	10x, 20x, 50x, 100x
Argiztapena	Halogenoa, 12 V, 50 W
Infinity 1	
Pixel kopurua	3,1 megapixel, 2048 × 1536
Pixel tamaina	3,2 μm × 3,2 μm
Esposizio-denbora	128 μs – 4 s

Taula VI.17: Nikon OPTIHOT 100 mikroskopioren espezifikazioak



Irudia VI.19: Nikon OPTIHOT 100 mikroskopia

Horrez gain, dendriten arteko distantzia neurtzeko Leica DCM3D mikroskopia optikoa erabili da.

Leica DCM3D

Handipen-faktorea	5x, 20x, 50x, 100x
Piezen islatze-faktorea	% 0,05 – 100
Eskaneatze bertikalaren tartea	40 mm
Neurriak	
Luzera	573 mm
Sakonera	390 mm
Altuera	569 mm
Pisua	48 kg

Taula VI.18: Leica DCM3D mikroskopiaoren espezifikazioak

VI.11. TEMPERATURAREN NEURKETA: IGAR 12-LO[®]

Lan honetan *wobble* teknika bidez egindako soldaduren temperaturaren eboluzioa neurtzeko, Igar 12-LO pirometroa erabili da. Horri esker, kordoia eratzean gertaturiko temperatura-aldaketak aztertzeaz gain, barne-egiturarekin erlazionatzeko baliogarria da, dendriten itxura hozte-gradientearekin zuzenean erlazionaturik baitago.



Irudia VI.20: IGARr 12-LO pirometroa

Tenperatura-tartea	550-2500 °C
Uhin-luzerak	1,28 eta 1,65 μ m
Zehaztasuna	
<1500 °C	% 0,5 °C irakurtzean + 1 °C
>1500 °C	% 0,7 °C irakurtzean + 1 °C
Errepikakortasuna	% 0,3 °C irakurtzean + 1 °C
Emisibitate (ε)	0,1-1 (0,001-eko urratsak)
Pisua	2,6 kg

Taula VI.19: IGARr 12-LO pirometroaren espezifikazioak

VII. Kapitulua. Emaitzak eta ereduaren balioztatzea

VII EMAITZAK ETA EREDUAREN BALIOZTATZEA

Garatutako eredia balioztatzeko, Inconel 718 aleaziotako xaflen soldadurak burutu eta sarrera-parametro berdineko simulazioekin alderatu dira.

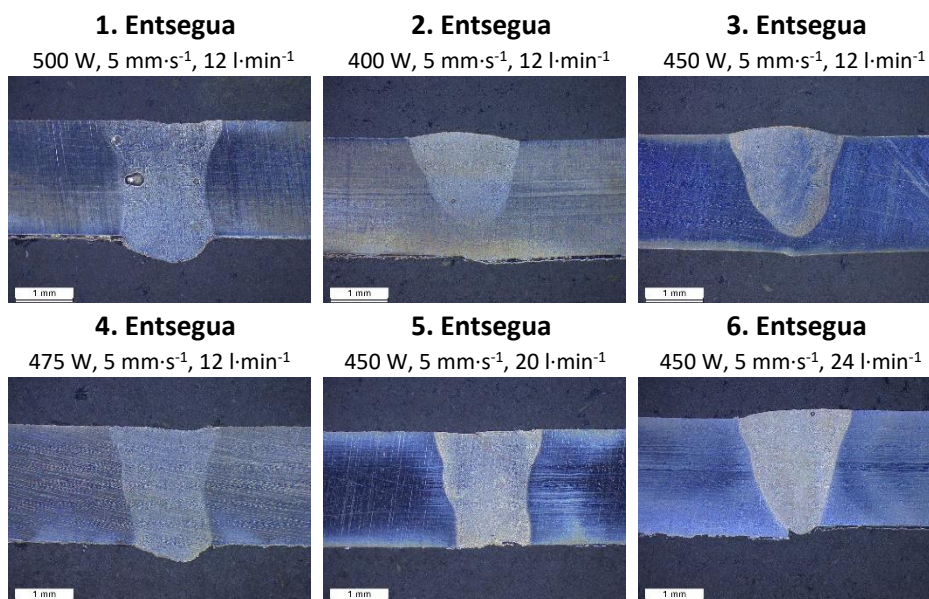
Entseguak sarrera-parametro ezberdinekin egin dira, betiere 2 mm lodierako soldaduren kalitatea bermatuko lukeen parametroen konbinaketa bilatuz. Hau da, potentzia (P), aitzinapen-abiadura (v_f), foku-posizioa (f_{pp}), babes-gasaren fluxua (Ar_f) edota *wobble*aren diametroa (d_w) uztartuz, nikel oinarridun xaflen soldadurak aztertu eta sailkatu dira. *Spot*aren diametroa (d_s) finko mantendu da entsegu guztietan, 100 μm -koa izanik eta piezen gainazalean kokatuz. Horrela, ibilbide trokoidala gauzatzean d_w eta d_s parametroen batura kontuan hartu da, guztizko D diametroa lortuz.

Entsegua	P [W]	v_f [mm·s ⁻¹]	v_p [mm·s ⁻¹]	Ar_f [l·min ⁻¹]	d_w [mm]
1	500	5	141,4	12	0,9
2	400	5	141,4	12	0,9
3	450	5	141,4	12	0,9
4	475	5	141,4	12	0,9
5	450	5	141,4	20	0,9
6	450	5	141,4	24	0,9
7	300	3	84,8	12	0,9
8	300	3	84,8	24	0,9
9	325	3	84,8	24	0,9
10	350	3	84,8	24	0,9
11	375	3	84,8	24	0,9
12	300	3	84,8	24	0,9
13	450	3	84,8	12	0,9
14	450	3	84,8	24	0,9
15	450	5	141,4	12	0,9
16	450	5	141,4	24	0,9
17A	450	3	84,8	24	0,9
17B	450	5	141,4	24	0,9
18	450	3	84,8	24	0,9
19	350	3	84,8	24	0,9
20	350	5	141,4	24	0,9
21	400	3	84,8	24	0,9
22	400	5	141,4	24	0,9
23	500	3	84,8	24	0,9
24	500	5	141,4	24	0,9
25	350	3	84,8	24	0,9
26	350	5	141,4	24	0,9
27	400	3	84,8	24	0,9
28	400	5	141,4	24	0,9
29	500	3	84,8	24	0,9
30	500	5	141,4	24	0,9
31	450	3	84,8	24	0,9

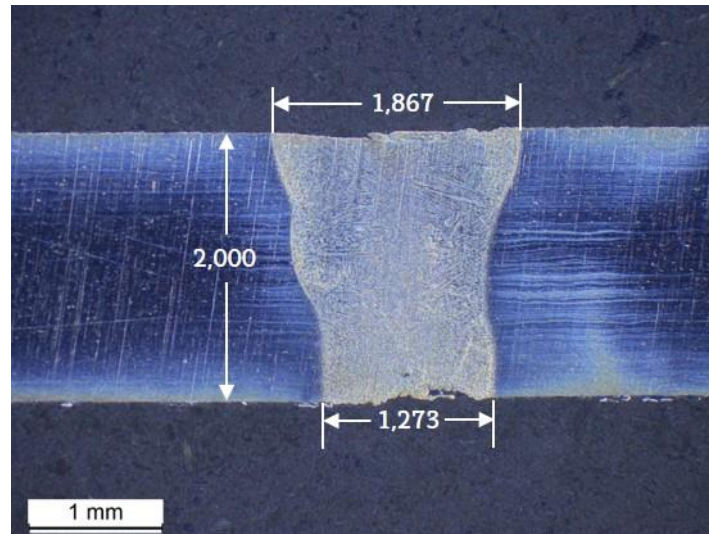
32	450	5	141,4	24	0,9
33	350	3	84,8	24	0,9
34	350	3	179,1	24	1,9
35	400	3	179,1	24	1,9
36	450	3	179,1	24	1,9
37	500	3	179,1	24	1,9
38	500	7	197,9	24	0,9
39	550	7	197,9	24	0,9
40	600	7	197,9	24	0,9
41	450	7	197,9	24	0,9
42	350	5	197,9	24	0,9
43	400	3	84,8	24	0,9
44	400	5	141,4	24	0,9
45	450	3	84,8	24	0,9
46	450	5	141,4	24	0,9
47	500	3	84,8	24	0,9
48	500	5	141,4	24	0,9
49	350	5	298,5	24	1,9
50	400	5	298,5	24	1,9
51	450	5	298,5	24	1,9
52	500	5	298,5	24	1,9

Taula VII.1: Burututako entseguak eta erabilitako parametroak

Lortutako emaitzen analisiaren azterketa sakonarekin zuzenean hasi beharrean, lehenbizi egindako saiakuntzen ikuspegi orokorra aurkeztuko da. Entsegu-prozesu gehienetan gertatzen den moduan, hasierako saiakerak parametroen tarte egokiak bilatzeko eta materialaren portaeraren ulertzean sakontzeko baliagarriak dira. Gauzak horrela, lehenengo sei entseguak (1-6) sarrera-parametroak doitzeko erabili dira.

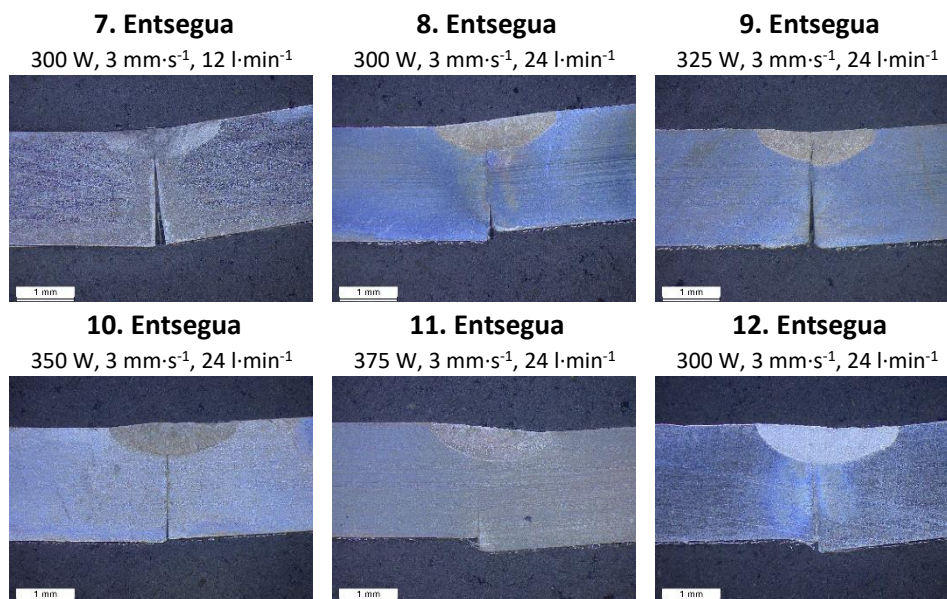


Taula VII.2: 1 -6 entseguen zeharkako sekzioak. Bakoitzaren aldamenean saiakuntzaren baldintzak zehazten dira, potentzia, aitzinapen-abiadura eta argoi-emaria

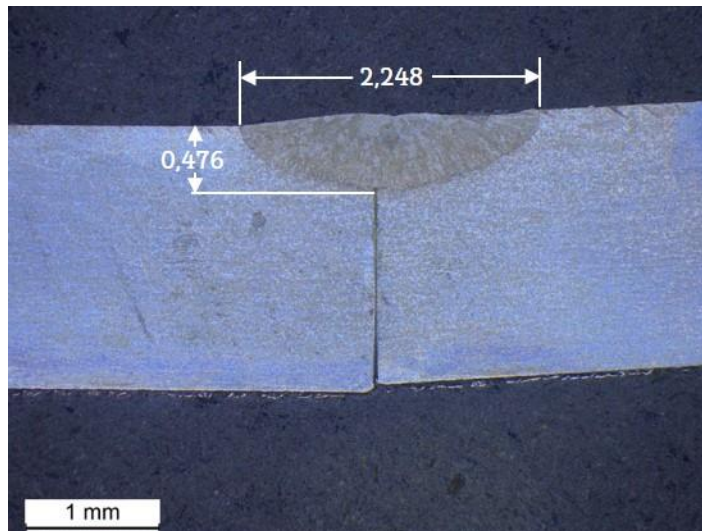


Irudia VII.1: 5. probeta

Behin 2 mm lodierako xaflak alderik aldeko kordioen bidez soldatzeko potentzia zenbatetsirik ($5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ aitzinapen-abiadurarentzat, 450 W inguru), hainbat parametro aldatu dira, beraien eragina prozesuaren gain aztertzeko. Bai abiadura, bai potentzia jaitsi dira hurrengo sei saiakuntzetan (7-12), aldi berean foku-posizioa piezaren gainazalaren gainetik jarriz (5 mm). Nahiz eta aitzinapen-abiadura jaisteak kordoiaren tamaina handitzea ahalbidetu, 400 W baino txikiagoko potentzia erabiltzean, urrutiko fokuratzearekin batera, sakonera urriko kordoiak eratzen direla frogatu da. Hortaz, fokua piezaren gainetik emaitzetan eragin zuzena duela ondorioztatu da. Saiakuntza hauetan lortutako soldadurak bisualki behatzean ez-erabilgarriak direla baieztatu arren, probeta hauei zeharkako indarrak aplikatu zaizkie, makurdurarekiko izan dezaketen erresistentzia probatzeko. Denek erakutsi dute erresistentzia eskasa, kordoa xaflen erdira ez baita heldu.



Taula VII.3: 7-12 entseguen zeharkako sekzioak

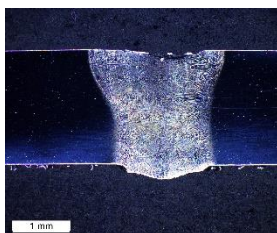


Irudia VII.2: 10. probeta

Hurrengo lau entseguetan (13-16), aplikaturiko potentzia eta aitzinapen-abiadurak 450 W eta 3 eta 5 mm·s⁻¹ izan dira, hurrenez hurren, babes-gasaren eragina aztertu eta fluxu egokiena zehazteko. Erabilitako emariak 12 eta 24 l·min⁻¹ izan dira eta probeten azterketa Oatalean azaltzen da.

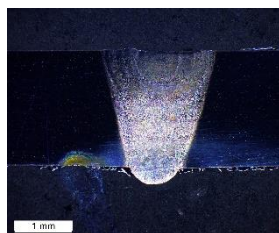
13. Entsegua

450 W, 3 mm·s⁻¹, 12 l·min⁻¹



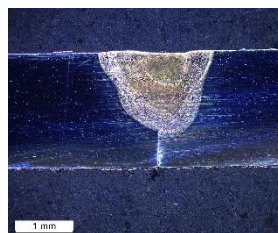
14. Entsegua

450 W, 3 mm·s⁻¹, 24 l·min⁻¹



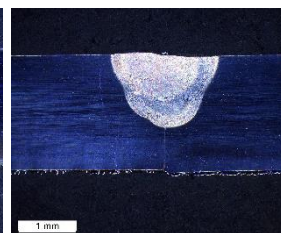
15. Entsegua

450 W, 5 mm·s⁻¹, 12 l·min⁻¹



16. Entsegua

450 W, 5 mm·s⁻¹, 24 l·min⁻¹

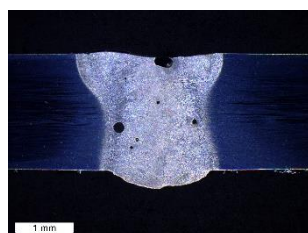


Taula VII.4: 13-16 entseguen zeharkako sekzioak

Piezen arteko deritzon *gap* tartearen efektua aztertzeko, bi entsegu burutu dira xafla soilarekin (17A, 17B), hau da, inolako etenik ez duen piezaren gainazalean beroa zuzenean ezarriz eta beste pieza edo atal batekin lotu barik. Kasu bi hauetan erabilitako sarrera-parametro berdinak soldadura kasuentzat aplikatuz (31, 32), xafla bakarreko eta bi xafako kasuak erkatu dira.

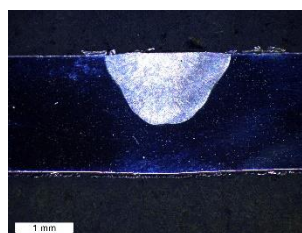
17A. Entsegua

450 W, 3 mm·s⁻¹, 24 l·min⁻¹



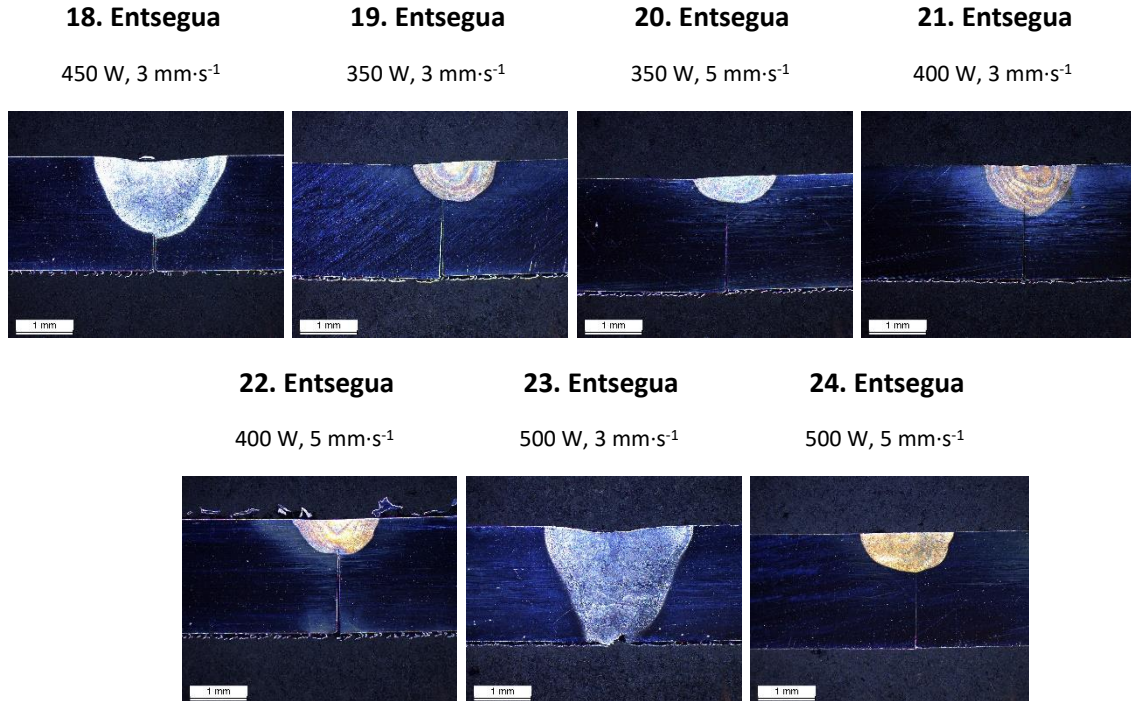
17B. Entsegua

450 W, 5 mm·s⁻¹, 24 l·min⁻¹

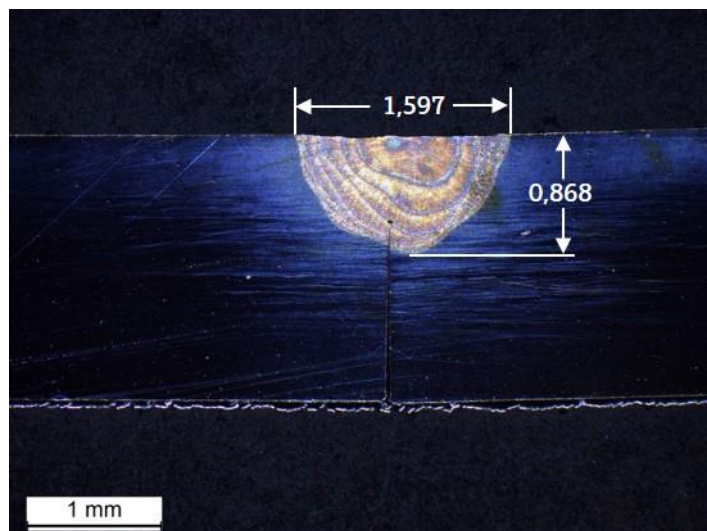


Taula VII.5: 17A eta 17B entseguen zeharkako sekzioak

Foku-posizioa 5 mm-tik 2 mm-ra hurbilduz, beste zazpi saiakuntza gauzatu dira (18-24). Entsegu hauetan eta hemendik aurrerakoetan babes-gasaren emaria $24 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ izan da. Emaitzetan ikus daitekeenez, fokua gainazalera hurbiltzen doan heinean, kordoiak sakonera handiagoa izateko joera dute, materialaren gainazalera heltzen den laser-izpiaren potentzia-dentsitatea handiagoa baita. Era berean, *wobble* mugimenduak sorturiko lerroak definituago agertzen dira soldadura-gunean.

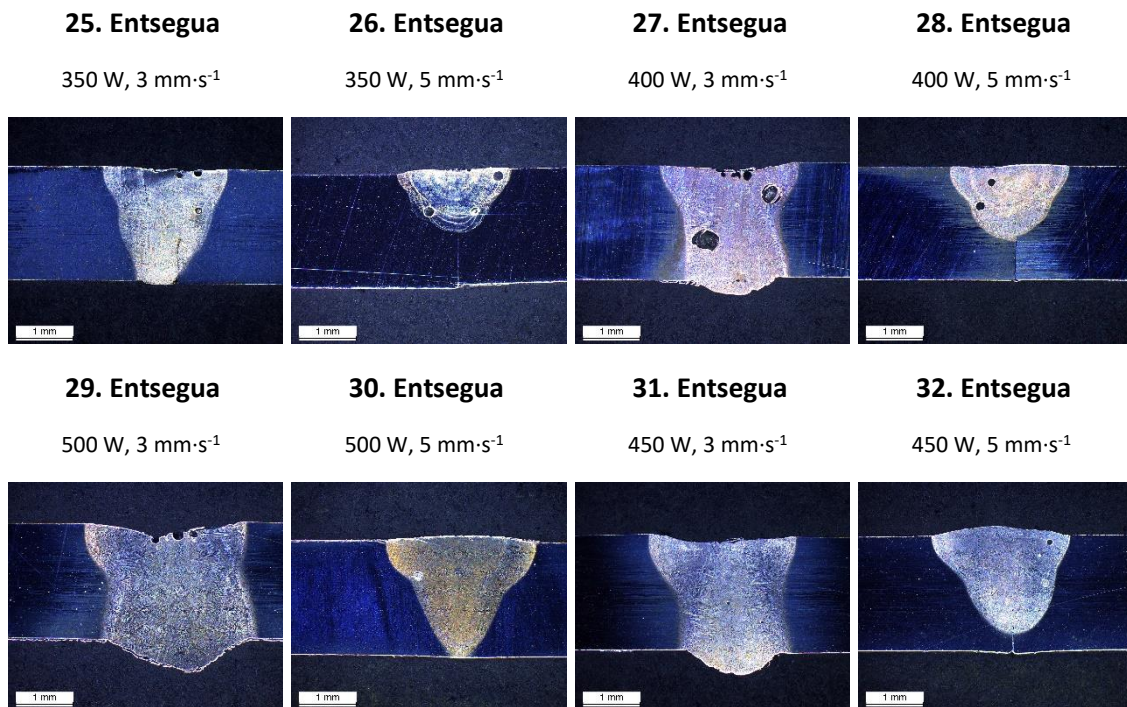


Taula VII.6: 18-24 entseguen zeharkako sekzioak

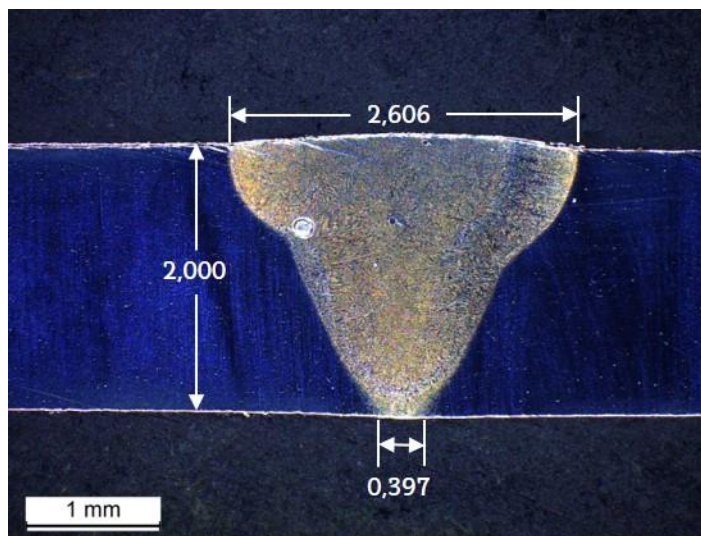


Irudia VII.3: 21. probeta

Hurrengo zortzi saiakuntzetan (25-32), foku-posizioa piezen gainazaletik are hurbilago kokatzea erabaki da, 0,5 mm-ra hain zuzen. Lortutako emaitzak onargarriak dira, *wobble*aren guztizko diametroa 1 mm, potentzia tartea 350-500 W eta aitzinapen-abiadurak 3 eta $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ izanik.

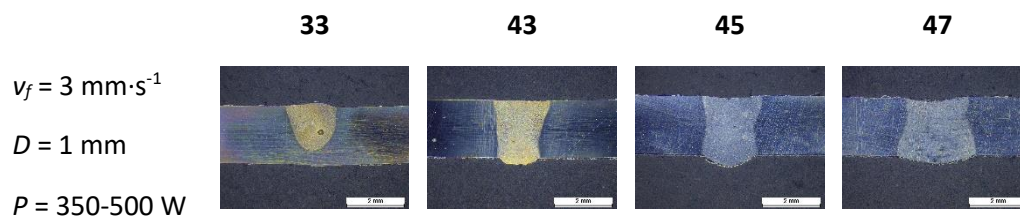


Taula VII.7: 25-32 entseguen zeharkako sekzioak

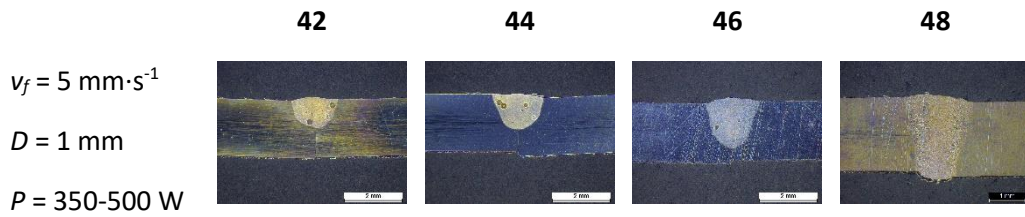


Irudia VII.4: 30. probeta

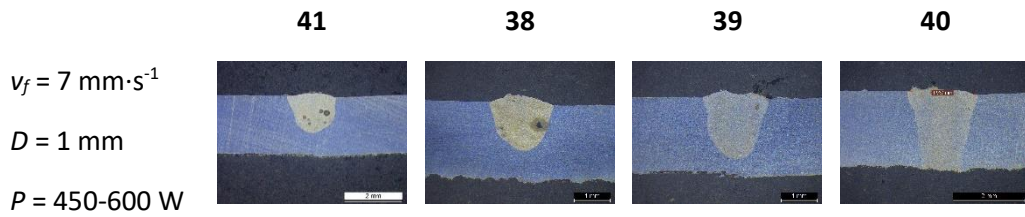
Saiakuntza guzti hauen ostean, fokua gainazalean jarri da gainontzeko entsegu guztietan (33-52), lortutako emaitzak eta neurketak ereduarekin alderatuz. Hurrengo irudietan, lortutako emaitzak ikus daitezke. Azpimarratu beharra dago argazkiak ez daudela zenbaki korrelatibo bidez ordenaturik, baizik eta potentzia gorakorren arabera.



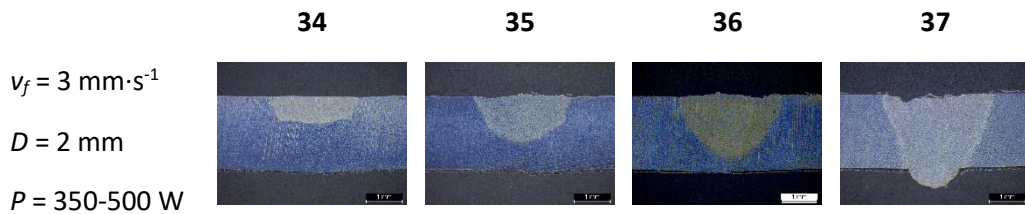
Taula VII.8: 33, 43, 45 eta 47 entseguen zeharkako sekzioak



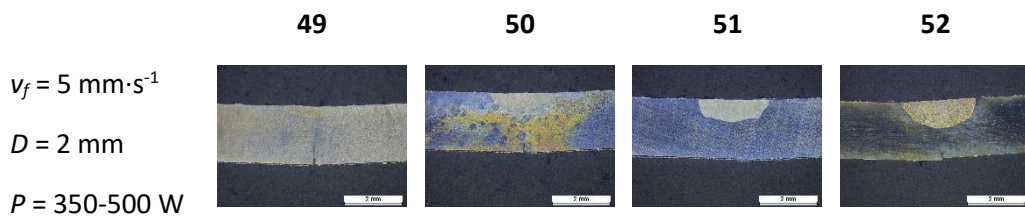
Taula VII.9: 42, 44, 46 eta 48 entseguen zeharkako sekzioak



Taula VII.10: 41, 38, 39 eta 40 entseguen zeharkako sekzioak



Taula VII.11: 34, 35, 36 eta 37 entseguen zeharkako sekzioak



Taula VII.12: 49, 50, 51 eta 52 entseguen zeharkako sekzioak

VII.1. Bestelako faktoreen eraginaren azterketa

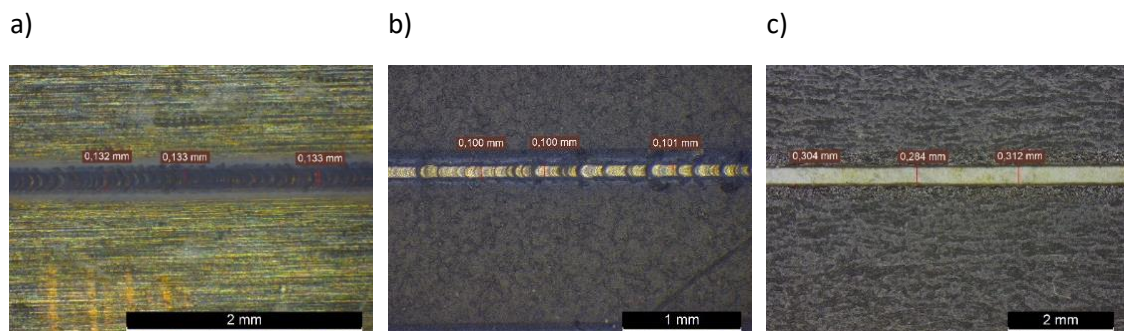
Potentziaren, aitzinapen-abiaduraren edo *wobble*-higiduraren balioak ezartzeaz gain, soldatze-prozesuan eragina duten hurrengo alderdiak aztertu dira: foku-posizioa, babes-gasaren emaria eta piezen arteko tartea edo *gapa*.

VII.1.1. Foku-posizioaren eraginaren azterketa

Ikerlari askok laserraren fokua piezen barnean kokatzearen onurak azaldu dituzten arren (ikus II.7.4), ezin da egin guztizko baieztapenik. Alde batetik, adostasun bakarra fokuarien posizio optimoa kasu bakoitzaren baldintzen menpekoa dela da, hala nola, piezen lodiera, materialaren propietateak edo erabilitako potentzia bezalako faktoreek eragin zuzena dute. Bestetik, egun ez dagoelako inolako erreferentzia sendorik *wobble*-teknika erabiltzeak fokuan izan dezakeen eraginari buruz. Eta arestian aipatutakoez gain, soldadura-prozesuan beste faktore bat sartzen duelako. Horregatik guztiagatik, entseguetarako fokua piezen goiko aurpegian jartzea erabaki da.

Hala ere, nahiz eta eredu balioztatzeko aurreko irizpidea erabili, fokuari buruzko hainbat azterketa egin dira. Horri esker, Inconel 718-ko piezen soldadura ezberdinak foku-posizioaren arabera erkatu dira. Bestalde, fokuarien posizioa mugitu ahala erabilitako *spota* nola aldatzen den ikertu da, Rofin FL 010 laserraren ulertzean sakonduz.

Mugimendu trokoidala desaktibatuz, aluminioan, grafitoan, eta paperean egindako entseguak aztertu dira, foku-posizio ezberdinetarako lortutako emaitzak zerrendatuz. Horretarako, potentzia eta aitzinapen-abiadura ezberdinek emandako soldadura-aztarna neurtuz, *spot*aren diametroa nola aldatzen den behatu da. Horrela, foku-posizioaren araberrako potentzia-dentsitatea defini daiteke erudian.



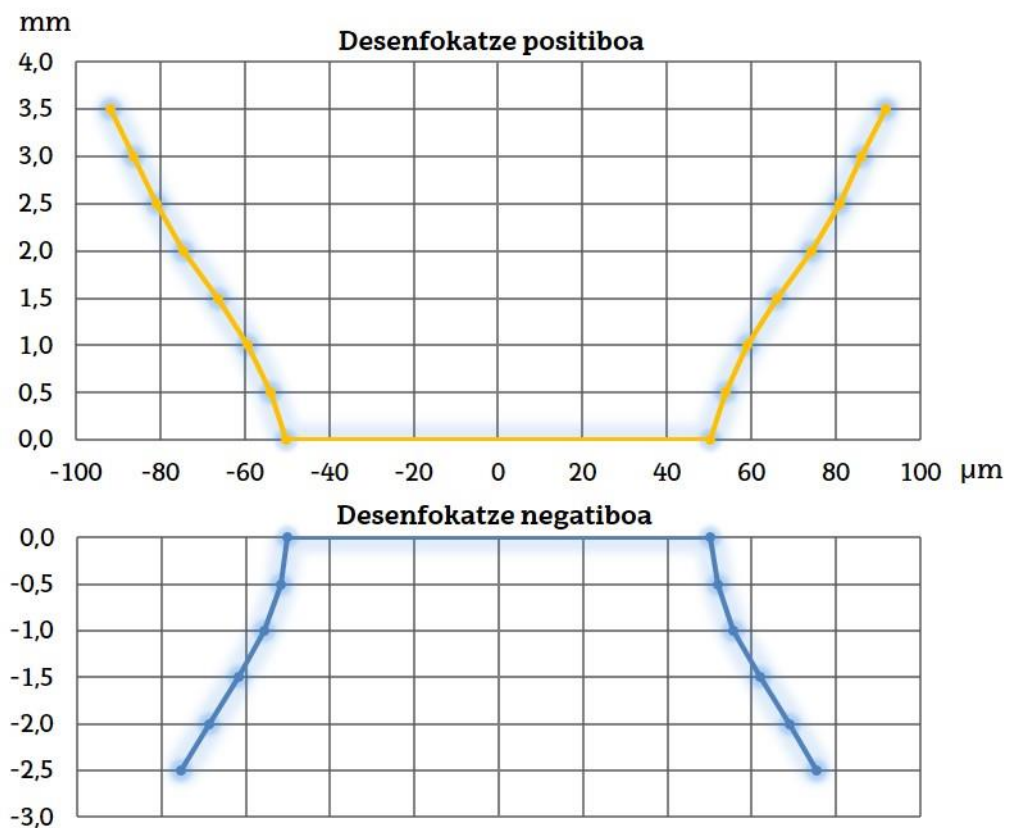
Irudia VII.5: Aluminioan (a), grafitoan (b) eta paperean (c) eginiko entseguak foku-posizioa zehazteko

Jakinik erabilitako Rofin FL 010 laserrari akoplatutako garraio-zuntzaren gutxieneko diametroa 100 μm dela, entseguetan diametro minimo horretara gehien hurbildu den materiala hartu da oinarritzat. Gauzak horrela, grafitoa izan da aukeratua eta erreferentziako foku-distantzia ezarri zaio bere diametro minimoan, Taula VII.13-an 0,0 mm bezala izendatua.

Foku-posizioa (mm)	Diametroa (μm)	Erradioa (μm)
3,5	183,7	91,8
3,0	172,3	86,2
2,5	162,0	81,0
2,0	148,7	74,3
1,5	132,3	66,2
1,0	118,3	59,2
0,5	107,7	53,8
0,0	100,3	50,2

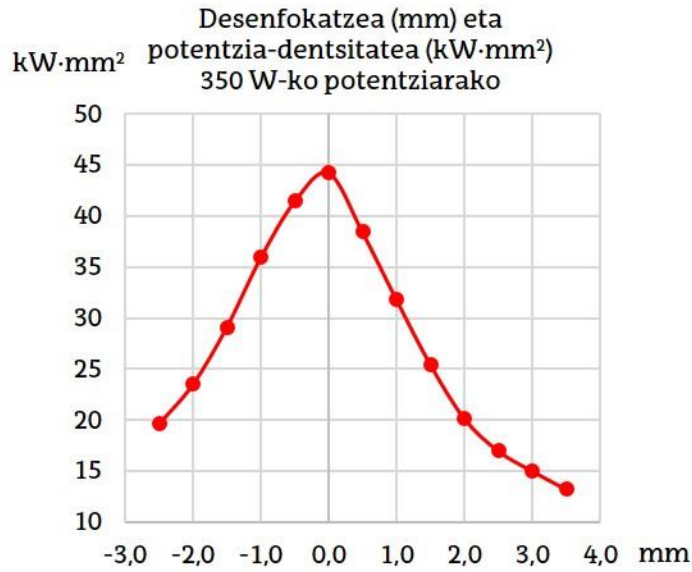
-0,5	103,7	51,8
-1,0	111,3	55,7
-1.5	123,7	61,8
-2,0	137,7	68,8
-2,5	150,7	75,3

Taula VII.13: Grafitoan eginiko entseguak: foku-posizioaren eta *spot*aren tamainaren erlazioa. Jarraiko grafiketan Taula VII.13-an adierazitako emaitzak marraztu dira. Laserra piezaren gainazaletik gora kokatzeari desenfokatzeko positiboa deitu zaio eta beheara kokatzeari, laserra pieza barnean sartzeari, desenfokatzeko negatiboa.



Irudia VII.6: Foku-posizioaren eta *spot*aren tamainaren diagrama

Era berean, laser-sortaren fokuratzeko mailaren arabera laserraren potentzia-dentsitatea desberdina izango da. Parametro hau oso garrantzitsua da makina zehatz bateko emaitzak beste makinetara hedatu ahal izateko.

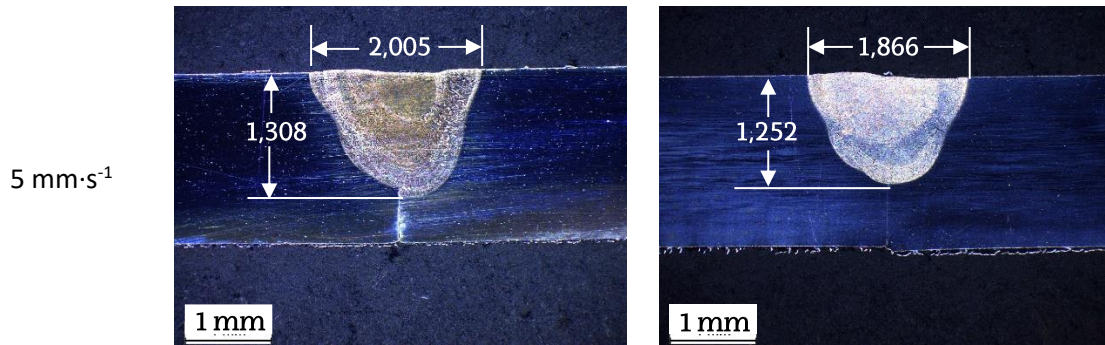


Irudia VII.7: Foku-posizioaren eta potentzia-dentsitatearen diagrama

VII.1.2. Babes-gasaren eraginaren azterketa

Lan-piezaren ingurua babes-gasaz hornitzeko, bereziki lan honetarako sortutako lanabesa erabili da (ikus VI.8). Lau hodiz osaturiko gailu honen hodi bakoitzean $2 \times 16 \text{ mm}$ -ko arteka bat mekanizatu da (guztira 32 mm^2 -ko azalera). Aparatu honen bidez, entseguetan 12 eta $24 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ -ko babes-gasaren emariak erabili dira, hauen eragina aztertzeko asmoz. Hortaz, arteka bakoitzetik irtendako gas-emariak $9,38\cdot 10^{-2}$ eta $18,75\cdot 10^{-2} \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{mm}^{-2}$ izan dira. Taula VII.14-an 450 W -ko potentziarako egindako saiakuntza anitzen emaitzak adierazten dira.

Aitzinapen-abiadura	Babes-gasaren emaria	
	$12 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$	$24 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$
$3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$		

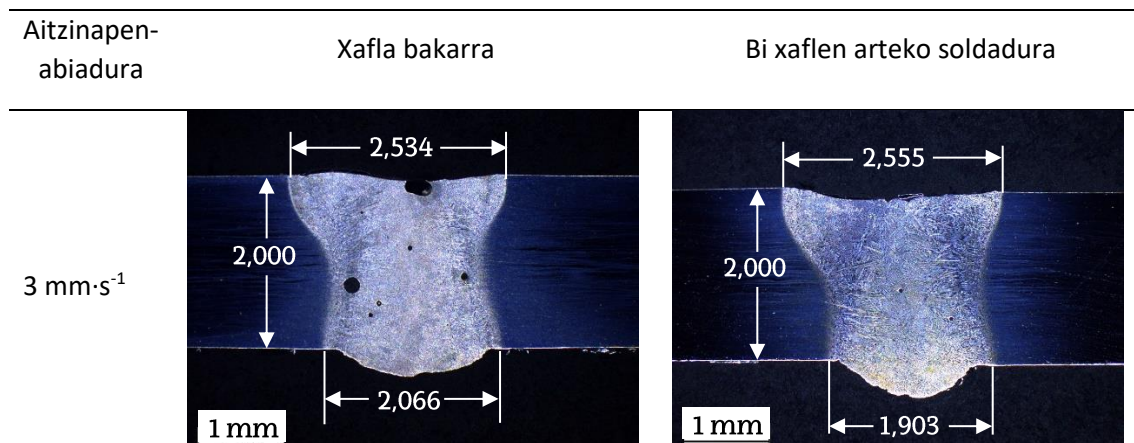


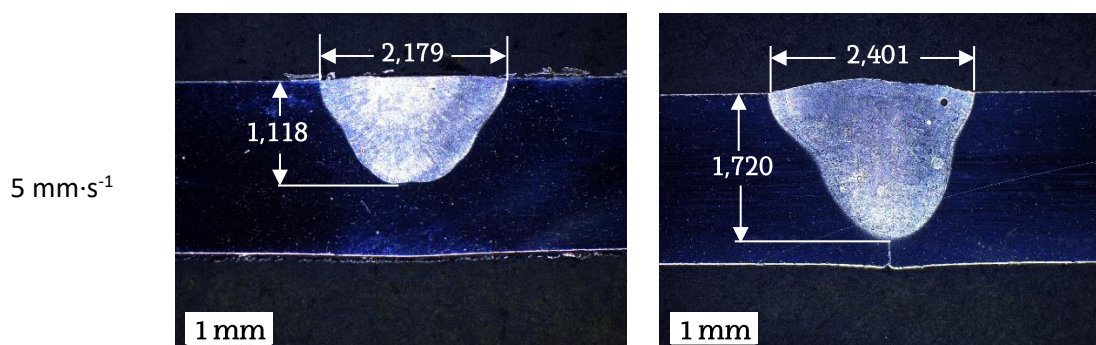
Taula VII.14: Babes-gasaren eragina aztertzeko entseguak (450 W)

Frogatuenez, $24 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ erabiliz gero, soldadura-kordoiak estuagoak dira eta sakonera aldetik $50 \mu\text{m}$ inguru baino ez dira murrizten $12 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ -ko emarikoekin konparatuz gero. Hori dela eta, entsegu guztiak $24 \text{ l}\cdot\text{min}^{-1}$ erabiliz burutu dira. Gainera, porositateari dagokionez, piezak argoiaz babestean poro gutxiago agertzen dira.

VII.1.3. Piezen arteko tartea edo *gap* efektuaren azterketa

Era berean, nahiz eta bata bestearen aurka egongo diren xaflen aurpegiak ondo leundu, ezinezkoa da zimurtasunik gabeko azalerarik lortzea. Beraz, laser-izpiak *wobble* bezalako mugimendua egitean eta bi xaflen arteko gunetik igarotzean, energiaren zati bat sakoneran zehar murgilduko da, hormen aurka islatuz. Gertakari honen eragina aztertzeko asmoz, sarrera-parametro berdinekin (450 W ; 3 eta $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$) bi entsegu mota burutu dira: bata, bi xaflen arteko soldadura-kordoa aztertzeko; bestea, xafla bakarraren gaineko eragina ikusteko.





Taula VII.15: Gaparen eragina aztertzeko entseguak (450 W)

Koroen zabalerrari dagokionez, balio ezberdinak lortu dira bi xaflen edo bakarraren gain soldadura-kordoa eratzean ($5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ erabiltzean ia $150 \mu\text{m}$ zabalagoa da soldadura-kordoa alde bakoitzetik). Dena den, aldaketarik nabarmena sakoneran soma daiteke, non soldadura-kordoa $600 \mu\text{m}$ baino gehiago barneratu den oinarri-materialean zehar piezen arteko hutsunea existitzen den kasurako.

Ondorioz, baieztatu daiteke *gap* txiki bat izateak soldadura sakonak lortzeko onuragarria dela, batez ere, islapen anitzek laser-izpiaren xurgapena hobetzen dutelako.

VII.2. Profil geometrikoen analisisa sarrera-parametroen arabera

VII.2.1. Soldadura-kordoen zabalera

Kordoen zabalera zehazteko, zenbakizko ereduaren lehen zatiari erreparatu behar zaio, hau da, Carslaw-Jaegerren teorian oinarritutakoari. Honen bidez, ereduak soldadura-kordoiak nolako zabalera duten iragar dezake. Konparaketa egiterako orduan, ereduak V. kapituluaz azalduko bi parametroak hartzen ditu kontuan: azalera-faktorea (S_{factor}) eta denbora-faktorea (t_{factor}). Lehenengoa erraz kalkulatu daitekeen arren, bi azalera definituen arteko zatiketa baita, bigarrena enpirikoki kalkulatu da, soldadura-prozesuan parte hartzen duten alderdiekin erlazionatzeko asmoz.

Ondorengo Taula VII.16-an entsegu bakoitzean egindako soldadura-kordoiaren esperimentalki neurturiko zabalera eta modeloak kalkulaturikoa edo aurreikusirikoa alderatzen dira. Gainera, kasu bakoitzean erabilitako azalera- eta denbora-faktoreen zenbakizko balioak erakusten dira.

Entsegua	S_{factor} [-]	t_{factor} [-]	Real width [mm]	Sim width [mm]	Errorea [%]
33	2,778	2,000	1,780	1,780	0,00
43	2,778	2,000	1,959	1,940	0,97
45	2,778	2,000	2,090	2,090	0,48

47	2,778	2,000	2,183	2,180	0,14
42	2,778	2,300	1,607	1,620	0,81
44	2,778	2,300	1,771	1,780	0,51
46	2,778	2,260	1,899	1,880	1,00
48	2,778	2,280	1,966	1,980	0,71
41	2,778	2,350	1,700	1,700	0,00
38	2,778	2,375	1,766	1,760	0,34
39	2,778	2,450	1,828	1,820	0,44
40	2,778	2,400	1,937	1,940	0,15
34	5,263	2,200	2,437	2,420	0,70
35	5,263	2,100	2,691	2,660	1,15
36	5,263	2,100	2,858	2,820	1,33
37	5,263	2,000	3,049	3,020	0,95
49	5,263	2,650	2,221	2,240	0,86
50	5,263	3,000	2,278	2,300	0,97
51	5,263	2,900	2,467	2,480	0,53
52	5,263	2,900	2,587	2,600	0,50

Taula VII.16: Entseguen eta ereduak iragarritako irudien zabaleren erkatzea eta errorea

Bestalde, laser-abiadura eta *wobble*-parametroez gain, *spot*ak zirkulu bat betetzeko zenbat denbora behar duen kalkulatu da (t_{in}), ibilbide partzial guztien batuketa (L_{in}) eta abiadura periferikoa (v_p) kontuan izanik. Era berean, beroa barrurantz hedatzen denaren efektua kontuan hartu ahal izateko, eraztunak sortzean erdigunean geratzen den “hutsunea” kalkulatu da (*Hollow area* - S_h).

$$L_{in} = d_w \cdot \sum_{n=1}^{\frac{d_w+d_s-1}{d_s}} \arctan\left(\sqrt{\left(\frac{d_w}{nd_s}\right)^2 - 1}\right) \quad [156]$$

$$t_{in} = L_{in}/v_p \quad [157]$$

$$S_h = \frac{\pi}{4} \cdot (D - 2d_s)^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_w + d_s - 2d_s)^2 = \frac{\pi}{4} \cdot (d_w - d_s)^2 \quad [158]$$

Entseguetatik ondorioztatu da *wobble*-diametro (D) eta aitzinapen-abiadura (v_f) berdinentzat, nahiz eta potentzia aldatuz joan, antzerako t_{factor} parametroa lortzen dela. Hori dela eta, entseguak lehenengo bi parametro horien arabera multzokatu dira, hurrengo taulan ikus daitekeenez.

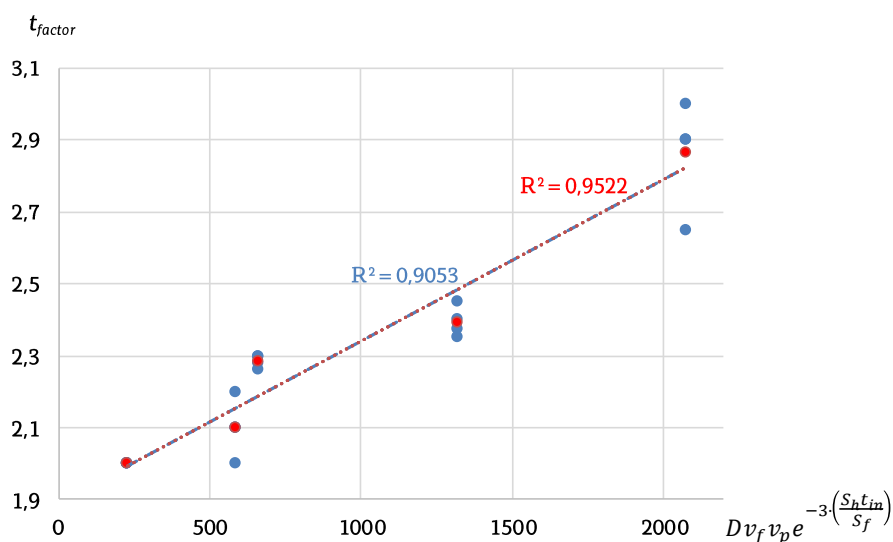
Entsegua	D [mm]	v_f [mm·s ⁻¹]	S_h [mm ²]	t_{in} [s]	S_{factor} [-]	t_{factor} [-]
33, 43, 45, 47	1	3	0,503	0,206	2,778	2,000
42, 44, 46, 48	1	5	0,503	0,124	2,778	2,285
41, 38, 39, 40	1	7	0,503	0,088	2,778	2,394
34, 35, 36, 37	2	3	2,545	0,419	5,263	2,100
49, 50, 51, 52	2	5	2,545	0,251	5,263	2,863

Taula VII.17: Entseguen multzokatzea antzerako denbora-faktoreen arabera

Bestalde, t_{factor} parametroa esperimentalki lortu ostean, prozesuan parte hartzen duten gainontzeko parametroek bere gain nolako eragina duten aztertu da. Parametro horren izaera esperimentala dela medio, etorkizunean modelo beste baldintza batzuetara hedatu ahal izateko erregresio lineal bidez hurbiltzea erabaki da.

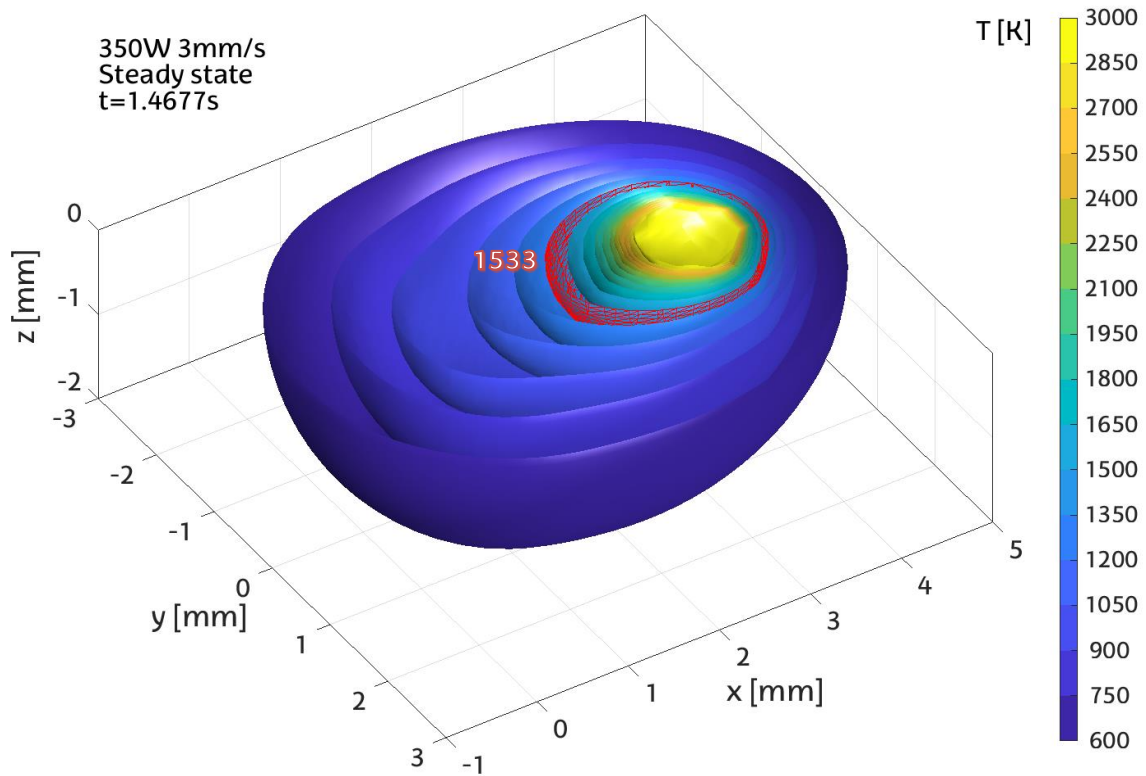
Erlazio horren bidez, t_{factor} -aren balioa prozesuan eragin zuzena duten hurrengo sei parametroekin lotu da: D , v_f , v_p , S_h , t_{in} eta S_f . Erregresio linealari dagokionez, R^2 mugatze-koefizienteak 0,9053 eta 0,9522 balioak hartzen ditu, lehen balioa t_{factor} -aren kasu guztiak banaka ezarriz (ikus Taula VII.16) eta bigarrena batezbesteko balioak hartuz (ikus Taula VII.17).

$$t_{factor} = 4 \cdot 10^{-4} \cdot D v_f v_p e^{-3 \cdot \left(\frac{S_h t_{in}}{S_f} \right)} + 1,89 \quad [159]$$



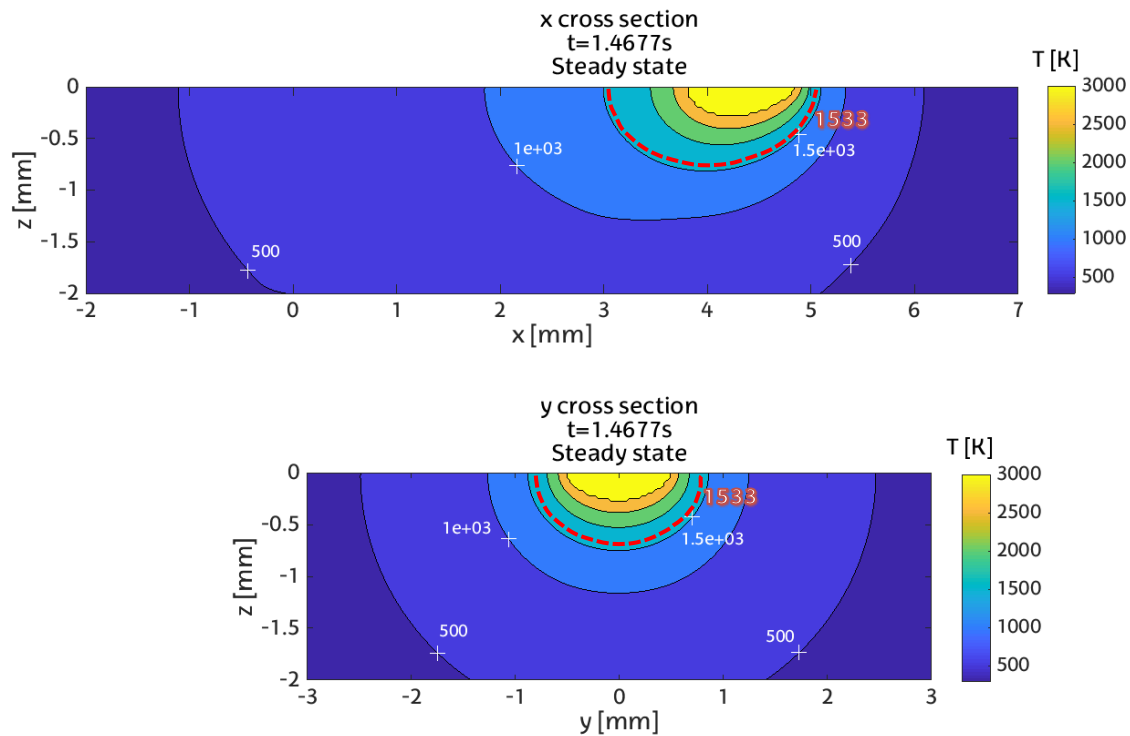
Irudia VII.8: Denbora-faktorearen diagrama prozesuan eragina duten hainbat parametroren menpe

Soldadura-prozesuan egoera egonkorra lortu ostean piezaren isotermak marraztu dira eta galda-bainua errazago ikusteko gorritz marraztu dira bere mugak, kontuan izanik *solidus* egoera, Inconel 718-arentzat, 1533 K dela.



Irudia VII.9: Eredututako egoera egonkorreko tenperatura-eremua eta galda-bainuaren tamaina (1533 K)

Hurrengo irudietan eredututako luzetarako (x) eta zabaletarako (y) ardatzen sekzioak aurkezten dira, z ardatzak piezen lodieraren norabidea adierazten duelarik. y ardatzean, logikoa denez, egoera termikoa simetrikoa da. x ardatzean, aldiz, galda-bainuaren itxura ezberdina da aurrealdea eta atzealdea erkatzean, norabide horretan zehar aurrera egin ahala utzitako ubera deskribatuz.



Irudia VII.10: Eredututako egoera egonkorreko temperatura-eremua eta galda-bainuaren tamaina (1533 K): zeharkako sekzioak

Barneraturiko azalera- eta denbora-faktoreak *wobble* moduko teknikan gertaturiko bero-kondukzioaren fenomenoaren eredutzeko baliagarriak direla frogatu da. Entsegu enpirikoen bidezko probeten neurketekin alderatuz, eta Taula VII.17-ko t_{factor} -aren balioak erabiliz, errore maximoa % 1,15 izan da, hau da, 31 μm -koa. Eredua doitzen jarrai daitezkeen arren, honek are eta saretze zehatzagoa definitzera behartzen du neurketa errealetara hurbiltzeko, baina kostu konputazionalaren hazkundeak ez duela merezi ondorioztatu da, 10 μm zehaztasuna nahikotzat kontsideratuz.

VII.2.2. Soldadura-kordoen sakonera

Soldadura-kordoen sakonera eredutzeko helburuarekin, Rosenthalen teoria erabili da. Horretarako enpirikoki kalkulatu dira $Q''_{\xi\xi}$, $Q''_{\eta\eta}$ eta $Q''_{\zeta\zeta}$ parametroak Inconel 718 materialarentzat, aurreko atalean t_{factor} -arekin egin den bezala. Era berean, *gapari* esker sakonera handiagoko soldadurak sortzen direla frogatu da (ikus VII.1.3). Hortaz, efektu hau ereduaren barneratzeko, z_{factor} deritzon parametroa erabili da (ikus ek. [160]), z norabidean zehar energiaren xurgapenak duen portaera eredutzeko. Parametro hori sakonera zeharreko mugimenduarekin lotu da, m geruza bakoitzerako balio berri bat kalkulatu. Entseguen eta simulazioen arteko alderaketa bat eginez, parametro hauek doitzuz joan dira, prozesuan zehar erabilitako beste faktoreek nolako eragina izan duten aztertuz.

$$z_{factor}(m) = 1 + \frac{t_{factor}}{33,9 \cdot e^{-(0,006 \cdot P_{sim})}} \cdot \frac{z(m)}{depth} \quad [160]$$

$$Q''_{\zeta\zeta}(m) = z_{factor}(m) \cdot Q''_{\zeta\zeta} \quad [161]$$

Hainbat simulazio burutu ostean, *wobble*aren diametroak materialaren barne-mugimenduan eragin zuzena duela ondorioztatu da. Hortaz, Carslawen ataletik jarauntsitako azken eremu termikoa Rosenthalen atalean barneratzean, simulazioan aplikaturiko potentzia diametroaren eragina kontuan hartu behar dela erabaki da.

$$P_{sim} = \frac{P_{real} \cdot S_{factor}}{t_{factor}} \cdot \frac{1}{D^3} \quad [162]$$

$$Q'_{\xi} = -(t_{factor} \cdot 10^{-3}) \quad [163]$$

$$Q''_{\xi\xi} = Q''_{\eta\eta} = -(t_{factor} \cdot 10^{-6}) \quad [164]$$

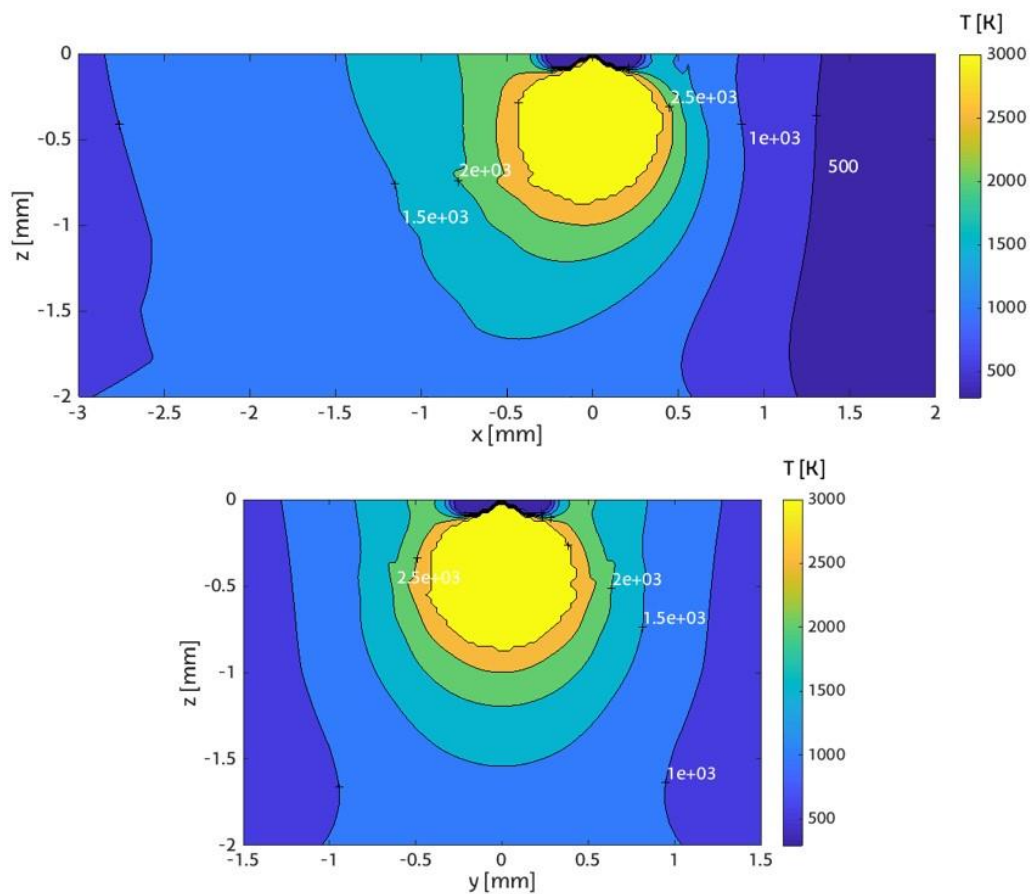
$$Q''_{\zeta\zeta} = [(t_{factor})^2 \cdot D \cdot 10^{-5}] \quad [165]$$

Entsegua	d_w [mm]	P [W]	V_f [mm·s ⁻¹]	Real depth [mm]	Sim depth [mm]	Errorea [mm]
33	0,9	350	3	1,51	1,40	0,114
42	0,9	350	5	0,92	1,18	-0,265
43	0,9	400	3	2,00	2,00	0,000
44	0,9	400	5	1,21	1,36	-0,147
45	0,9	450	3	2,00	2,00	0,000
46	0,9	450	5	1,56	1,42	0,142
47	0,9	500	3	2,00	2,00	0,000
48	0,9	500	5	2,00	2,00	0,000
41	0,9	450	7	1,28	1,28	0,000
38	0,9	500	7	1,32	1,36	-0,039
39	0,9	550	7	1,71	1,44	0,265
40	0,9	600	7	2,00	2,00	0,000
34	1,9	350	3	0,72	1,00	-0,283
49	1,9	350	5	0,40	0,66	-0,263
35	1,9	400	3	1,27	1,24	0,027
50	1,9	400	5	0,56	0,78	-0,223
36	1,9	450	3	1,57	1,28	0,289

51	1,9	450	5	0,77	1,02	-0,249
37	1,9	500	3	2,00	2,00	0,000
52	1,9	500	5	0,88	1,16	-0,280

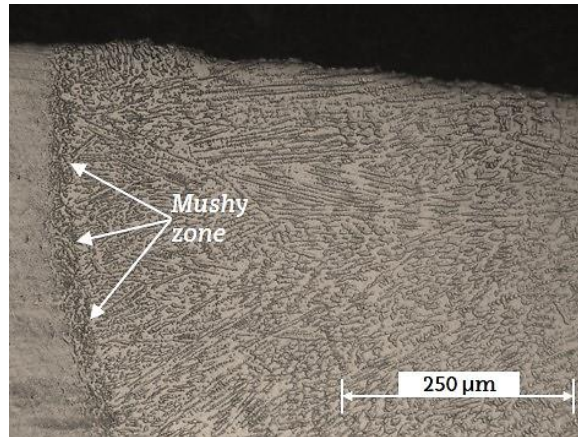
Taula VII.18: Entseguen eta ereduak iragarritako irudien sakoneren erkatzea eta errorea

Ereduren bigarren zati horretan, non materialaren barne-mugimenduak kontuan hartzen diren, sakonera iragartzean errore maximoa 300 μm baino txikiagoa izan da. Balio hau onargarrizat eman da, are gehiago aintzat harturik soldadura-prozesuen aldakortasuna eta kordioaren sakonerak aldaketak jasaten dituela soldatze-norabidean zehar.

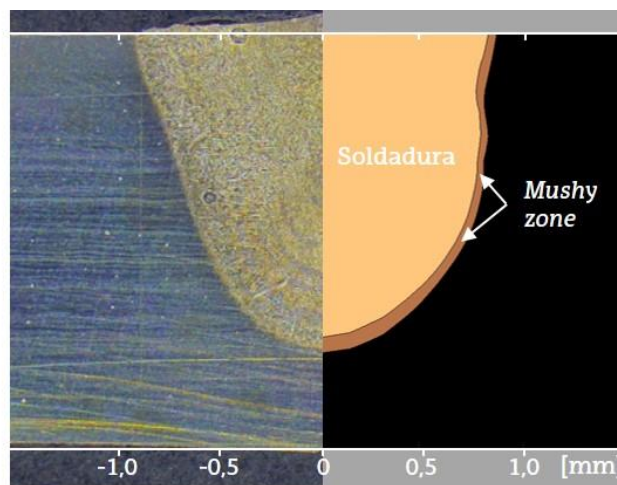


Irudia VII.11: Eredututako temperatura-eremua materialaren barne-mugimenduak aintzat harturik

Material batek urtze- eta solidotze-prozesuak jasaten dituenean, bere barne-egiturak aldaketak pairatzen ditu, bukaeran izango duen barne-egitura prozesuaren hozte-gradientearen menpe egongo delarik. *Liquidus* temperaturatik (T_{liq}) *solidus*erako (T_{sol}) trantsizioan, zutabe itxurako mikroegitura dendritikoa sortzen da materiala guztiz solidotu heinean. Hala ere, badago gune bat non *solidus* temperatura gainditu baina guztiz urtu ez dena. Gune horri *mushy zone* deritzo [Voller, 1987]. Hau da, erdibideko gunea, non gertatutako aldaketak ez dira ez fase solidoan ez likidoan gertatu.

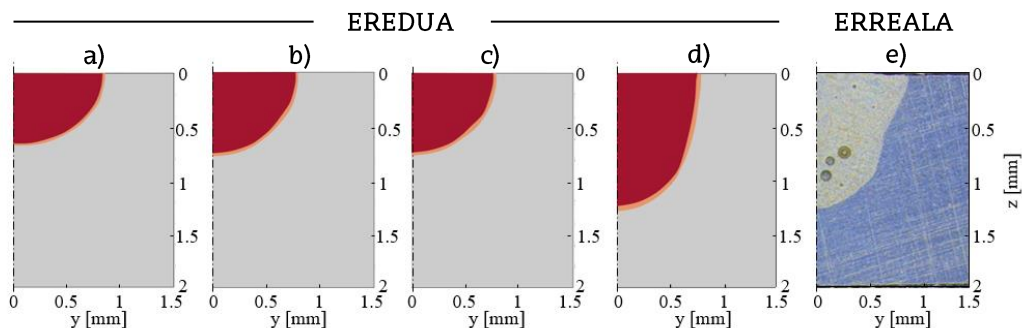


Irudia VII.12: *Mushy zone*aren azterketa (500 W; $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; *wobble* diametroa = 1 mm)



Irudia VII.13: Iragarritako eta enpirikoki neurturiko *mushy zone*aren azterketa
(350 W; $3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; *wobble* diametroa = 1 mm)

Rosenthalen ereduan oinarritutako garapen matematikoak beroa monopolo, dipolo eta kuadripoloen bidez banatzen du (ikus V.9). Hiru gai horiek atalka aplikatuz gero, soldaduraren sakoneran nolako eragina izango duten ikustea ahalbidetzen da, probeten bitartez egindako entseguen azkeneko itxurarekin alderatuz.



Irudia VII.14: Ereduen sakoneraren kalkulua atalka: a) Inolako polarik kontuan hartu gabe; b) Monopoloa kontuan harturik; c) Monopolo eta dipoloa kontuan harturik; d) Monopolo, dipolo eta kuadripoloak kontuan harturik; e) Entseguren zeharkako profila (500 W; $7 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$; *wobble* diametroa = 1 mm)

VII.3. Tenperaturaren eta mikroegituraren azterketa

Eredua balioztatzeko, mikroegiturari erreparatu zaio. Alde batetik, lehen eta bigarren mailako dendriten arteko distantzia (*Primary Dendrite Arm Spacing – PDAS*; *Secondary Dendrite Arm Spacing – SDAS*) neurtuz eta ebaluatuz. Lortutako emaitzak jasandako prozesu termikoarekin erlazionatu dira, dendriten hazkundera tenperaturaren bilakaerarekin zuzenean erlazionaturik baitago. Horretarako, esperimentalki neurtutako *SDAS* zehatz bakoitzarentzat hozte-gradiente teorikoa lortu da. Bestetik, behin tenperatura-gradiente horiek kalkulaturik, ereduak emandako emaitzekin alderatu dira, balioztatzea gauzatzeko eta entsegu enpirikoen eta simulazioen arteko adostasun-maila aztertzeko asmoz.

VII.3.1. Dendriten hazkundera

Dendriten arteko distantzia hozte-gradientearen eta muga-tenperaturen bidez (T_{liq} eta $\gamma/laves$ T_e tenperatura eutektikoa) zenbatetsi daiteke. Tarte honetan, dendritak kristalografikoki aldekoak diren norabideetan hazten joango dira, beraien ardatz nagusiak eraikiz eta, neurri apalago batean, zeharkako norabideetan bigarren mailako ardatzak eratuz [Microstructure and tensile properties of Inconel 718 pulsed Nd-YAG laser welds_RAM]. *SDAS*aren neurketek egonkortasun handiagoa erakusten dutenez, beraiek erabili dira ereduarekin alderatzeko.

Lan honetan, bigarren mailako dendriten arteko distantzia 10 aldiz neurtu da probeta bakoitzean, gerora batez besteko balioa lortzeko. C konstanteak (ikus ek. [161]) materialaren araberako balioa izango du, eta Inconel 718 aleazioaren kasuan, balio hau 10 da [Patel, 2001].

$$SDAS = C \cdot \left(\frac{T_{liq} - T_e}{\frac{dT}{dt}} \right)^{1/3} \quad [166]$$

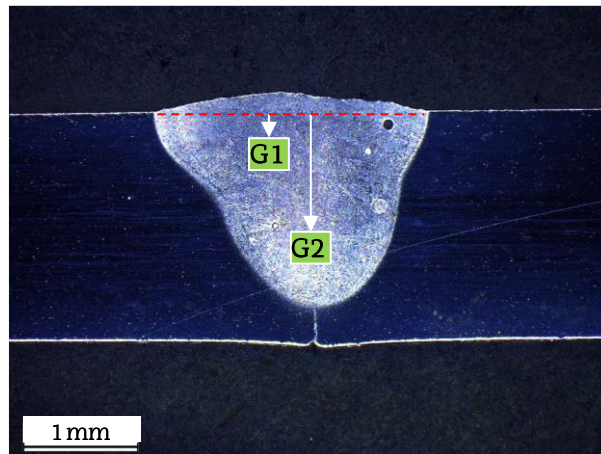
Inconel 718 asko erabiltzen den aleazioa denez, hainbat autorek ikerketak eta emaitzak argitaratu dituzte erreazio-tenperatura hauek azaltzeko. Lan honetan, hozte-prozesurako Einselsteinek emandako balioak aintzat hartu dira entsegu enpirikoetako emaitzekin alderatzeko [Antonsson, 2005]. Hau da, 1260 °C *liquidus* tenperaturarentzat eta 1177 °C $\gamma/laves$ tenperatura eutektikoarentzat.

Erreakzio etapa	Tenperatura [°C]
<i>Liquidus</i> hoztean	1260
$\gamma/laves$ eutektikoa hoztean	1177

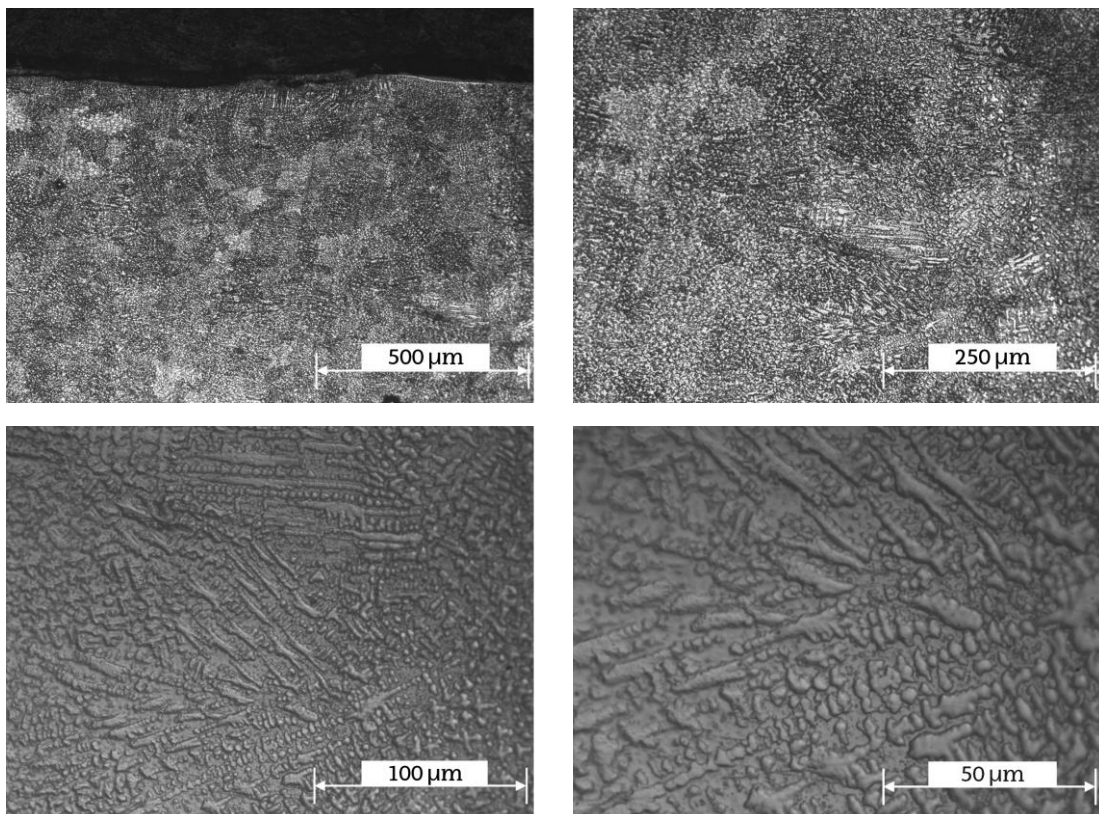
Taula VII.19: Inconel 718 aleazioaren erreazio-tenperaturak [Antonsson, 2005]

Dendriten neurketarako, soldadura-kordioak bi gune ezberdinetan aztertu dira. Lehena, luzetarako mozketak bat eginez, gainazaletik gutxi gora behera 200 μm -ra dagoen G1 gunea. Mozketak horren helburua Marangoni deritzon efektuak dendriten hazkundera eraginik duen aztertzeko izan da. Bigarren mozketak mota, zeharkakoa, gainazaletik 1 mm inguruko distantziara

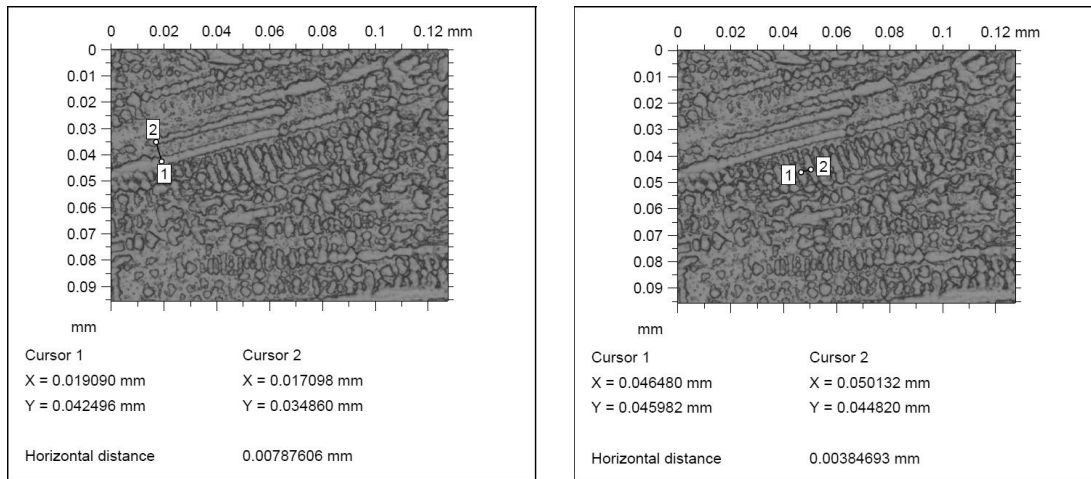
dagoen G2 gunea aztertzeko erabili da. Horrekin, sakonera handietako tokiko portaera aztertzea ahalbidetu da, soldaduraren behealdea solidotzen lehena baita.



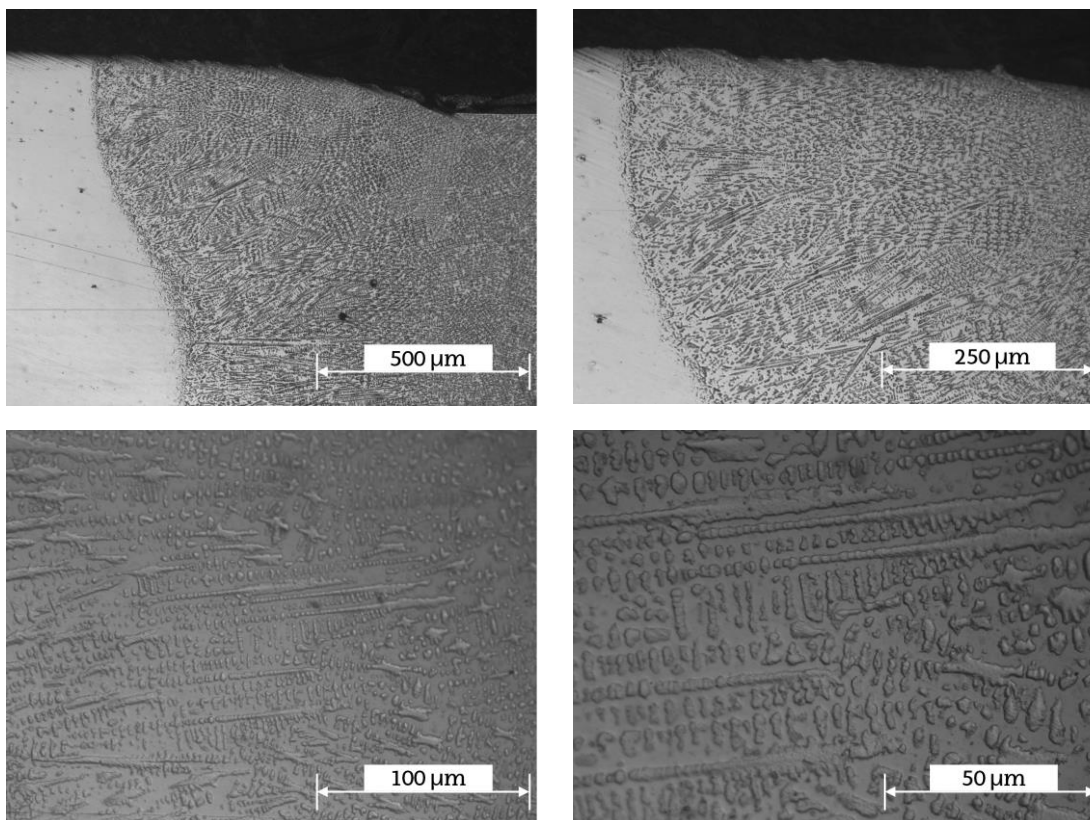
Irudia VII.15: Dendriten neurketarako gunek: G1 eta G2



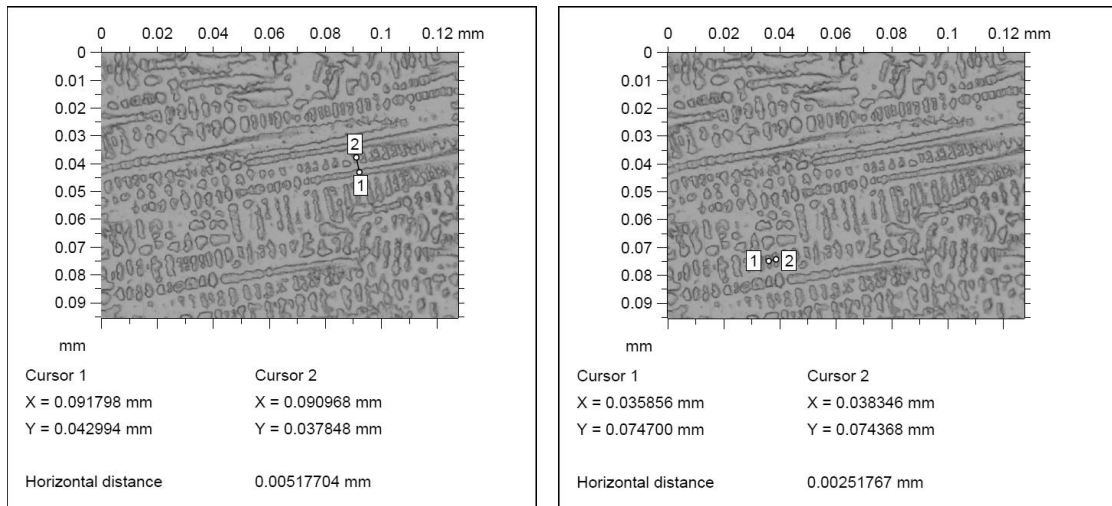
Irudia VII.16: G1 gunea: 10X, 20X, 50X eta 100X ($350 \text{ W } 3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)



Irudia VII.17: G1 guneko dendriten arteko distantzia ($350 \text{ W } 3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)



Irudia VII.18: G2 gunea: 10X, 20X, 50X eta 100X ($350 \text{ W } 3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)



Irudia VII.19: G2 guneko dendriten arteko distantzia ($350 \text{ W } 3 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$)

Potentzia [W]	v_f [$\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$]	PDAS [μm]		SDAS [μm]	
		G1	G2	G1	G2
350	3	7,148	5,987	3,701	3,185
	5	9,789	3,871	2,583	3,053
500	3	8,013	7,207	4,249	3,775
	5	8,690	7,934	2,626	3,537

Taula VII.20: Dendriten arteko distantziak ($D=1 \text{ mm}$)

Bigarren mailako dendriten arteko distantziari erreparatuz, G1 gunean, abiadura 3-tik $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ izatera pasatzen denean, SDAS $1 \mu\text{m}$ baino gehiago txikitzen da. G2 gunean, ordea, abiadura 3tik $5 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ izatera igarotzean, $0,2 \mu\text{m}$ baino gutxiago txikitzen da. Hau da, ondoriozta daiteke Inconel 718 xaflak *wobble*-teknikarekin soldatzean abiadurak eragin zuzena duela Marangoni indarrak sortzen diren inguruan, dendriten arteko distantzia oso ezberdinak sorraraziz.

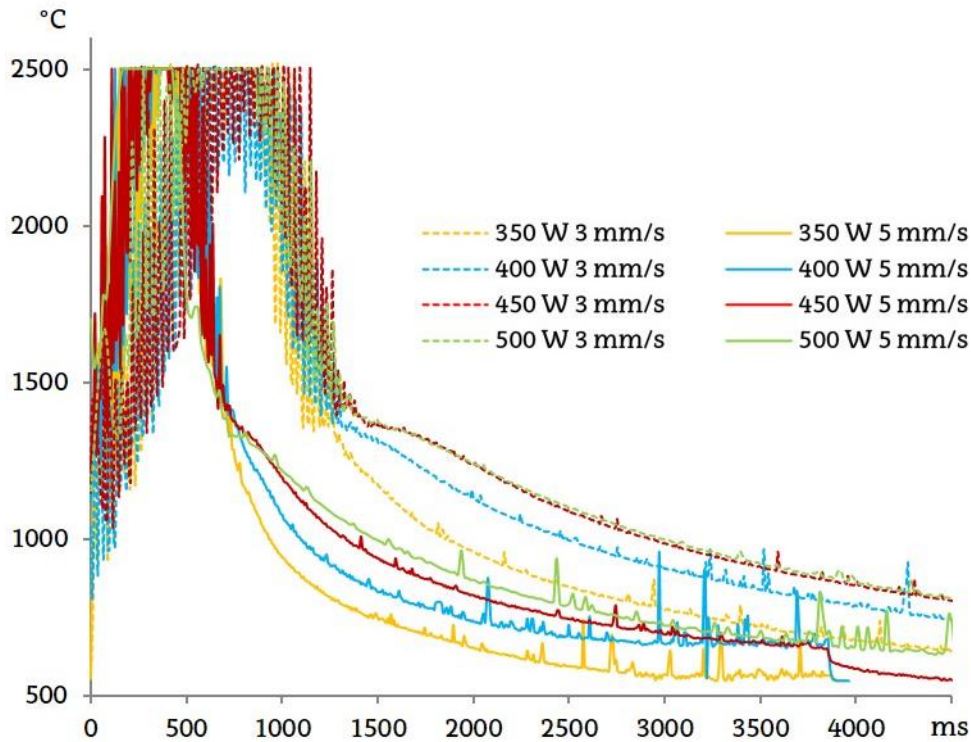
VII.3.2. Ereduaren eta pirometroaren neurketen arteko alderaketa

Lan honetan garatutako ereduak emandako eremu termikoa balioztatzeko, pirometroak hartutako balioak kontuan hartu dira eta hozte-denbora aztertu da. Bestalde, ereduak emandako tenperatura-eremuak aztertu dira dendriten arteko distantzia kalkulatzeko. Ostean, emaitzak ereduarekin eta neurketa enpirikoekin erkatu dira.

VII.3.2.1. Pirometroaren neurketak

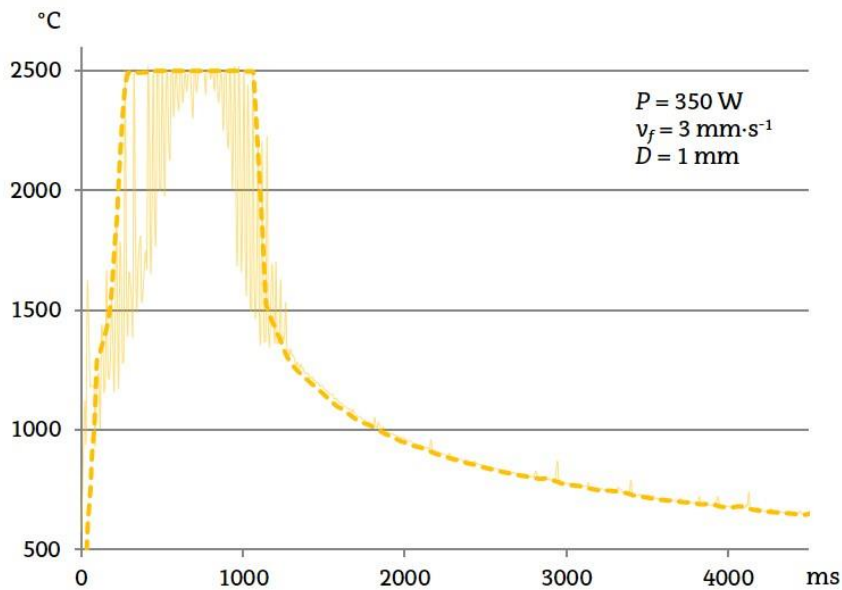
Aztertutako entseguen gainazaleko hozte-gradienteak kalkulatzeko, pieza hozten doan heinean, tenperatura maximotik *liquidus* tenperaturara heldu arteko denboraren menpeko garapena aztertu behar da. Kasu honetan, pirometroa 2000 K ingurutik jaisten hasi eta 1609 K lortu arteko

gradientea hartu da oinarritzat. Hala ere, hozketa-prozesuaren bizkortasuna dela medio, pirometroaren neurketek beti ez dute temperatura hauek zehazki noiz gertatu diren emango. Horregatik, temperatura bi hauetatik hurbilen dauden datuak hartu dira aintzat.



Irudia VII.20: Pirometroaren neurketen diagrama ($D=1\text{ mm}$)

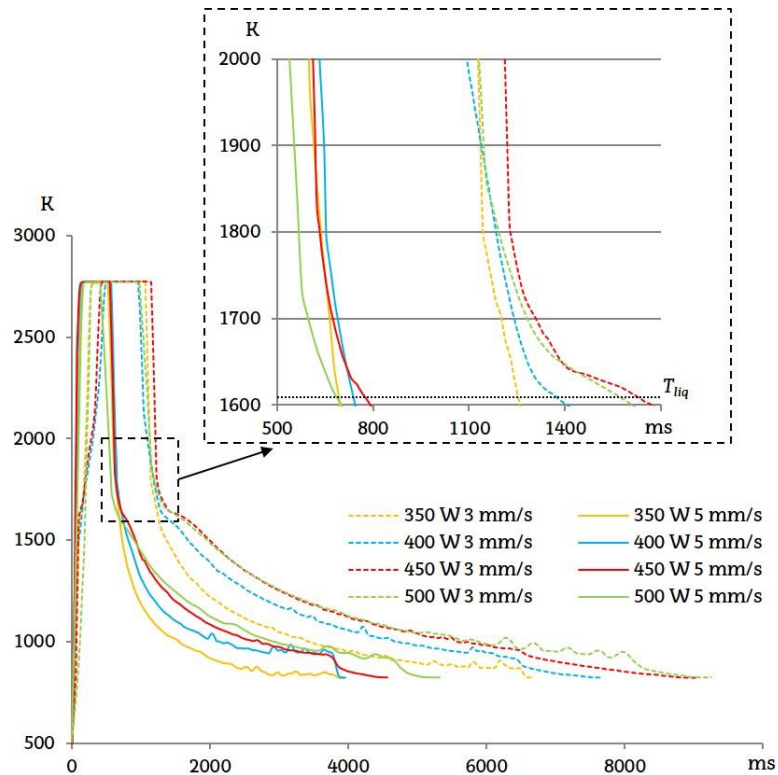
Era berean, pirometrotik jasotako seinale diskretizatu *smoothing* edo leuntze baten bidez egokitu da Matlab programaren bitartez, azterketa bisuala errazteko. Kontuan izan behar da pirometroaren neurketak gainazalean bakarrik egin direla (Irudia VII.23n GO gune bezala izendatua), non *wobble*aren higidurak eta gainazal-tentsioek eragindako materialaren barne mugimenduek eragin zuzena izango duten neurketetan.



Irudia VII.21: Neurketa priometrikoa *smoothing*-teknika aplikatu ostean

P [W]	v_f [mm·s ⁻¹]	Solidotze-gradientea [K/s]
		G0
350	3	2459
350	5	6030
400	3	1860
400	5	4929
450	3	1587
450	5	4435
500	3	576
500	5	1932

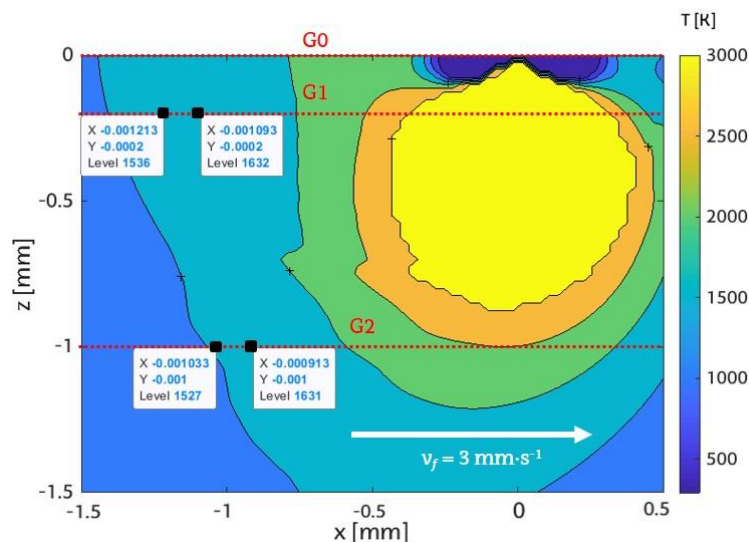
Taula VII.21: Neurturiko solidotze-gradienteak gainazalean (D=1 mm)



Irudia VII.22: Solidotze-gradienteen gunearen xehetasuna

VII.3.2.2. Ereduaren neurketak

Materialaren barne-mugimendua kontuan hartzen duen egoera egonkorra aintzat harturik, entseguen uneko temperatura-eremuaren argazkiak lortu dira. Horri esker, soldaduren puntu ezberdinetako temperatura eta kokapen zehatzak lortu ahal izan dira, aitzinapen-abiadura jakina izanik, hozte-gradienteak eta dendriten arteko distantzien iragarpena burutu ahal izateko.



Irudia VII.23: Ereduak iragarritako xehetasuna: G0, G1 eta G2 guneen temperatura eta solidotze-tartearen distantzia

Pirometroarekin egin bezala, ereduaren gainazaleko hozte-gradienteaz aztertu da.

P [W]	v_f [mm·s ⁻¹]	G0
		Hozte-gradienteak [K/s]
350	3	2300
350	5	6250
400	3	1956
400	5	5083
450	3	1640
450	5	4708
500	3	300
500	5	1833

Taula VII.22: Ereduak iragarritako solidotze-gradienteak gainazalean ($D=1$ mm)

G1 eta G2 gunetako *solidus* (1533 K) eta *liquidus* (1609 K) tarteak harturik, solidotze-gradienteak kalkulatzeko, ek. [166] alderantziz aplikatu da, bigarren-mailako dendriten arteko distantzia zenbatetsiz.

P [W]	v_f [mm·s ⁻¹]	G1		G2	
		Hozte-gradiente [K/s]	SDAS [μm]	Hozte-gradiente [K/s]	SDAS [μm]
350	3	2400	4,046	2600	3,940
350	5	7000	2,832	6625	2,884
400	3	1933	4,349	1909	4,367
400	5	5333	3,101	5917	2,995
450	3	1627	4,606	1500	4,733
450	5	4375	3,312	4750	3,223
500	3	1111	5,231	1217	5,075
500	5	3708	3,500	3875	3,449

Taula VII.23: Ereduak iragarritako irudietako bigarren mailako dendriten arteko distantzia

VII.3.2.3. Alderaketa

Gainazaleko neurketek dagokienez (Taula VII.24), ereduak eta pirometroak emandako balioen arteko errorea 300 K·s⁻¹ baino txikiagoa izan da. Errore hau bi faktore nagusik eragindakoa izan daiteke: alde batetik, hozte-prozesua oso azkarra denez, zehaztasun handiz definitzeko zailtasuna areagotzen da. Bestetik, *wobble*-higidura trokoidalak bero-iturria pirometroak markatutako puntutik behin baino gehiago igarotzea eragiten duelako. Gauzak horrela, ereduak emandako hozte-gradiente mota honetako prozesurako hurbilpen egokia dela ondorioztatu da.

P [W]	v_f [mm·s ⁻¹]	Hozte-gradiente G0 gunean		
		Pirometroa [K·s ⁻¹]	Eredua [K·s ⁻¹]	Errorea [K·s ⁻¹]
350	3	2459	2300	-159
350	5	6030	6250	220
400	3	1860	1956	96
400	5	4929	5083	155
450	3	1587	1640	53
450	5	4435	4708	273
500	3	576	300	-276
500	5	1932	1833	-98

Taula VII.24: Pirometroarekin eta ereduak iragarritako tenperaturen arteko alderaketa gainazalean

Dendritei dagokienez, ereduaren eta mikroskopia hartutako neurrien arteko alderaketa egitean, mikra bat baino gutxiagoko diferentzia dagoela egiaztatu da. Horrek eredu dendriten hazkunde zehaztasunez iragartzeko gai dela esan nahi du.

P [W]	v_f [mm·s ⁻¹]	SDAS [μm]				Errorea [μm]	
		Mikroskopia		Eredua		G1	G2
		G1	G2	G1	G2		
350	3	3,701	3,185	4,046	3,940	0,345	0,755
350	5	2,583	3,053	2,832	2,884	0,249	-0,169
500	3	4,249	3,775	5,231	4,656	0,982	0,881
500	5	2,626	3,537	3,500	3,449	0,874	-0,088

Taula VII.25: Bigarren mailako dendriten arteko distantzia: probeten eta ereduak iragarritako irudien arteko erkatzea

VII.4. Ereduen kostu konputazionala

Garatutako ereduaren kostu konputazionalari dagokionez, simulazioak era arinean egin daitezkeela ondorioztatu da. Are gehiago, sarrera-parametroak aldatzeko eta barneratzeko duen moldakortasunari esker, ereduak hainbat simulazio-egoera era arinean egin eta doitzeko ahalmena dauka.

V. kapituluaz azaldu legez, eredu bi zatitan banatuta dago. Alde batetik, Carslaw-Jaegerren teorian oinarriturikoa, eta bestetik, Rosenthalen ekuazioetatik abiatutako Nunesen garapenean funtsatutakoa. Lehen zatian, non soldadura-kordoen zabalera eta denboran zeharreko bilakaera termikoa kalkulatu den, kostu konputazionala sortutako saretzearen doitasunaren menpe egongo da. Hau da, logikoa denez, hiru dimentsiotako saretzea definitzerako orduan, elementu-kopuruaren handitzeak simulazio-denboraren handitzea eragingo du. Hala ere, aipatutako moldakortasunari esker, saretze ez hain xeheki diskretizatu batetik abiatuz, soldaduraren profil geometrikoaren itxura azkar balioetsi daiteke, gerora elementu-tamainaren magnitude-ordena txikiago batekin lan egiteko. Bigarren zatian, materialaren barne-mugimenduak simulatu direnean, kostua aurreko ataleko nodo kopuruaren menpe ere egongo da. Hala ere, ereduaren bigarren atal honetan simulazioak lehenengoan baino askoz ere denbora gutxiago behar du.

xy planoko saretzearen tamaina	Nodoen arteko distantzia	z norabideko geruza kopurua (Xaflaren lodiera: 2 mm)	Kostu-konputazionala	
			Carslaw-Jaeger	Nunes
512 mm ²	320 μm	9 (Tartea: 250 μm)	2 min	20 s
1024 mm ²	160 μm	21 (Tartea: 100 μm)	5 min	30 s
2048 mm ²	20 μm	41 (Tartea: 50 μm)	35 min	4 min

Taula VII.26: Ereduen kostu konputazionala saretzearen arabera (15 denbora-urrats harturik)

VIII Kapitulua. Ondorioak eta etorkizuneko lerroak

VIII ONDORIOAK ETA ETORKIZUNEN LERRAK

VIII.1.1. Ondorioak

1. Lan honetan orain dela 80 urte garatutako teoriak egun baliagarriak direla frogatu da. Beroaren transmisioaren inguruan landutako ekuazio eta baldintzak egungo laser makineriak dauzkan zehaztapenekin uztartuz, eredia gai da Inconel 718 aleaziozko xaflen soldadura iragartzeko. Carslaw-Jaegerren teoria baliagarria da kordioen zabalera kalkulatzeko. Bestalde, Rosenthalen ekuazioak kordioen sakonera eta materialaren barne-mugimenduak eredutzeko erabili dira.
2. *Wobble*-teknika baliagarria da *spot* txikiko eta potentzia baxuko laserren bidez Inconel 718-ko xaflak soldatzeko. Ondoz ondoko eraztunen artean ahalik eta gainjartze txikiena ezarri, soldadura onargarriak lor daitezkeela frogatu da.
3. *Wobble*-teknika erabiltzean, laser-izpiak zirkulu bete bat sortzeko behar duen denbora eta ibilbidea kontuan hartzea funtsezkoa da eredia garatzerakoan eta doitzekoan. Alde batetik, sortutako eraztunen eta zirkulu beteen erlazioak azalera-faktorearen balioa ematen du. Bestetik, denbora-faktorea aintzat harturik, galda-bainuaren erdigunerantz doan beroaren eragina zenbatetsi daiteke. Gauzak horrela, laserrarekin burututako entseguetan eta simulazioetan erabilitako potentziaren arteko baliokidetasuna kalkulatu daiteke.
4. Garatutako eredia zehatza da, iragarritako kordioen zabalera % 1,15-eko errore maximoa lortuz eta sakoneran, materialaren barne-mugimenduak kontuan hartuz, 300 μm baino gutxiagoko desberdintasuna erdietsiz. Horretaz gain, tenperaturari dagokionez, pirometroarekin neurtutako hozte-gradienteen eta ereduak emandakoen artean 300 $\text{K}\cdot\text{s}^{-1}$ baino gutxiagoko diferentzia lortu da. Era berean, soldaduren barnean sortutako dendriten tamainari dagokionez, mikroskopioan neurtutakoen eta ereduak emandakoen artean 1 μm baino gutxiagoko desberdintasuna erdietsi da.
5. Ereduaren bizkortasunari eta arintasunari dagokionez, oso azkarra da. Hiru dimentsioko simulazioa burutzeko, non 450.000 nodo 105 denbora-unetan aztertzen diren (hau da, guztira 47 milioi bat nodo), 40 bat minutu behar dira. Emaitza lez, ereduak soldaduren profila eta uneko eremu termikoa kalkulatzeko gai da.

VIII.1.2. Etorkizuneko lerroak

1. Ikerlan honetan Inconel 718 materialeko lodiera berdineko xaflen soldadura eredu da. Alabaina, garatutako ereduaren aplikagarritasuna hedatze aldera, material anitzetarako eta lodiera desberdinetako xaflen soldadura kasuetara zabalduko da.

2. Batuko diren xaflen posizio desberdinetarako soldadura-prozesua eredutzea beharrezkoa dela ikusi da. Beraz, gainjarritako soldadurak eta loturak eredutzeko esfortzua egin beharra dago, xafla lauez gain geometria konplexuagoko kasuetara hedatu ahal izateko.
3. Soldadura-parametroak optimizatzeko aldera alderantzizko ereduak garatzearen beharrezkoa ikusi da. Hala, batu nahi diren xaflen geometria eta materiala sarrera-parametro lez sartuz gero, ereduak prozesuan zein potentzia eta aitzinapen-abiadura kalkulatzeko gai izan beharko litzateke.
4. Ereduaren doitasuna hobetze aldera, oraingo honetan egindako sinplifikazioak eta alde batera utzi diren fenomeno fisikoak barneratuko dira, besteak beste fase aldaketak gertatzen direneko bero-sorraren eragina..
5. Soldadura-gunea loturako eremu ahula den heinean, ereduaren aplikagarritasuna handitze aldera, analisi termikoaz gain, berarekin akoplatuta legokeen analisi mekanikoaren beharrezkoa ikusi da: sortutako barne-tentsioak eta isurpen mugak CAD eta EFM programen bidez ereduak, lan-baldintzen arabera tentsio-maximoak kalkulatu ahal izateko.

IX Kapitulu. Bibliografia

IX BIBLIOGRAFIA

- [Lawrence, 2017] Lawrence, J. R. (Ed.). (2017). *Advances in laser materials processing: technology, research and applications*. Woodhead Publishing.
- [Alexopoulos, 2016] N. D., Gialos, A. A., Zeimpekis, V., Velonaki, Z., Kashaev, N., Riekehr, S., & Karanika, A. (2016). Laser beam welded structures for a regional aircraft: weight, cost and carbon footprint savings. *Journal of Manufacturing Systems*, 39, 38-52.
- [Zapirain, 2011] Zapirain, F., Zubiri, F., Garciandia, F., Tolosa, I., Chueca, S., & Goiria, A. (2011). Development of Laser Welding of Ni based Superalloys for Aeronautic Engine Applications (Experimental Process and Obtained Properties). *Physics Procedia*, 12, 105-112.
- [Airbus, 2018] Global Market Report 2018-2037. Esteka: www.airbus.com (azken sarrera: 2019/6/6).
- [Boeing, 2017] Current Market Outlook 2017-2036. Esteka: www.boeing.com (azken sarrera: 2019/6/6).
- [Rolls Royce, 2019] Aircraft Production 2018. Esteka: www.rolls-royce.com (azken sarrera: 2019/6/6).
- [ScienceDirect, 2019] Esteka: www.sciencedirect.com (azken sarrera: 2019/6/6).
- [Verdeyen, 1981] Verdeyen, J. T. *Laser electronics*, 1981.
- [Einstein, 1916] Einstein, A. (1916). Emission and absorption of radiation in quantum theory. *Emission and absorption of radiation*, Doc. 34, 212-216.
- [Einstein, 1917] Einstein, A. (1917). The quantum theory of radiation. *Physikalische Zeitschrift* 18, 121.
- [Ladenburg, 1933] Ladenburg, R. (1933). Dispersion in electrically excited gases. *Reviews of Modern Physics*, 5(4), 243.
- [Bertolotti, 2015] Bertolotti, M. (2015). *Masers and lasers: an historical approach*. Crc Press.
- [Lamb, 1947] Lamb Jr, W. E., & Retherford, R. C. (1947). Fine structure of the hydrogen atom by a microwave method. *Physical Review*, 72(3), 241.
- [Kastler, 1950] Kastler, A. (1950). Some suggestions concerning the production and detection by optical means of inequalities in the populations of levels of spatial quantization in atoms. Application to the Stern and Gerlach and magnetic resonance experiments. *J. Phys. Radium*, 11(11).
- [Weber, 1953] Weber, J. (1953). Amplification of microwave radiation by substances not in thermal equilibrium. *Transactions of the IRE Professional Group on Electron Devices*, (3), 1-4.

- [Gordon, 1954] Gordon, J. P., Zeiger, H. J., & Townes, C. H. (1954). Molecular microwave oscillator and new hyperfine structure in the microwave spectrum of N H 3. *Physical Review*, 95(1), 282.
- [Basov, 1954] Basov NG, Prokhorov AND (1954) 3-level gas oscillator. *Zh Eksp Teor Fiz (JETP)* 27:431.
- [Basov, 1955] Basov, N. G., & Prokhorov, A. M. (1955). About possible methods for obtaining active molecules for a molecular oscillator. *Начало лазерной эры в СССР*, 28.
- [Dicke, 1954] Dicke, R. H. (1954). Coherence in spontaneous radiation processes. *Physical review*, 93(1), 99.
- [Gordon, 1955] Gordon, J. P., Zeiger, H. J., & Townes, C. H. (1955). The maser—new type of microwave amplifier, frequency standard, and spectrometer. *Physical Review*, 99(4), 1264.
- [Bloembergen, 1956] Bloembergen, N. (1956). Proposal for a new type solid state maser. *Physical review*, 104(2), 324.
- [Vaughan, 2017] Vaughan, M. (2017). *The Fabry-Perot interferometer: history, theory, practice and applications*. Routledge.
- [Hecht, 2010] Hecht, J. (2010). A short history of laser development. *Applied optics*, 49(25), F99-F122.
- [Schawlow, 1958] Schawlow, A. L., & Townes, C. H. (1958). Infrared and optical masers. *Physical Review*, 112(6), 1940.
- [Schawlow, 1960] Schawlow, A. L., & Townes, C. H. (1960). U.S. Patent No. 2,929,922. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
- [Maiman, 1960] Maiman, T. H. (1960). Stimulated optical radiation in ruby.
- [Schawlow, 1961] Schawlow, A. L., & Devlin, G. E. (1961). Simultaneous optical maser action in two ruby satellite lines. *Physical Review Letters*, 6(3), 96.
- [Wieder, 1961] Wieder, I., & Sarles, L. R. (1961). Stimulated optical emission from exchange-coupled ions of Cr⁺⁺⁺ in Al₂O₃. *Physical Review Letters*, 6(3), 95.
- [Maiman, 1961] Maiman, T. H., Hoskins, R. H., d'Haenens, I. J., Asawa, C. K., & Evtuhov, V. (1961). Stimulated optical emission in fluorescent solids. II. Spectroscopy and stimulated emission in ruby. *Physical Review*, 123(4), 1151.
- [Sorokin, 1960] Sorokin, P. P., & Stevenson, M. J. (1960). Stimulated infrared emission from trivalent uranium. *Physical Review Letters*, 5(12), 557.
- [Sorokin, 1961] Sorokin, P. P., & Stevenson, M. J. (1961). Solid-State Optical Maser Using Divalent Samarium in Calcium Fluoride [Letter to the Editor]. *IBM Journal of Research and Development*, 5(1), 56-58.

- [Javan, 1959] Javan, A. (1959). Possibility of production of negative temperature in gas discharges. *Physical Review Letters*, 3(2), 87.
- [Javan, 1961] Javan, A., Bennett Jr, W. R., & Herriott, D. R. (1961). Population inversion and continuous optical maser oscillation in a gas discharge containing a He-Ne mixture. *Physical Review Letters*, 6(3), 106.
- [Sanders, 1959] Sanders, J. H. (1959). Optical maser design. *Physical Review Letters*, 3(2), 86.
- [Hall, 1962] Hall, R. N., Fenner, G. E., Kingsley, J. D., Soltys, T. J., & Carlson, R. O. (1962). Coherent light emission from GaAs junctions. *Physical Review Letters*, 9(9), 366.
- [Fox, 1961] Fox, A. G., & Li, T. (1961). Resonant modes in a maser interferometer. *Bell System Technical Journal*, 40(2), 453-488.
- [Snitzer, 1961] Snitzer, E. (1961). Optical maser action of Nd⁺³ in a barium crown glass. *Physical Review Letters*, 7(12), 444.
- [Koester, 1964] Koester, C. J., & Snitzer, E. (1964). Amplification in a fiber laser. *Applied optics*, 3(10), 1182-1186.
- [Geusic, 1964] Geusic, J. E., Marcos, H. M., & Van Uitert, L. G. (1964). Laser oscillations in Nd-doped Yttrium aluminium, Yttrium gallium and Gadolinium garnet. *Appl Physics Lett*, 4, 182.
- [Patel, 1964] Patel, C. K. N. (1964). Continuous-wave laser action on vibrational-rotational transitions of CO₂. *Physical review*, 136(5A), A1187.
- [Patel, 1965] Patel, C. K. N., Tien, P. K., & McFee, J. H. (1965). CW high-power CO₂-N₂-He laser. *Applied Physics Letters*, 7(11), 290-292.
- [Bridges, 1964] Bridges, W. B. (1964). Laser oscillation in singly ionized argon in the visible spectrum. *Applied Physics Letters*, 4(7), 128-130.
- [Polanyi, 1961] Polanyi, J. C. (1961). Proposal for an infrared maser dependent on vibrational excitation. *The Journal of Chemical Physics*, 34(1), 347-348.
- [Kasper, 1965] Kasper, J. V., & Pimentel, G. C. (1965). HCl chemical laser. *Physical Review Letters*, 14(10), 352.
- [Silfvast, 1966] Silfvast, W. T., Fowles, G. R., & Hopkins, B. D. (1966). Laser action in singly ionized Ge, Sn, Pb, In, Cd and Zn. *Applied Physics Letters*, 8(12), 318-319.
- [Silfvast, 1968] Silfvast, W. T. (1968). Efficient CW laser oscillation at 4416 Å in Cd (II). *Applied Physics Letters*, 13(5), 169-171.
- [Sorokin, 1968] Sorokin, P. P., Lankard, J. R., Moruzzi, V. L., & Hammond, E. C. (1968). Flashlamp-pumped organic-dye lasers. *The Journal of Chemical Physics*, 48(10), 4726-4741.
- [Alferov, 1971] Alferov, Z. I., Andreev, V. M., Garbuzov, D. Z., Zhilyaev, Y. V., Morozov, E. P., Portnoi, E. L., & Trofim, V. G. (1971). Investigation of the influence

- of the AlAs-GaAs heterostructure parameters on the laser threshold current and the realization of continuous emission at room temperature. *Sov. Phys. Semicond*, 4(9), 1573-1575.
- [Madey, 1971] Madey, J. M. (1971). Stimulated emission of bremsstrahlung in a periodic magnetic field. *Journal of Applied Physics*, 42(5), 1906-1913.
- [Basov, 1970] Basov, N. G., Danilychev, V. A., Popov, Y. M., & Khodkevich, D. D. (1970). Laser operating in the vacuum region of the spectrum by excitation of liquid xenon with an electron beam. *JETP Letters*, 12(10), 329-331.
- [Ewing, 1975] Ewing, J. J., & Brau, C. A. (1975). Laser action on the $2\Sigma^+ 1/2 \rightarrow 2\Sigma^+ 1/2$ bands of KrF and XeCl. *Applied Physics Letters*, 27(6), 350-352.
- [Jacoby, 1981] Jacoby, D., Pert, G. J., Ramsden, S. A., Shorrocks, L. D., & Tallents, G. J. (1981). Observation of gain in a possible extreme ultraviolet lasing system. *Optics Communications*, 37(3), 193-196.
- [Matthews, 1985] Matthews, D. L., Hagelstein, P. L., Rosen, M. D., Eckart, M. J., Ceglio, N. M., Hazi, A. U., & Campbell, E. M. (1985). Demonstration of a soft x-ray amplifier. *Physical review letters*, 54(2), 110.
- [Strategies Unlimited, 2019] Laser revenues and 2019 forecast. Esteka: <https://www.strategies-u.com/> (azken sarrera: 2019/6/11).
- [Rofin, 2019] <https://www.rofin.com> (azken sarrera: 2019/7/7).
- [Trumpf, 2018] Laser Beam Sources. The Power of Choice. Esteka: <https://www.trumpf.com> (azken sarrera: 2019/6/11).
- [Steen, 2010] Steen, W. M., & Mazumder, J. (2010). *Laser Material Processing*. Springer Science & Business Media.
- [Spalding, 1971] Spalding, I. J. (1971). Laser systems development. *Physics Bulletin*, 22(7), 401.
- [Anderson, 1965] Anderson, J. E. (1965). Theory and application of pulsed laser welding. *Weld. J.*, 44, 1018-1026.
- [Duley, 1976] Duley, W. W. (1976). *CO₂ lasers: theory and applications*. Academic Press, New York.
- [Swift-Hook, 1973] Swift-Hook, D. T., & Gick, A. E. F. (1973). Penetration welding with lasers. *Welding journal*, 52(11), 492s-499s.
- [Klemens, 1976] Klemens, P. G. (1976). Heat balance and flow conditions for electron beam and laser welding. *Journal of Applied physics*, 47(5), 2165-2174.
- [Jorgensen, 1980] Jorgensen, M. (1980). Increasing energy absorption in laser welding. *Metal Construction*, 12(2), 88.
- [Seaman, 1977] Seaman, F. D. (1977). Role of shielding gas in high power CO₂ CW laser welding. SME technical paper no MR77-982. Society of Manufacturing Engineering, Dearborn.

- [Willgoss, 1979] Willgoss, R. A., Megaw, J. H. P. C., & Clark, J. N. (1979). Laser welding of steels for power plant. *Optics & Laser Technology*, 11(2), 73-82.
- [Engel, 1976] Engel, S. L. (1976). Kilowatt welding with a laser. *Laser Focus*, 12, 44-47.
- [Liu, 2017] Liu, S., Mi, G., Yan, F., Wang, C., & Jiang, P. (2017). Correlation of high power laser welding parameters with real weld geometry and microstructure. *Optics & Laser Technology*, 94, 59-67.
- [Mazumder, 1983] Mazumder, J. (1983). Laser welding. In *Materials Processing: Theory and Practices* (1st ed.; Bass, M., Vol. 3, 113-200). Elsevier.
- [Dowden, 2001] Dowden, J. M. (2001). *The mathematics of thermal modelling: an introduction to the theory of laser material processing*. Chapman and Hall/CRC.
- [Ducharme, 1994] Ducharme, R., Williams, K., Kapadia, P., Dowden, J., Steen, B., & Glowacki, M. (1994). The laser welding of thin metal sheets: an integrated keyhole and weld pool model with supporting experiments. *Journal of physics D: Applied physics*, 27(8), 1619.
- [He, 2018] He, L., Zhao, H., & Niu, W. (2018). Understanding the effect of oxygen on weld pool and keyhole in laser beam welding. *Journal of Laser Applications*, 30(1), 012003.
- [Schlessinger, 1979] Schlessinger, L. E. O. N. A. R. D., & Wright, J. (1979). Inverse-bremsstrahlung absorption rate in an intense laser field. *Physical Review A*, 20(5), 1934.
- [Kapadia, 1991] Kapadia, P., Ducharme, R., & Dowden, J. (1991). The theory of radiative transfer in the plasma of the keyhole in penetration laser welding. In *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics* (Vol. 2, 53-63). LIA.
- [Cho, 2006] Cho, J. H., & Na, S. J. (2006). Implementation of real-time multiple reflection and Fresnel absorption of laser beam in keyhole. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 39(24), 5372.
- [Walter, 2015] Walter, D. (2015). New laser welding process for excellent bonds. Manz. Esteka: www.manz.com.
- [Zain-ul-Abdein, 2009] Zain-ul-Abdein, M., Nelias, D., Jullien, J. F., & Deloison, D. (2009). Prediction of laser beam welding-induced distortions and residual stresses by numerical simulation for aeronautic application. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(6), 2907-2917.
- [Rolls Royce, 1986] Rolls Royce (1986). *The Jet Engine*. ISBN 0902121 235.
- [Spittle, 2003] Spittle, P. (2003). Gas turbine technology. *Physics education*, 38(6), 504.
- [Venkatesan, 2016] Venkatesan, K., Ramanujam, R., & Kuppan, P. (2016). Parametric modeling and optimization of laser scanning parameters during laser

- assisted machining of Inconel 718. *Optics & Laser Technology*, 78, 10-18.
- [Mills, 2002] Mills, K.C. (2002). Recommended values of thermophysical properties for selected commercial alloys (1st ed.; Woodhead Publishing, 181-190).
- [Fu, 2010] Fu, S., Dong, J., Zhang, M., Wang, N., & Xie, X. (2010). Research on Inconel 718 Type Alloys with Improvement of Temperature Capability. *Superalloy 718 and Derivatives*, 281-296.
- [Anderson, 2006] Anderson, M., Patwa, R., & Shin, Y. C. (2006). Laser-assisted machining of Inconel 718 with an economic analysis. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 46(14), 1879-1891.
- [Radavich, 1997] Radavich, J. F. (1997). Electron metallography of alloy 718. *Superalloys*, 718, 625-706.
- [Knock, 2010] Knock, N. O. (2010). Characterization of inconel 718: using the gleeble and vareststraint testing methods to determine the weldability of Inconel 718.
- [Slama, 1997] Slama, C., & Cizeron, G. (1997). Étude du comportement structural de l'alliage NC 19 Fe Nb (Inconel 718). *Journal de Physique III*, 7(3), 665-688.
- [Gustafsson, 2010] Gustafsson, D. (2010). Constitutive and fatigue crack propagation behaviour of Inconel 718 (Doctoral dissertation, Linköpings universitet, Electronisk Press).
- [Anderson, 2017] Anderson, M., Thielin, A. L., Bridier, F., Bocher, P., & Savoie, J. (2017). δ Phase precipitation in Inconel 718 and associated mechanical properties. *Materials Science and Engineering: A*, 679, 48-55.
- [Azadian, 2004] Azadian, S., Wei, L. Y., & Warren, R. (2004). Delta phase precipitation in Inconel 718. *Materials characterization*, 53(1), 7-16.
- [Subramanian, 1996] Subramanian, P. R., Mendiratta, M. G., & Dimiduk, D. M. (1996). The development of Nb-based advanced intermetallic alloys for structural applications. *Jom*, 48(1), 33-38.
- [Muralidharan, 1996] Muralidharan, B. G., Shankar, V., & Gill, T. P. S. (1996). Weldability of Inconel 718-A review (No. IGC--175). *Indira Gandhi Centre for Atomic Research*.
- [Qu, 2012] Qu, F. S., Liu, X. G., Xing, F., & Zhang, K. F. (2012). High temperature tensile properties of laser butt-welded plate of Inconel 718 superalloy with ultra-fine grains. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 22(10), 2379-2388.
- [Davis, 2000] Davis, J. R. (Ed.) (2000). *Nickel, cobalt, and their alloys*. ASM international.

- [Ram, 2005] Ram, G. J., Reddy, A. V., Rao, K. P., Reddy, G. M., & Sundar, J. S. (2005). Microstructure and tensile properties of Inconel 718 pulsed Nd-YAG laser welds. *Journal of Materials Processing Technology*, 167(1), 73-82.
- [Voller, 1987] Voller, V. R., & Prakash, C. (1987). A fixed grid numerical modelling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 30(8), 1709-1719.
- [Patel, 2001] Patel, A. D., & Murty, Y. V. (2001). Effect of cooling rate on microstructural development in alloy 718. *Superalloys*, 718, 625-706.
- [Antonsson, 2005] Antonsson, T., & Fredriksson, H. (2005). The effect of cooling rate on the solidification of INCONEL 718. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 36(1), 85-96.
- [Kong, 2011] Kong, F., Ma, J., & Kovacevic, R. (2011). Numerical and experimental study of thermally induced residual stress in the hybrid laser-GMA welding process. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(6), 1102-1111.
- [Dal, 2016] Dal, M., & Fabbro, R. (2016). An overview of the state of art in laser welding simulation. *Optics & Laser Technology*, 78, 2-14.
- [D'Ostuni, 2017] D'Ostuni, S., Leo, P., & Casalino, G. (2017). FEM simulation of dissimilar aluminum titanium fiber laser welding using 2D and 3D Gaussian heat sources. *Metals*, 7(8), 307.
- [Hernando, 2018] Hernando, I., Arrizubieta, J., Lamikiz, A., & Ukar, E. (2018). Numerical model for predicting bead geometry and microstructure in laser beam welding of Inconel 718 sheets. *Metals*, 8(7), 536.
- [Carslaw, 1959] Carslaw, H. S., & Jaeger, J. C. (1959). *Conduction of heat in solids*. Clarendon Press.
- [Tsirkas, 2003] Tsirkas, S. A., Papanikos, P., & Kermanidis, T. (2003). Numerical simulation of the laser welding process in butt-joint specimens. *Journal of materials processing technology*, 134(1), 59-69.
- [Kazemi, 2009] Kazemi, K., & Goldak, J. A. (2009). Numerical simulation of laser full penetration welding. *Computational Materials Science*, 44(3), 841-849.
- [Goldak, 1984] Goldak, J., Chakravarti, A., & Bibby, M. (1984). A new finite element model for welding heat sources. *Metallurgical transactions B*, 15(2), 299-305.
- [Kubiak, 2016] Kubiak, M., Piekarska, W., Saternus, Z., & Domański, T. (2016). Numerical prediction of fusion zone and heat affected zone in hybrid Yb: YAG laser+ GMAW welding process with experimental verification. *Procedia Engineering*, 136, 88-94.

- [Bonollo, 1993] Bonollo, F., Tiziani, A., & Zamban, A. (1993). Model for CO₂ laser welding of stainless steel, titanium, and nickel: parametric study. *Materials science and technology*, 9(12), 1137-1144.
- [Kaplan, 1994] Kaplan, A. (1994). A model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 27(9), 1805.
- [Zhao, 2011] Zhao, H., Niu, W., Zhang, B., Lei, Y., Kodama, M., & Ishide, T. (2011). Modelling of keyhole dynamics and porosity formation considering the adaptive keyhole shape and three-phase coupling during deep-penetration laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 44(48), 485302.
- [Zhang, 2014] Zhang, L. J., Zhang, J. X., Gumenyuk, A., Rethmeier, M., & Na, S. J. (2014). Numerical simulation of full penetration laser welding of thick steel plate with high power high brightness laser. *Journal of materials processing technology*, 214(8), 1710-1720.
- [Brown, 2010] Brown, M. S., & Arnold, C. B. (2010). *Laser precision microfabrication*. Springer Ser. Mater. Sci, 135(0933-03391), 120.
- [Bornefeld, 1933] Bornefeld, H. (1933). Temperature measurement in fusion welding. *Technische Zentralblatt fur Praktische Metallberbeitung*, 43, 14-18.
- [Rosenthal, 1935] Rosenthal, D. (1935). Theoretical Study of the Heat Cycle During Arc Welding. In *2eme Congres National des Sciences, Brussels* (p. 1277).
- [Boulton, 1936] Boulton, N., & Martin, H. L. (1936). Residual stresses in arc-welded plates. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 133(1), 295-347.
- [Spraragen, 1937] Spraragen, W., & Claussen, G. E. (1937). Temperature distribution during welding. A review of the literature to January 1, 1937. *Welding J. Res. Sup*, 16, 4-10.
- [Bruce, 1939] Bruce, W. A. (1939). The thermal distribution and temperature gradient in the arc welding of oil well casing. *Journal of Applied Physics*, 10(8), 578-584.
- [Mahla, 1941] Mahla, E. M. (1941). Heat flow in arc welding (Doctoral dissertation, Lehigh University).
- [Rosenthal, 1941] Rosenthal, D. (1941). Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting. *Welding journal*, 20, 220-234.
- [Rosenthal, 1946] Rosenthal, D. (1946). The theory of moving sources of heat and its application of metal treatments. *Transactions of ASME*, 68, 849-866.
- [Pavelic, 1969] Pavelic, V. (1969). Experimental and computed temperature histories in gas tungsten arc welding of thin plates. *Welding Journal Research Supplement*, 48, 296-305.

- [Friedman, 1975] Friedman, E. (1975). Thermomechanical analysis of the welding process using the finite element method. *Journal of Pressure Vessel Technology*, 97(3), 206-213.
- [Krutz, 1976] Krutz, G. W., & Segerlind, L. J. (1976). *Finite Element Analysis of Welded Structures* (No. 760694). SAE Technical Paper.
- [Arata, 1974] Arata, Y., & Miyamoto, I. (1974). Some Fundamental Properties of High Power CO₂ Laser Beam as a Heat Source. *Transactions of JWRI*, 3(1), 1-20.
- [Mazumder, 1980] Mazumder, J., & Steen, W. M. (1980). Heat transfer model for CW laser material processing. *Journal of Applied Physics*, 51(2), 941-947.
- [Lankalapalli, 1996] Lankalapalli, K. N., Tu, J. F., & Gartner, M. (1996). A model for estimating penetration depth of laser welding processes. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 29(7), 1831.
- [Sudnik, 2000] Sudnik, W., Radaj, D., Breitschwerdt, S., & Erofeev, W. (2000). Numerical simulation of weld pool geometry in laser beam welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 33(6), 662.
- [Lee, 2002] Lee, J. Y., Ko, S. H., Farson, D. F., & Yoo, C. D. (2002). Mechanism of keyhole formation and stability in stationary laser welding. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 35(13), 1570.
- [Jin, 2012] Jin, X., Cheng, Y., Zeng, L., Zou, Y., & Zhang, H. (2012). Multiple reflections and Fresnel absorption of Gaussian laser beam in an actual 3D keyhole during deep-penetration laser welding. *International Journal of Optics*, 2012.
- [Zhang, 2004] Zhang, L., Reutzler, E. W., & Michaleris, P. (2004). Finite element modeling discretization requirements for the laser forming process. *International journal of mechanical sciences*, 46(4), 623-637.
- [Gery, 2005] Gery, D., Long, H., & Maropoulos, P. (2005). Effects of welding speed, energy input and heat source distribution on temperature variations in butt joint welding. *Journal of materials processing technology*, 167(2-3), 393-401.
- [Spina, 2007] Spina, R., Tricarico, L., Basile, G., & Sibillano, T. (2007). Thermo-mechanical modeling of laser welding of AA5083 sheets. *Journal of Materials Processing Technology*, 191(1-3), 215-219.
- [Mishra, 2011] Mishra, S., & Yadava, V. (2013). Modeling and optimization of laser beam percussion drilling of nickel-based superalloy sheet using Nd:YAG laser. *Optics and Lasers in Engineering*, 51(6), 681-695.
- [Xia, 2014] Xia, P., Yan, F., Kong, F., Wang, C., Liu, J., Hu, X., & Pang, S. (2014). Prediction of weld shape for fiber laser keyhole welding based on finite element analysis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 75(1-4), 363-372.

- [Chukkan, 2015] Chukkan, J. R., Vasudevan, M., Muthukumaran, S., Kumar, R. R., & Chandrasekhar, N. (2015). Simulation of laser butt welding of AISI 316L stainless steel sheet using various heat sources and experimental validation. *Journal of Materials Processing Technology*, 219, 48-59.
- [Jiang, 2016] Jiang, P., Wang, C., Zhou, Q., Shao, X., Shu, L., & Li, X. (2016). Optimization of laser welding process parameters of stainless steel 316L using FEM, Kriging and NSGA-II. *Advances in Engineering Software*, 99, 147-160.
- [McCord, 2016] McCord, D., Crepeau, J., Siahpush, A., & Brogin, J. A. F. (2016). Analytical solutions to the Stefan problem with internal heat generation. *Applied Thermal Engineering*, 103, 443-451.
- [Lange, 2018] Lange, F., Artinov, A., Bachmann, M., Rethmeier, M., & Hilgenberg, K. (2018). Numerical simulation of the weld pool dynamics during pulsed laser welding using adapted heat source models. *Procedia CIRP*, 74, 679-682.
- [Coelho, 2018] Coelho, B. N., Lima, M. S. F. D., Carvalho, S. M. D., & Costa, A. R. D. (2018). A Comparative Study of the Heat Input During Laser Welding of Aeronautical Aluminum Alloy AA6013-T4. *Journal of Aerospace Technology and Management*, 10.
- [Nunes, 1983] Nunes, A. C. (1983). An extended Rosenthal weld model. *Welding journal*, 62(6), 165s-170s.
- [Mills, 1998] Mills, K. C., Keene, B. J., Brooks, R. F., & Shirali, A. (1998). Marangoni effects in welding. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 356(1739), 911-925.
- [Haynes, 2015] Haynes International. Material Sales order 810002010-0; Customer reference 20PPO009192; Report No. 20151117074.