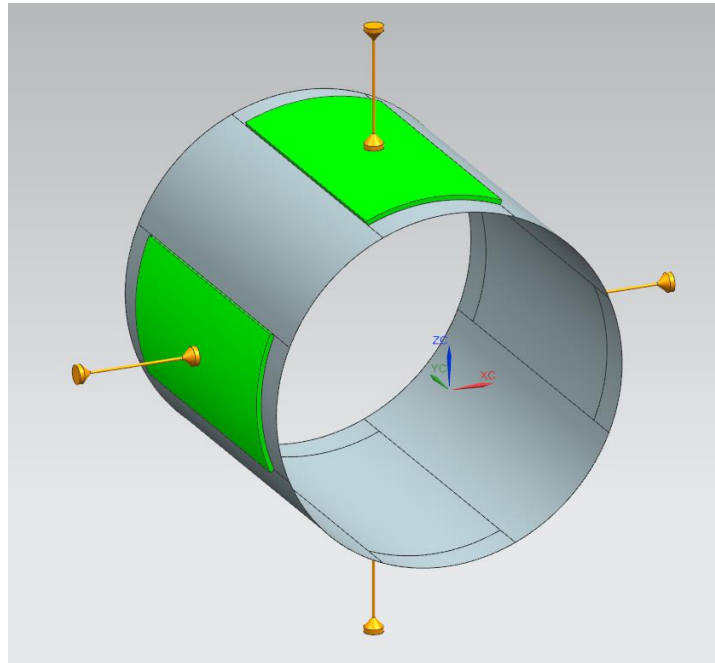


**MASTER AMAIERAKO LANA**

**Kojinete presurizatuetan  
oinarritutako makina erramintako  
zehaztasuneko giden garapena**



**Estebe Ucin Gurrutxaga**  
**Industria Ingeniaritza Unibertsitate Masterra**  
**Francisco Javier Campa-k eta Harkaitz Urreta-k**  
**zuzendua**

2015-2016 Kurtsoa

**INGENIARITZA MEKANIKOKO SAILA**

# AURKIBIDEA

AURKIBIDEA .....	1
1. LABURPENA.....	4
2. Taulen, Irudien, eta Akronimoen zerrenda.....	5
2.1. Taulak .....	5
2.2. Irudiak.....	5
2.3. Akronimoak .....	7
3. TERMINOLOGIA.....	8
3.1. GLOSARIOA.....	8
3.2. SINBOLOGIA .....	9
4. SARRERA.....	11
5. TESTUINGURUA.....	12
5.1. KOJINETE MOTAK .....	12
5.2. KOJINETE HIDROSTATIKOAK.....	15
5.2.1. EUSKARRI BAKARRA.....	15
5.2.2. AURREZ AURREKO EUSKARRIAK .....	16
5.2.3. BIRAKETA KOJINETEA .....	17
5.2.4. BULTZADA KOJINETEAK .....	17
5.2.5. KOJINETE KONIKOAK .....	19
5.3. KOJINETE HIDRODINAMIKOAK.....	20
5.3.1. EUSKARRI LAUAK ETA BULTZADA KOJINETEAK .....	20
5.3.2. BIRAKETA KOJINETEA .....	21
3.3.2.1 BIRAKETA KOJINETE LAUAK.....	22
3.3.2.2 ARTEKA AXIALDUNAK.....	22
3.3.2.3 ELIPTIKOAK .....	22
3.3.2.4 LOBULU ANIZKOIZDUN KOJINETEA .....	23
3.3.2.5 INKLINAZIO EUSKARRIAK DITUEN BIRAKETA KOJINETEA .....	25
5.4. KOJINETE HIBRIDOAK .....	25
5.5. KONPENTSATZAILEAK ETA EMARI KONTROLA.....	26

5.5.1. EMARI KONSTANTEA .....	26
5.5.2. PRESIO KONSTANTEA .....	26
5.5.2.1 KONPENTSATZAILE FINKOAK.....	27
3.4.2.2 RESTRIKTORE ALDAGARRIAK.....	28
5.6. OINARRIZKO EKUAZIOAK.....	32
5.6.1. REYNOLDS-EN EKUAZIOA .....	32
5.6.2. BI PLAKA PARALELOEN ARTEKO JARIAKINA .....	37
6. GAIAREN EGOERA .....	40
6.1. LEHEN IKASKETAK.....	40
6.2. AZKEN URTEETAN.....	41
6.2.1. JDK-ren INGURUKO IKASKETAK .....	41
6.2.2. JDK-FSI IKASKETAK .....	44
7. HELBURUAK ETA HELMENA .....	45
8. PROIEKTUAREN ONURAK.....	46
8.1. ONURA TEKNIKOAK .....	46
8.2. ONURA EKONOMIKOAK .....	46
9. ALTERNATIBEN ANALISIA .....	47
10. ARRISKUEN ANALISIA.....	48
11. METODOLOGIA .....	49
11.1. KALKULU NUMERIKOA MATLAB ERABILIZ .....	49
11.1.1. KODIGOAREN AZALPENA.....	49
11.1.2. PDE TOOL.....	53
11.2. KALKULU NUMERIKOA NX-FLOW ERABILIZ.....	56
11.2.1. SARETZE.....	56
11.2.2. ELEMENTU KOPURUA LODIERAN .....	58
11.2.3. ELEMENTU TAMAINA GAINAZALEAN .....	60
11.2.4. BIRAKETA KOJINETE LAUAREN SAREA ETA SIMULAZIOA .....	62
11.2.5. BARRUNBEKO SAREA ETA TARTEAREKIN LOTURA .....	70
9.2.5.1 BARRUNBE ETA TARTEAREN ARTEKO LOTURA .....	70
9.2.5.2 BARRUNBEAREN SAREA .....	72

---

11.2.6. KONPENTSATZAILEAK .....	73
9.2.7.1 KAPILARRA.....	74
9.2.7.2 ZULOA.....	75
11.2.7. MODELO OSOAREN PLANTEAMENDUA .....	77
12. ZURRUNTASUNAREN KALKULUA .....	78
13. ENTSEGU BANKOAK .....	82
14. AURREKONTUA .....	83
15. GANTT DIAGRAMA.....	84
16. ONDORIOAK ETA ETORKIZUNEKO LANAK.....	85
17. BIBLIOGRAFIA.....	87

---

# 1. LABURPENA

Ordenagailuak eta softwarea eboluzionatu ahala gero eta ingeniarietza arazo gehiagori eman zaie soluzioa programa konputazionalak erabiliz. Proiektu honetan, ME-tan erabiltzen diren kojinetek hidrostatikoen, hidrodinamikoen eta hibridoek kalkulua numerikoa egin da, bai MATLAB erabiliz eta baita NX-FLOW erabiliz ere. Helburua erraminta bakoitzaren abantailak eta limitazioak ezagutzeko da.

Batez ere biraketa kojinetek hibridotan zentratu da beraien kalkulurako konplexutasuna dela eta erraminta konputazionalak erabiltzea justifikatuta geratzen delako. Kalkuluak egiteko erabiliko diren bi erramintek arteko alderaketa egiteko zurruntasunaren kalkulua egin da, batetik ardatzari abiadurarik sartu gabe (efektu hidrostatikoa) eta bestetik abiadurarekin (efektu hidrodinamikoa).

Mientras los ordenadores y los softwares evolucionan, cada vez se le ha podido dar solución a más problemas de ingeniería. En este proyecto se ha hecho el cálculo numérico de cojinetes hidrostáticos, hidrodinámicos e híbridos utilizando tanto MATLAB como NX-FLOW. El objetivo es conocer las ventajas y las limitaciones de cada programa.

Para hacer el cálculo, sobre todo se ha centrado en cojinetes híbridos de giro porque son los más difíciles de diseñar y calcular por lo que queda justificado el uso de programas computacionales. Con el objetivo de comparar los dos programas, se ha hecho el cálculo de la rigidez estática (sin darle velocidad de giro al eje) y la rigidez dinámica (dándole velocidad de giro al eje).

As computers and software evolve, more engineering issues are solved using computational programs. In this Project hydrostatic, hydrodynamic and hybrid bearings numerical operation has been done using MATLAB and NX-FLOW. The goal is to analyze those programs to know the advantages and limitation of each one.

This work is focused in hybrid journal bearings because they are the most difficult bearings to design and calculate so the computational programs are justified. In order to compare the programs previously mentioned, the static stiffness has been computed (without velocity in the axis) and also the dynamic stiffness has been computed (with velocity in the axis).

## 2. Taulen, Irudien, eta Akronimoen zerrenda

### 2.1. Taulak

1. Taula. Arriskuak .....	48
2. Taula: Zurruntasunaren kalkulurako datuak .....	78
3. Taula: Zurruntasunak.....	80

### 2.2. Irudiak

1 Irudia: Kojinetearen atalak .....	9
2. Irudia: Sinbologia .....	10
3. Irudia: Kojinete hibridoa .....	11
4 Irudia :Kojinete hidrostatikoen eta hidrodinamikoen presio distribuzioa[1].....	14
5. Irudia: Euskarri bakarra .....	15
6. Irudia: Azalera birtuala [2] .....	16
7. Irudia: Aurrez aurreko euskarria.....	16
8. Irudia: Biraketa kojinete hidrostatika[2] .....	17
9. Irudia: Bultzada kojinete hidrostatika[2] .....	18
10. Irudia: Biraketako kojinete eta bultzada kojinete konbinazioa.....	19
11. Irudia: Kojinete konikoa.....	20
12. Irudia: Euskarri hidrodinamikoa .....	21
13. Irudia: Inklinazio euskarria.....	21
14. Irudia: Bi arteka axialdun biraketa kojinetea .....	22
15. Irudia: Kojinete eliptikoa .....	23
16. Irudia: 3 Lobuludun kojinetea [3] .....	24
17. Irudia: Inklinazio euskarridun biraketako kojinetea[3] .....	25
18. Irudia: Zilindroz kontrolatutako konpentsatzailea[4].....	28
19. Irudia: Emari konstanteko balbula[4] .....	29
20. Irudia: Diafragmaz kontrolatutako balbula[4] .....	30
21. Irudia: Rowe-ren balbula[1].....	30
22. Irudia: Zurruntasun infinituko balbula[4] .....	31

23. Irudia: Konpentsatzaile ezberdinen zurruntasuna[4]: 1 emari konstantea, 2 capillary, 3 orifice,4 emari konstanteko balbula, 5 diafragmaz kontrolatutako balbula, 6 zurruntasun infinitua.....	31
24. Irudia: Reynolds-en hipotesiak[4].....	33
25. Irudia: Sommerfeld .....	36
26. Irudia: Gumbel .....	37
27. Irudia: Reynolds .....	37
28. Irudia: Bi plaka paraleloen arteko jariakina[4] .....	38
29. Irudia: Reynolds eta CFD [10] .....	42
30. Irudia: Biraketa kojineten hidrostatiokoaren presio distribuzioa .....	43
31. Irudia: Biraketa kojineten hibridoaren presioa distribuzioa.....	43
32. Irudia: Kojinete hibridoa .....	45
33. Irudia: Erresistentzia hidraulikoen metodoa[4] .....	50
34. Irudia: Diferentzia finituetako sarea.....	51
35. Irudia: MATLAB presio hidrostatiokoaren kalkulurako ingurune baldintzak .....	53
36: Irudia: PDE-TOOL kojineten laua .....	54
37. Irudia: PDE-TOOL biraketa kojineten .....	55
38. Irudia: Biraketa kojineten hibridoa zatikatuta.....	56
39. Irudia: Ezkerrean "High resolution polygon body" aktibatu gabe, eskubian aktibatuta .....	57
40. Irudia: Kojinete laua (NX).....	58
41. Irudia: Abiadura distribuzioa tartearen lodieran.....	59
42: Irudia:Tartearen lodierako abiadura, nodo kopuruekiko.....	59
43. Irudia: Tartearen lodierako abiduraren errore erlatiboa, nodo kopuruarekiko .....	60
44. Irudia: Euskarri baten presio distribuzioa (NX).....	61
45. Irudia: Elementu tamaina ezberdinentzat presio distribuzioa, nodo kopuruarekiko .....	61
46. Irudia: Biraketa kojineten lau batentzat ingurune baldintzak (NX).....	62
47. Irudia: Biraketa kojineten lauaren presio distribuzioa (NX) .....	63
48. Irudia: Biraketa kojineten lauaren erdiko sekzioko distribuzioa .....	63
49. Irudia: Presio distribuzioa Gumble aplikatuta .....	64
50: Irudia: Erdiko sekzioko presioa, Gumble aplikatuz .....	65
51. Irudia: Kojineten eragiten duen presioa .....	65
52. Irudia: Presio maximoen bilakaera, iterazioekiko .....	66
53. Irudia: Presio maximoak, tarte erradialarekiko .....	67
54. Irudia: Indar maximoa, tarte erradialarekiko .....	68
55. Irudia: Eszentrikotasun altuetan 2D sarea .....	69
56. Irudia: Bi modeloen presio maximoak, iterazioekiko .....	69
57. Irudia: Ezkerrean "Mesh Mating"-a eginda, eskubian egin gabe .....	70

---

58. Irudia: "Mesh Mating" jartzearen diferentzia .....	71
59. Irudia: " Mesh mating" gabe konbergentzia .....	71
60. Irudia: Barrunbearen goiko gainazaleko sarea .....	72
61. Irudia: Barrunbearen sarearen alderaketa, ezkerrean hexaedroekin eta eskubian tetraedroekin .....	73
62. Irudia: Gorria hexadrikoekin, urdina tetraedrikoekin .....	73
63. Irudia: Kapilarraren modeloa .....	74
64. Irudia: Kapilarrekin presio distribuzioa .....	74
65. Irudia: Kapilarrarekin kojinetearen erdiko sekzioko presio distribuzioa .....	75
66. Irudia: Zuloaren modeloa .....	75
67. Irudia: Zuloak sartuta presio distribuzioa .....	76
68. Irudia: Zuloekin kojinetearen erdiko sekzioko distribuzioa .....	76
69. Irudia: Karga hidrostatikoa $C=0.035\text{mm}$ .....	79
70. Irudia: Karga hidrostatikoa $C=0.07\text{mm}$ .....	80
71. Irudia: Karga hidrodinamikoa, $C=0.035\text{mm}$ .....	81
72. Irudia: Entsegu bankoa .....	82

## 2.3. Akronimoak

JDK: Jariakinen Dinamika Konputazionala

ME: Makina Erraminta

JEI: Jariakin Estructura Iterazioa

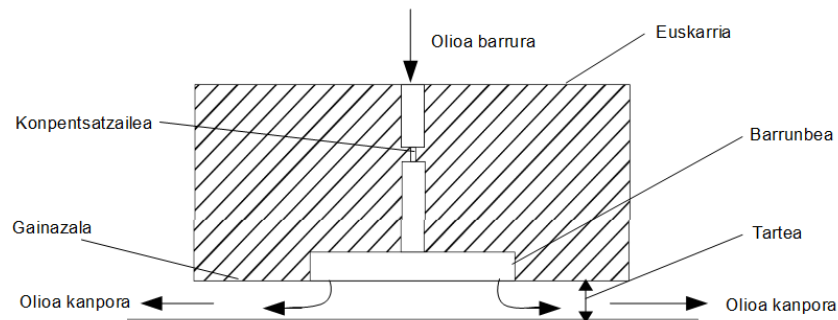


## 3. TERMINOLOGIA

Atal honetan, memoria ondo ulertu ahal izateko beharrezkoak diren deskribapenak eta sinbologia definituko dira.

### 3.1. GLOSARIOA

- Kojinetea: pieza mugikor eta pieza finko baten arteko mugimendu libre ahalbidetzen duten elementu mekanikoak dira. Bi piezen artean ematen den kontaktuaren arabera kojinete ezberdinak existitzen dira. Kasu honetan aztertuko diren kojineteak, hidrostatikoa, hidrodinamikoak eta hibridoak dira, hau da, bi piezen gainazalen artean jariakin bat dutenak.
- Kojinete hidrostatikoa: Jariakina presioarekin sartzen da kojinetara eta presio horrek eusten ditu kojinetean gain egindako indarrak.
- Kojinete hidrodinamikoak: Kojinetearen eta eusten duen elementuaren arteko abiadura erlatiboaren ondorioz sortzen den presioak eusten ditu kargak.
- Kojinete hibridoak: Aurreko bi kojineten tarteko kojineteak, abiadurarik gabe ala abiadura oso txikitik efektu hidrostatikoa gailentzen da eta abiadura handitan efektu hidrodinamikoak.
- Euskarri: Kojinete batean karga eusten duen zatia,
- Barrunbea: Jariakin presurizatuaz beteta dagoen kojinetearen zatia. Barrunbea inguratzen gainazala dago.
- Gainazala: Gainazalaren barruko ertzean presioa barrunbeko presioa da eta kanpoko ertzean berriz, presio atmosferikoa. Kojinete batek barrunbe bat baino gehiago badu, bi barrunbeen artean gainazala egoten da.
- Tarte: Kojinetearen gainazalaren eta kojinetearen kontrako gainazalaren arteko distantzia.
- Konpentsatzailea: Erresistentzia hidrauliko bat da presiopeko jariakinaren sorrera eta barrunbearen artean kokatzen dena, kojineteari zurruntasuna emateko.
- Biraketa kojinetea: Eratzun moduko kojinete bat, hidrostatikoa, hidrodinamikoak ala hibridoak izan daiteke barrunbeen arabera.

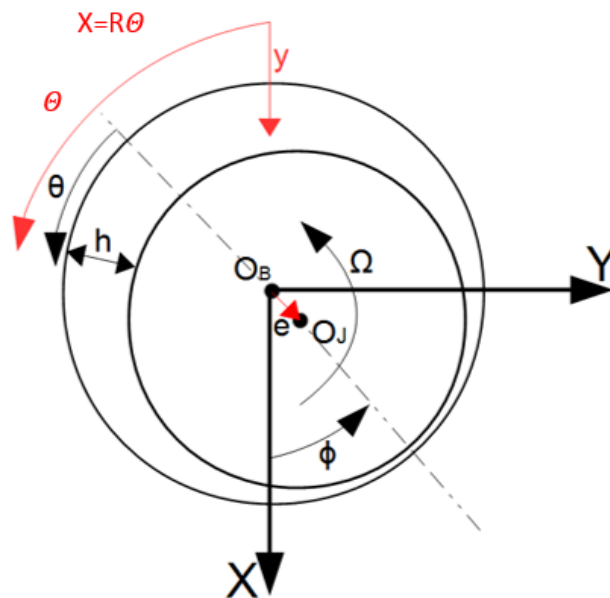


1 Irudia: Kojinetearen atalak

## 3.2. SINBOLOGIA

B	Euskarriaren zabalera
C	Tarte erradiala
D	Diametroa
$d_R$	Konpentsatzailearen diametroa
e	eszentrikotasuna
h	Tartea
l	Konpentsatzailearen luzera
P	Presioa
$P_a$	Presio atmosferikoa
$P_s$	Ponpan sortzen den presioa
$P_r$	Barrunbeko presioa
Q	Emaria
R	Erradioa
$R_K$	Konpentsatzailearen erresistentzia hidraulikoa
U	Abiadura tangenziala
V	Abiadura erradiala
W	Karga
X	Z eta Yri perpendikularra den ardatza
Y	X eta Zri perpendikularra den ardatza
Z	X eta Yri perpendikularra den ardatza

$\varepsilon = \frac{e}{C}$	Eszentrikotasun erlatiboa
$\theta = x/R, y, z$	Kojinetearen erdiko planoko koordenatu sistema
$\phi$	Posizio angelua
$\theta = \Theta - \phi$	$\Theta$ ren ordeaz erabiltzen da koordenatu sisteman, jariakinaren kaparen lodiera maximoa den unean hasten da.
$\rho$	Jariakinaren dentsitatea
$\mu$	Jariakinaren biskositatea
$\Omega$	Biraketa kojinetearen abiadura angeluarra



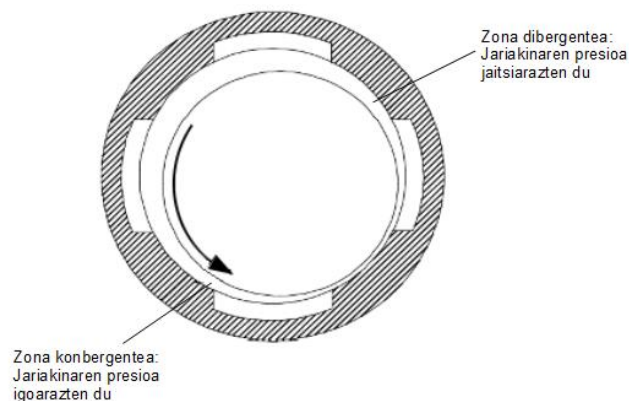
2. Irudia: Sinbologia

## 4. SARRERA

Kojineteak oso garrantzitsuak dira ME-n, bera barne hartzen duen mekanismoari zehaztasuna mugimenduan, zurruntasuna, baretasuna, marruskadura eta karga kapazitatea ahalbidetzen dizkiolako. Beraz beraion diseinu eta kalkulu egokiak egitea ezinbestekoa da makinaren funtzionamendu ona bermatzeko.

Ondoren ikusiko den bezala, kojinete mota asko daude eta proiektu honetan kojinete hidrostático, hidrodinámico eta batez ere hibridoetan zentratu da. Kojinete hibridoetan, abiadura txikitzen efektu hidrostático nagusitzen da eta abiadura handitan, efektu hidrodinámicoa. Beraz bi efektu ezberdin hartu behar dira kontuan eta ondorioz kojinete hauen kalkulua zailagoa da. Kojinete hibrido ezagunenak biraketako kojinete hibridoak dira. Biraketa kojineteak, gainontzeko kojineteak baino zailagoak dira kalkulatzeko, hurrengo bi arrazoiengatik:

- Ardatzaren biraketaren ondorioz, arrastatze efektua dela jariatzen barrunbe batetik bestera mugitzen da. Beraz barrunbe bakoitzeko presioa ez da besteekiko independentea.
- Eszentrikotasunen ondorioz tartea ezberdina da kojinetearen itzuli osoan zehar.



### 3. Irudia: Kojinete hibridoak

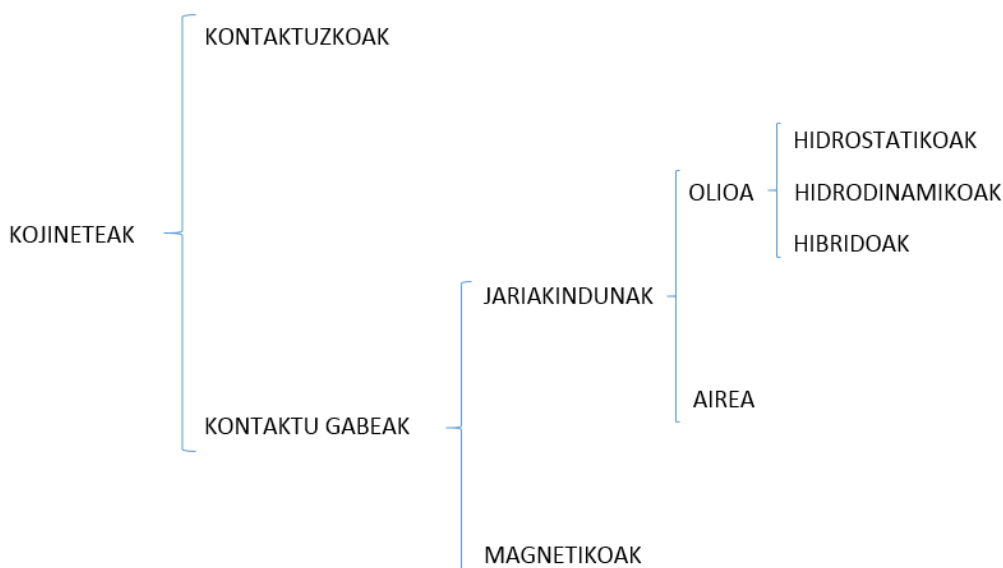
Beraz hibridoak izateagatik duten zailtasunengatik eta biraketako kojinetek izateagatik duten konplexutasunagatik, kojinete mota hauen kalkulua analitiko oso konplexua da eta beraz kalkulua numerikoa erabiltzea justifikatuta geratzen da. Proiektu honetan, bi kalkulua numerikoa ezberdin egin dira, batetik MATLAB erabiliz eta bestetik JDK erabiliz, NX-FLOW softwarea hain zuzen.

## 5. TESTUINGURUA

Lan honetan ME aplikazioan erabiltzen diren kojinete hidrostatiakoetan, hidrodinamiakoetan eta hibridoetan zentratu da, biraketa kojinetetan hain zuzen ere, baina lehenik erabiltzen diren kojinete ezberdinak aztertu dira kojinete bakoitzaren abantailak eta desabantailak aztertu eta egin den aukeraketa justifikatzeko.

### 5.1. KOJINETE MOTAK

Kojinete mota asko existitzen dira baina nagusienak, bi motetan banatzen dira, kontaktuzko kojinetek eta kontaktu gabekoak. Alde batetik, kontaktuzkoen artean, errodamenduzkoak dira ezagunenak, mugimenduzko atalaren eta atal finkoaren artean bola edo errodillo zeramiko ala metalikoak dituztenak. Bestetik, deslizamenduko aurpegien artean kontakturik gabe lan egiten dutenak daude, hauen artean hidrostatiakoak, hidrodinamiakoak, aerostatiakoak eta magnetikoak aipatu daitezke. Magnetikoak alde batera utziko dira beraien prezio eta konplexutasunagatik.



Lehenik kontaktuzkoen eta kontaktu gabekoen arteko alderaketa egingo da:

- Kontaktu gabekoek duten abantaila nagusia baretasun kapazitate altua da. Gaur egun eta betidanik MEn munduan egon den arazoetako bat bibrazioak dira eta beraz kontaktu gabekoek duten baretasun hobearen ondorioz, bibrazioak txikiagoak dira kojinete mota hauek dituzten makinetan.

- Zehaztasunari dagokionez, kojinetean zehaztasuna, bera osatzen duten gainazalen arabera da. Baina errodamenduen kasuan, kontaktu puntua txikia denez gainazalak dituen irregularitateak nabarmen eragingo dute zehaztasunean. Kontakto gabekoen kasuan, kontaktu azalera handia denez ( jariakina eta gainazalaren artean), gainazaleko irregularitate txikiek ez dute eraginik. Beraz zehaztasun hobe eskaintzen dute.
- Ekonomikoki, kontaktuzkoak merkeagoak dira, kontaktu gabekoak, uneoro ekipo auxiliar bat behar dutelako jariakina hornitzeko.

Beraz, aplikazio bakoitzaren beharren arabera, kojinete mota bat ala bestea erabiltzen da. MEren munduan gero eta makina zehatzagoak eta hobeak egitea bilatzen denez, kontaktu gabekoak abantaila dute, nahiz eta konplexuagoak izan, duten baretasun altuak bibrazioak gutxitzen eta akabera hobeak lortzen laguntzen duelako.

Ondoren, kontaktu gabekoen artean, jariakin bezala olio erabili edo airea (aerostatikoak) erabili dauden ezberdintasun nagusiak azalduko dira:

Kojinete aerostatikoetan erabiltzen den jariakina airea edo gasa da eta beraien printzipioa, hidrostatikoen berdina da, gasa konpentsatzaile batetik pasaraziz sartzen da kojinetean eta tartetik ihes egiten du. Hidrostatikoen eta aerostatikoen arteko ezberdintasun nagusiak hurrengoak dira:

- Aerostatikoen barrunbeak, hidrostatikoenak baino txikiagoak dira azalera eta sakoneran, karga aplikatzearen unearan eta barrunbeko presioaren aldaketaren arteko denbora limitatzeko, hau da, kojinetek karga aldaketa baten aurrean erantzun azkar bat izateko. Erantzun denbora luzeen ondorioz, “mailu pneumatiko” bezala ezagutzen den ezegonkortasuna emateko arriskua asko handitzen baita.
- Aerostatikoek, olio hornitutako kojinetek baino karga txikiagoak jasan ahal dituzte airea gehienez 5 edo 6 bar-etara sartu daitekeelako olio 80 bar-etara sartu daitekeen bitartean.
- Airearen biskositatea olioarena baino askoz txikiagoa denez, kojinete aerostatikoetan erabiltzen diren emariak askoz handiagoak dira eta airearen kaparen lodiera normalean txikiagoa da. Hau dela eta, kojinete hauen fabrikazioan zehaztasuna ezinbestekoa da. Baina emari handiagoa edukitzeak ere badu abantaila bat, kojinetean sortzen den beroa, hidrodinamiko batean sortzen dena baino txikiagoa dela eta beraz energia galera txikiagoak dira.
- Aerostatikoek duten abantaila da, filtrazio on batekin eta hezetasuna kentzeko ekipo batekin, airea, zentralizatutako presio altuko hornitze sistema batetik erabili daitekeela eta honela kojinete hidrostatikoen behar duten presio altuko hornitze sistemaren kostua ezabatzen da.

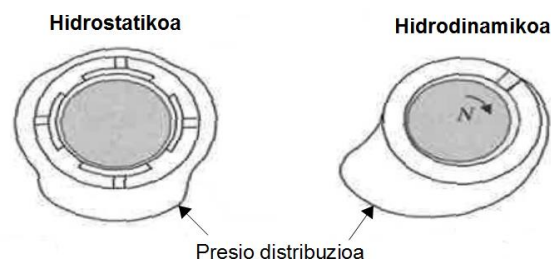
Azkenik, kojineten hidrostatiako eta hidrodinamikoaren artean dauden desberdintasunak azalduko dira.

Kojinete hidrodinamikoak gainazalaren arteko abiadura erlatiboaren ondorioz sortutako presioaz banatzen ditu bi gainazalak. Hau dela eta, kojinete hidrodinamikoak karga handien menpe lan egin dezakete soilik hurrengo bi baldintzak betetzen badira:

- Jariakinaren kaparen forma konbergentea bada
- Paretan artean mugimendu erlatiboa badago.

Bestalde, kojinete hidrostatiakoek berdin lan egin dezakete nahiz eta aurreko baldintzetako bat edo biak ez bete. Honela, kojinete hidrostatiako batek dituen abantailak kojinete hidrodinamiko batekiko hurrengoak dira:

- Bi gainazalak uneoro jariakin kapa batez banatuta daude, baita abiadura zero denean ere, hau da teoriarik higadura zero da eta honek kojinetearen bizitza luzea bermatzen du.
- Presioa gainazal handi batean banatzen da beraz ez dago presio pikorik. Presioa maximoa barrunbe osoan ematen da eta ondoren txikituz doa barrunbearen arteko gainazalaren (4.irudia)



4 Irudia :Kojinete hidrostatiakoaren eta hidrodinamikoaren presio banaketa[1]

- Karga eusteko kapazitatea ez dagoenez gainazalaren abiaduraren menpe, makineriaren hutsegiteen ondorioak, ez dira kojinete hidrodinamikoetan bezain larriak.

Desabantaila nagusia berriz beraien prezioa eta konplexutasuna da, kojinetean uneoro jariakina presioaz sartzeko, ekipa garesti bat behar delako.

Azkenik kojinete hibridoak, kojinete hidrostatiakoaren eta hidrodinamikoaren arteko diseinu bat dira eta biek dituzten abantailak dituzte. Beraz abiaraztean abiadura txikia denean karga hidrostatiakoa da nagusi eta abiadura handitan karga hidrodinamikoa.

Kojinete hidrostatiako, hidrodinamiko eta hibridoaren abantailak eta desabantailak jakinik, gehiago sakonduko da, beraien funtzionamendua eta motak ezagutzeko.

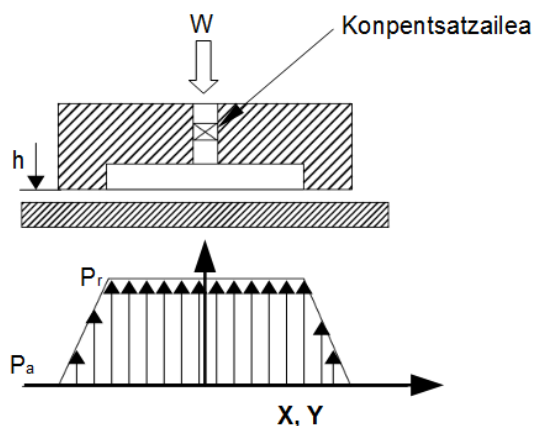
## 5.2. KOJINETE HIDROSTATIKOAK

Makina martxan jartzera doanean, jariakina presiopean hornituko duen ponpa martxan jartzen da eta euskarri bakoitzaren barrunbean presio bat sortzen du, presio hori nahikoa izan arte euskarria eta kontrako aurpegiaren artean kontakturik ez dagoela bermatzeko. Hiru presio ezberdintzen dira, batetik hornitze presioa dugu  $P_s$  deitzen dena eta hau ponpak ematen duen presioa da. Bestetik  $P_r$  presioa dugu, barrunbeko presioa izango dena eta  $P_s$  baino txikiagoa, konpentsatzaileak presio jaitsiera bat inposatuko duelako. Azkenik  $P_a$  izango dugu, kojinetearen irteerakoa, normalean presio atmosferikoa izaten dena.

Kojinete hidrostático mota ezberdinak daude beraien forma eta funtzioaren arabera.

### 5.2.1. EUSKARRI BAKARRA

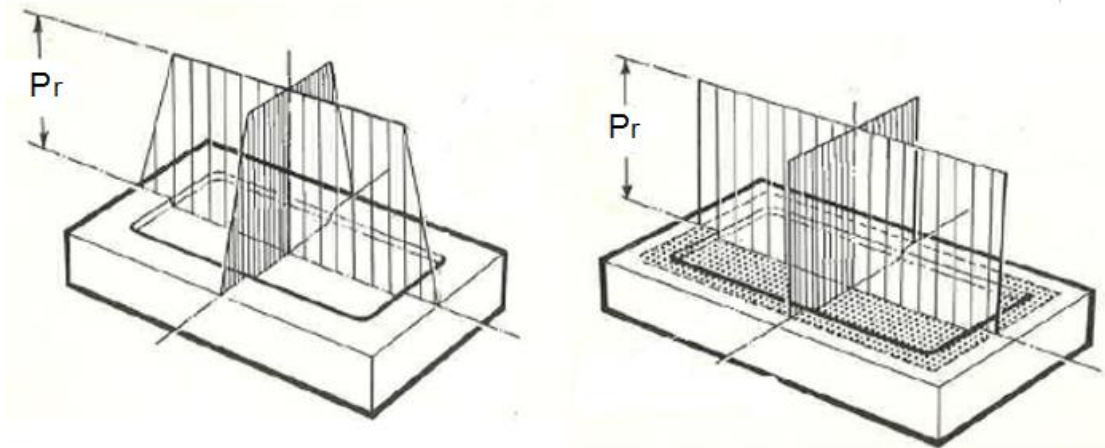
Plano batean mugimendu translazionala ahalbidetzen duten kojinetek dira (5.irudia). Kojinete hauen aplikazioak mugatuak dira, soilik indarra kojinetearen gain honen noranzkoan eusten dutelako, inoiz ez kontrako noranzkoan. Kojinete mota hauek, karga handiak abiadura txikiarekin eutsi behar direnean eta zurruntasun handia behar ez denean erabiltzen dira gehienbat.



5. Irudia: Euskarri bakarra

Barrunbean presioa konstantea da eta ondoren gainazalean zehar linealki erortzen da kojinetearen ertzean presio atmosferikoa izan arte. Kojineteen kalkuletan, azalera birtuala deritzon terminoa erabiltzen da kalkuluak errazten dituen eta honen esanahia hurrengoa da; azalera baliokide bat da non presioa barrunbeko presioaren berdina den eta euskarri hidrostático originalak egingo duen bultzadaren berdina egingo duen. Beraz barrunbeko azalera baino handiagoa da eta euskarri osoarena baino txikiagoa (6.irudia).



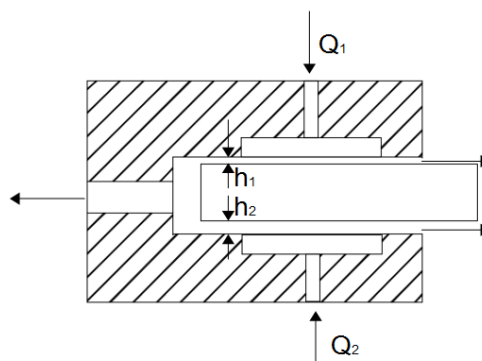


6. Irudia: Azalera birtuala [2]

Hauen aplikazioa ME-ra bideratuta, ardatz linealen gidatuetan erabili daitezke baina hauetan normalean, ondoren azalduko diren aurrez aurreko kojinetek erabiltzen dira karga bi noranzkoetan jasateko kapazitatea baitute.

### 5.2.2. AURREZ AURREKO EUSKARRIAK

Kojinete hau, aurrez aurre jarritako bi euskarri bakarrek osatzen dute (7. irudia) eta bi noranzkoetako karga jasateaz gain, zurruntasun bikoitza dute euskarri bakarrarekin alderatuz. Euskarri bakoitzak bestearengan karga bat inposatzen du eta kanpo karga bat aplikatzen denean, euskarri baten bultzada handitu egiten da bestearen bultzada txikitu egiten den heinean.



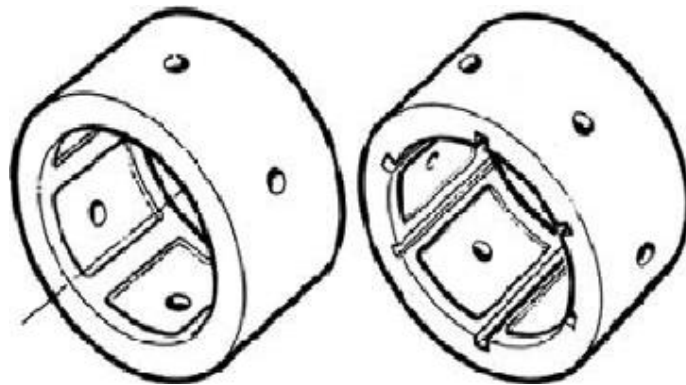
7. Irudia: Aurrez aurreko euskarria

Bi euskarrien bultzadaren batura algebraikoa aplikatutako kargaren berdina da eta bi euskarrien bultzadak oposizioan daudenez, euskarri baten bultzadak, aplikatutako karga baino handiagoa izan behar du beti. Beraz, bi euskarrien zurruntasuna gehitu egiten den bezala, bultzada kendu egiten da. Karga kapazitate espezifiko bat lortzeko euskarri bakarraren kasuan baino hornitze presioa handiagoa erabili behar da. Euskarri baten zurruntasuna zuzenki proportzionala da azalera birtualaren eta hornitze presioaren

produktuari eta beraz, aurrez aurreko euskarri baten zurruntasuna ez da soilik handiagoa bi euskarrien zurruntasunak gehigarriak direlako, baita karga berdina jasateko hornitze presioa eta azalera birtualaren produktua handiagoa delako ere.

### 5.2.3. BIRAKETA KOJINETEA

Biraketa kojinetea, ardatz bat inguratzen duen euskarriez osatutako eraztuna da. Jasaten dituen indarrak, indar erradialak dira. Euskarriak normalean berdinak izaten dira eta uniformeki banatuta egoten dira kojinetearen ardatzean zehar, ardatza kojinetearen erdian mantentzeko. Aurrez aurreko euskarriekin alderatuz, berdintasun asko dituzte eta berdinkalkula daitezke ondoz ondoko euskarrien artean arteka batzuk badituzte, honela euskarri bakoitza independentea delako besteekiko eta ez delako batetik bestera jariakinik pasatzen. Beraz aurrez aurreko euskarri zirkular bat dela esan daiteke. Baina arteka hauek duten arazoa da, abiadura oso handitan gerta daitekeela airea arteka hauetatik sartu eta gainazalean zehar arrastatzea barrunberarte, kojinetearen zurruntasuna galduz. Hau saihesteko, zurruntasun maximoa ez bada eskatzen, arteka hauek ez dira jartzen eta barrunbeen artean, gainazal axiala soilik egongo da. Honela, jariakina barrunbe batetik bestera pasatzen da.

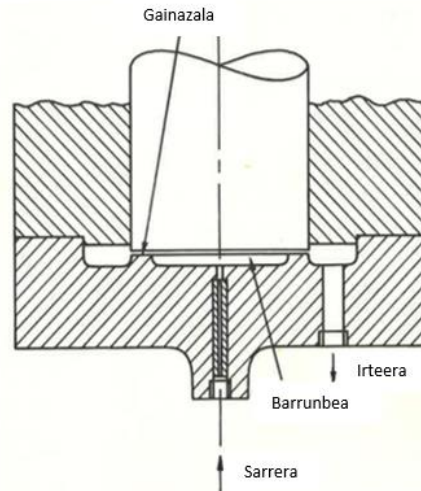


8. Irudia: Biraketa kojinete hidrostatikoa[2]

Gainazalen artean ematen den abiadura erlatiboa, askoz handiagoa izan ohi da aurrez aurreko euskarri batean ematen diren abiadurekin alderatuz eta ondorioz beste aspektu batzuk hartu behar dira kontuan, besteak beste, sortutako beroa eta barrunbe barruko jariakinaren errezirkulazioak eragiten duen marruskadura.

### 5.2.4. BULTZADA KOJINETEAK

Kojinete hauek ardatz bateko indarrak eusten dituzte baina indarrak norabide axialean datozenean. Barrunbea zona finkoan edo ardatzaren bukaeran eduki dezakete.

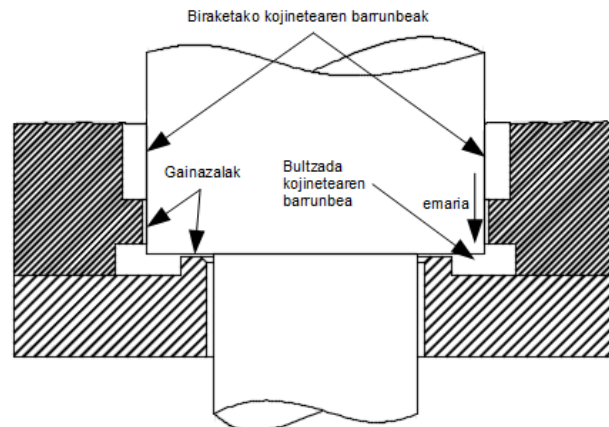


9. Irudia: Bultzada kojinetekoa[2]

Kojinete mota hauek, indar axialak jasateko dira baina iraulketa momentuak jasateko ere gai izan behar dute askotan, hau da, biraketa ardatzarekiko perpendikular diren lerroen momentuak. Hori lortu ahal izateko, zirkunferentzialki presio diferentziak egon behar dira kojinetean, eta hau ezinezkoa da 9. Irudian, barrunbe bakarra duenez, presioa konstante izango delako. Hau lortu ahal izateko, eraztun batean barrunbe kopuru bat jartzen da elkarren artean gainazala jarritz eta barrunbe bakoitzak bere elikadura du, honela bakoitzean dugun presioa independentea da besteeikiko.

Biraketa kojinetekoa eta bultzada kojinetekoa konbinatuz (10.Irudia), indar erradialak eta axialak jasan ditzaken kojinete bat lortzen da. Kojinete mota hauek hurrengo ezaugarriak dituzte:

- Biraketa kojinetekaren barrunbeko presioa, bultzada kojinetekaren hornitze presioa da.
- Biraketa kojinetekaren irtetze erresistentzia, bultzada kojinetekaren sartzeko erresistentzia da.
- Bultzada kojinetekaren barrunbeko presioa, biraketa kojinetekaren iheseko presioa da.



#### 10. Irudia: Biraketako kojinete eta bultzada kojinete konbinazioa

Sistema hau praktikoa egiten duten ezaugarriak hurrengoak dira:

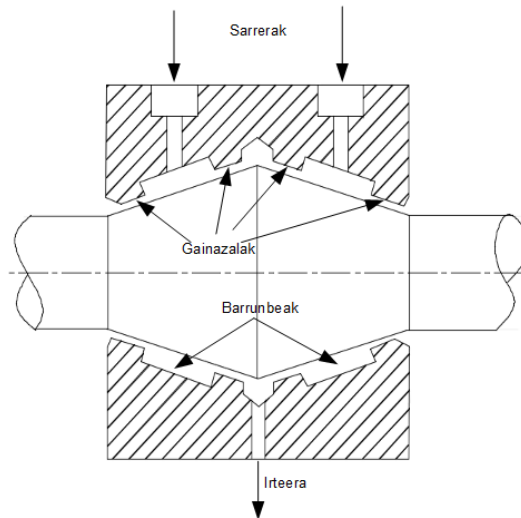
- Bultzada kojineteak ez ditu barruko gainazalak eta beraz bere kanpo diametroa txikiagoa da honela deslizamendu abiadura eta akzio zentrifugatuak txikituz.
- Biraketa kojinetea eta bultzada kojinetea separatuta dituen aplikazioarekin alderatuz emaria 2 edo 3 aldiz txikiagoa da eta marruskaduraren ondorioz galdutako energia %30 txikiagoa da.

### 5.2.5. KOJINETE KONIKOAK

Kojinete konikoek, aurreko kasuko kojinetek bezala, karga axialak eta erradialak eusten dituzte. Biraketa kojinetea eta bultzada kojinetearen konbinazioarekin alderatuz hainbat abantaila dituzte:

- Leku gutxiago okupatzen dute
- Mekanizazio gutxiago behar dute
- Ardatzeko potentziaren galerak txikiagoak dira lur gutxiago dituelako
- Kojinetearen forma dela eta estrukturalki zurrunagoa izan daiteke.

Baina biraketa-bultzada konbinazioan, potentzia eta emaria txikiagoak dira soilik bi gainazal zirkunferentzial dituelako, nondik jariakina kanporatuko den eta kojinete konikoaren kasuan lau izango dira.



11. Irudia: Kojinete konikoa

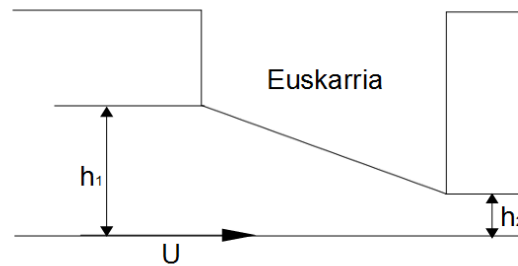
Kojinete konikoeek duten beste desabantaila bat da, kojinete bakoitzak indar axialak eta indar erradialak jasan behar dituztela eta beraz gerta daiteke indar axial baten ondorioz kojineteak duen zurruntasun erradialean eragitea eta alderantziz.

## 5.3. KOJINETE HIDRODINAMIKOAK

Kojinete hidrodinamikoetan, jariakina presio minimo batekin sartzen da hurrengo bermatzeko; kojinetara iritsi arteko tutuetako karga galerei aurre egiteko, emari minimo bat egoteko kojinetean hozkari gisa lan egin dezan eta azkenik, abiadura handitan kabitazioa eragozteko. Baina presioa ez da hidrostatikoen kasuan bezala kargak eusteko. Kargak eusteko, gainazalen arteko abiadura erlatiboa dela eta jariakin kapak sortzen dira bi gainazalen artean presio gunek sortuz.

### 5.3.1. EUSKARRI LAUAK ETA BULTZADA KOJINETEAK

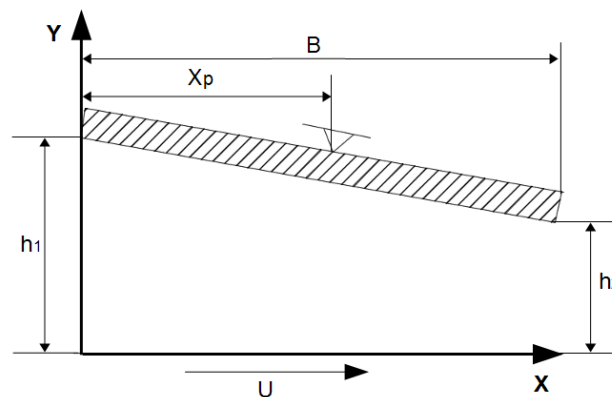
Sistema hidrodinamiko sinpleena, euskarri lauak dira, bultzada kojineteetan erabiltzen direnak. Paraleloak ez diren bi gainazal planoz osatzen dira eta bi planoetako bat mugitu egiten da bestearekiko. 12. Irudian, beheko gainazal horizontala U abiadura batekin mugitzen da goikoa geldirik dagoen bitartean. Goiko gainazalak malda txiki bat du horizontalarekiko, eta honela mugimendu translazionalaren ondorioz, beheko gainazalak jariakina zona konbergentera bultzatzen du kargari aurre egingo dion presio eremua sortuz. Jariakin kaparen lodierak,  $h_1$  eta  $h_2$ , euskarriaren luzera baino  $1 \cdot 10^{-3}$  aldiz txikiagoak izaten dira.



12. Irudia: Euskarri hidrodinamikoa

Bultzada kojinetek, zirkunferentzi batean zehar uniformeki banatutako euskarri lau kopuru batek osatzen dute.

Orain arteko euskarri lauek, geometria finkoa zuten baina badaude ere inklinazio euskarri deritzenak, hau da, puntu finko batekiko pibotatzen dutenak eta beraz kargaren arabera presio distribuzioa bat edo beste bat ematen dutenak.



13. Irudia: Inklinazio euskarria

13. irudian ikusten den bezala, pibotamendu puntua, euskarri-aren erdialdetik mugituta dago, konbergitzen duen aldera. Honela karga handitzen denean, euskarriaren malda handitu egiten da eta presio handiagoa sortzen da kargari aurre egiteko. Aplikazioaren arabera pibotamendu puntu honen kokapena ondo kalkulatu beharra dago, kalkulu txar baten ondorioz, ezegonkortasunera eta bibrazioak eragitera ere iritsi baidateke.

### 5.3.2. BIRAKETA KOJINETEA

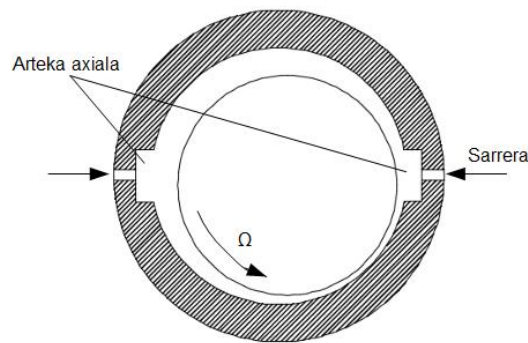
Kojinete hauek dira hidrodinamikoaren artean ezagunenak, abiadura handienak bermatzen dituztenak direlako. ME batean adibidez, abiadura handienak makinaren buruan ematen dira eta hauek dira buru horietan erabiltzen diren kojinetek.

### 3.3.2.1 BIRAKETA KOJINETE LAUAK

Existitzen den kojinete hidrodinamiko sinpleena da. Zulo zirkular bat duen zilindro bat da eta bere barneko diametroa, bere barnean egongo den ardatzaren diametroa baino handiagoa da, honela tarte erradial bat bermatuz. Presio distribuzioa, ardatza eszentrikotasun batekin biratzen denean sortzen da 4. Irudian ikus daitekeen bezala.

### 3.3.2.2 ARTEKA AXIALDUNAK

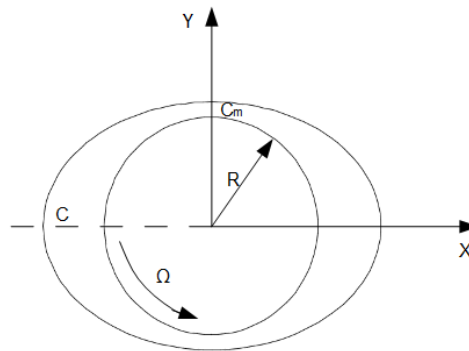
Bere forma sinpleenean, biraketa kojinete lau bat da arteka batzuekin olioaren distribuziorako. Arteken ondorioz jariakinak sortzen duen presio eremua apurtu egiten da eta hidrodinamikoetan sortzen diren presio negatiboak ekidin egiten dira honela kojinetearen zurruntasuna handituz. Bi arteka baditu, bi presio eremu independente sortuko dira. Kojinete mota hauek duten desabantaila da, abiadura oso handitan arteka horietatik airea sartu daitekeela, honela kojinetearen zurruntasuna txikituz.



14. Irudia: Bi arteka axialdun biraketa kojinetea

### 3.3.2.3 ELIPTIKOAK

Biraketa kojinete lauak baino ezaugarri dinamiko hobeak dituzte eta egonkorragoak dira. Tarte horizontala, tarte bertikala baino handiagoa izaten da eta tarte txikieneko norabideko zurruntasuna, tarte handieneko zurruntasuna baino orden bat handiagokoa izaten da. Baretasuna ere txikiagoa da tarte handiagoko norabidean.



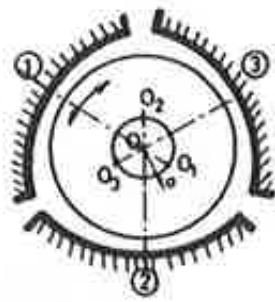
15. Irudia: Kojinete eliptikoa

Kojinete hauek ardatza zentratuta dutenean, zurruntasun ez nulua dute, hau izanik kojinete zirkular batekin alderatuz abantaila nagusia. Zirkularren kasuan, zentratuta dagoenean ez dago inolako ziri efekturik, tartea konstantea delako perimetro osoan eta beraz eszentrikotasun bat eman arte bere zurruntasuna nulua da.

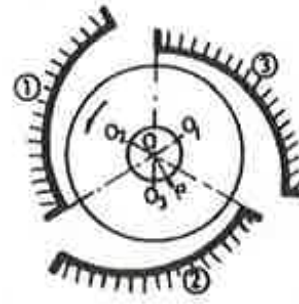
### 3.3.2.4 LOBULU ANIZKOIZDUN KOJINETEA

Kojinete mota hauek, lobulu batzuk dituzte mekanizatuta barruko gainazalean, itzuli osoan zehar. 16. irudian, hiru-lobulu dituen kojinete bat dago bi operazio baldintza ezberdinetarako: zentratuta (16.a eta 16.b irudiak) karga txikia eta abiadura handitan ematen dena eta eszentrikotasunarekin (16.c) karga handia eta abiadura txikitan. Lobulu ezberdinen kurbadura zentroak,  $O_i$ ,  $O$  (kojinetearen zentroa) zentrotzat duen zirkunferentzia batean daude, “a” erradio duena.  $\overline{O_1O}$  lerroa lobuluen simetria lerroarekin koinzidentea bada lobulu simetrikoak deritze (16.a irudia) eta ardatzak bi norabidetan biratuta dezake. Bestela, asimetrikoak dira (16.b irudia) eta ardatzak noranzko batean soilik bira dezake.

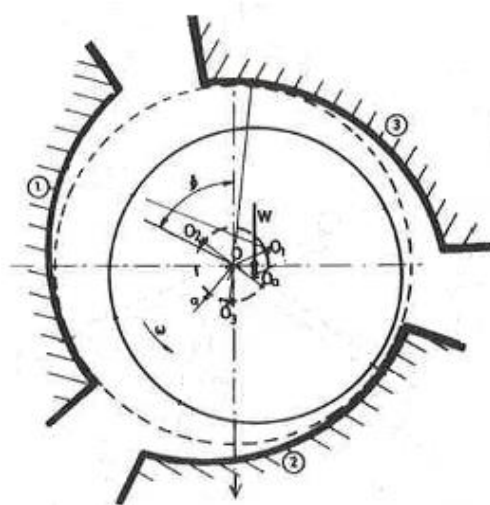




a) Simetrikoa zentratuta



b) Asimetrikoa zentratuta



c) Eszentratuta

16. Irudia: 3 Lobuludun kojinetea [3]

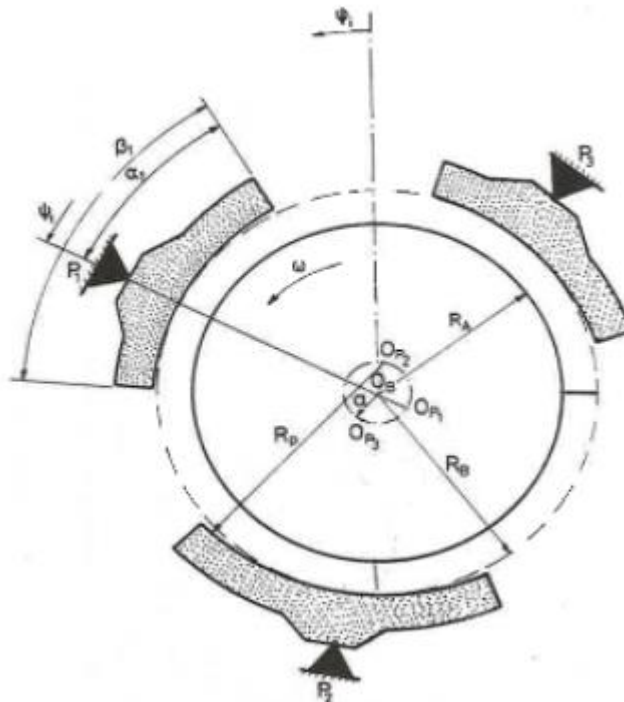
Kojinetea “a” aurrekarga batekin geometrikoki aurrekargatuta dagoela esaten da. Aurrekarga geometriko hori 16.a eta 16.b irudiak ikusita garbi ikusten da; zentratutako posizioan, konbergente-dibergente zonak daude kojinetean zehar banatuta eta beraz olio ziri batzuk sortzen dira ardatzaren edozein desplazamenduri erresistentzia jartzen diotenak. Honela ardatza zentratuta dagoenean kojinetek zurruntasuna du.

Lobulu bakoitzak bere presio distribuzioa sortzen du eta kojinete mota hauen analisia egitean, lobulu bakoitzaren presioa distribuzioa kalkulatu da eta ondoren kojinetean distribuzio ezberdinen batura moduko bat egiten da.

Generalean, lobuludun kojinetek, biraketa kojinete lauak baino egonkorragoak dira. Egonkortasun efektu hau aurrekarga geometrikoaren eta lobuluen asimetrikotasunaren ondorio da. Kojinete mota honek duen desabantaila handiena, mekanizatuan lortu behar den zehaztasuna da, “a”-ren desbideraketa txiki batekin, emaitzetan diferentzia handiak ematen direlako.

### 3.3.2.5 INKLINAZIO EUSKARRIAK DITUEN BIRAKETA KOJINETEA

Kojinete mota hau, ardatzaren inguruan kokatutako euskarri ezberdinek osatzen dute beraien sujezioarekiko pibotatu dezaketenak. Euskarri bakoitzak independenteki pibota dezake honela bakoitzak bere presio distribuzioa sortuz. Lehen bultzada kojinete inklinatuentzat azaldu den bezala funtzionatzen dute.



17. Irudia: Inklinazio euskarriak dituen biraketako kojinetea[3]

Lobuludun kojineteetan bezala, euskarrien zentroak, kojinetearen zentroa zentrotzat duen zirkunferentzia batean daude eta zirkunferentzia horren erradioa “a” da. Hemen ere, “a”, aurrekarga geometrikoa ezinbestekoa da, kargarik gabeko egoeran zurruntasun ona bermatzen duelako.

Kojinete mota hauek oso sendoak dira eta kojinete batean lor daitezkeen ezaugarri dinamiko onenak eman ditzakete. Desabantaila nagusia beraien konplexutasuna da bai fabrikazioan, kalkuluan, muntaian eta baita ajustean ere.

## 5.4. KOJINETE HIBRIDOAK

Kojinete hibridoak aurreko bi kojinete moten tartekoak dira eta beraz bien abantailak dituzte.

Abiadura batetik aurrera, kojinetearen zurruntasunean eragin handiagoa du efektu hidrodinamikoak, hidrostatiakoarekin alderatuz, ziri izenarekin ezagutzen den akzioa dela eta; jariakina arrastatu egiten da tarte erradial estuagoa zonaldera. Honela, akzio

hidrostatikoa nagusitzen bada, ardatza aplikatzen zaion indarraren norabide berdinean desplazatuko da. Baina abiadura handitan, efektu hidrodinamikoa nagusitzen da eta desplazamendu bektoreak eta karga norabidearen arteko angeluak 90 gradutara hel daiteke. Abiadura handitan, biraketa kojiniteak, kojinete lau baten jarrera hartzen du, hau da, barrunbeak izango ez balitu bezala, efektu hidrodinamiko hori gainazalean sortzen delako.

Beraz kojiniteak barrunbeak izan behar ditu karga hidrostatikoa lortzeko ardatzaren biraketa abiadura txikiak direnean, baina abiadura handitan efektu hidrodinamikoak eragina izan dezan, gainazalak handia izan behar du. Beraz kojinete hibridoek barrunbeak dituzte baina ez hidrostatikoez dituzten bezain handiak. Ezaugarri honek egiten ditu kojinite mota hauek diseinatzeko eta kalkulatzeko zailak.

## 5.5. KONPENTSATZAILEAK ETA EMARI KONTROLA

Lehenago azaldu den bezala, kojinetearen zurruntasuna oso garrantzitsua da eta zurruntasun hori lortzeko konpentsatzaileak ezinbestekoak dira. Ondoren kojinetearen zurruntasuna bermatzeko, existitzen diren konpentsatzaile ezberdinak azalduko dira.

Jariakina hornitzen den moduaren arabera bi talde banandu daitezke, batetik emari konstantean hornitzen duten ponpak eta bestetik presio konstantea hornitzen dutenak. Mota bakoitza azaltzeko, hurrengo formula hartuko da oinarri bezala:

$$\Delta P = Q * R \tag{5.1}$$

### 5.5.1. EMARI KONSTANTEA

Ponpek ponpatutako jariakina zuzenean barrunbera sartzen da beraz, hornitze tutuen presio galerak mesprezagarriak badira, jariakinaren presioa ponpa bakoitzean  $P_s$ , barrunbeko presioaren berdina da  $P_r$ . Emaria konstantea denez, karga handitzen denean,  $h$  txikitzen da  $P_r$  handitzen den heinean.

Teorian,  $P_r$ -ren hazkundearen limitazio bakarra, eta beraz karga eusteko gaitasuna, motorraren potentzia eta hornitze sistemak ahalbidetzen duen presio maximoa dira. Beraz bere limiteak ekonomikoak dira barrunbe bakoitzerako ponpa bat eta bere motorra behar direlako.

### 5.5.2. PRESIO KONSTANTEA

Ponpa mota hauek dira ohikoenak, sinpleenak direlako. Ponpek ponpatutako jariakina konpentsatzaile batetik pasatzen da barrunbera sartu aurretik. Beraz barrunbeko presioa,  $P_r$ , hornitze presioa,  $P_s$  baino txikiagoa da beti konpentsatzailetan ematen den presio erorketa dela eta. Konpentsatzaileen artean, bi talde banandu daitezke, geometria finkoa dutenak eta geometria aldagarria dutenak.

### 5.5.2.1 KONPENTSATZAILE FINKOAK

Konpentsatzaile hauen geometria finkoa da eta beraz beraiek jariakinari jartzen dioten erresistentzia ez da aldatzen geometria dela eta. Bi konpentsatzaile nagusi sartzen dira talde honetan, kapilarra eta zuloa.

- Kapilarra: Konpentsatzaile mota honen erresistentzia konstantea da emariarekiko (5.2 ekuazioa). Beraien forma, tutu estu eta luze batena da

$$R_K = \frac{128 * l * \mu}{\pi * d_R^4} \quad (5.2)$$

Karga handitzen denean tartea txikitzen da eta beraz emaria txikitzen da irteeran oztupo handiagoa duelako. Honen ondorioa,  $P_r$  handitzea da, fluxu laminar bat tutu hestu batetik pasatzean biskositatea dela eta energia galtzen duelako, beraz zenbat eta emaria handiagoa, presioa erorketa handiagoa izango da eta alderantziz. Beraz  $P_r$  handitzearen ondorioz kojinetea bere orekara itzultzen da. Alderantziz, karga txikitzean  $P_r$  txikitzen da emaria handitzen delako. Konpentsatzailearen diseinu egoki batekin, tartearen aldaketa oso txikia izan daiteke. Karga aldatetaren eta tartearen aldatetaren arteko zatiketa kojinetearen zurruntasuna da eta edozein kojinetereen ezaugarri oso garrantzitsua da.

- Zuloa: Konpentsatzaile mota honen erresistentzia ez da konstantea, emariaren araberakoa da eta hurrengo itxura du:

$$R_K = \frac{8 * \rho}{\pi^2 * d_R^4 * C_0^2} * Q \quad (5.3)$$

Non  $C_0$  zuloaren deskarga koefizientea den.

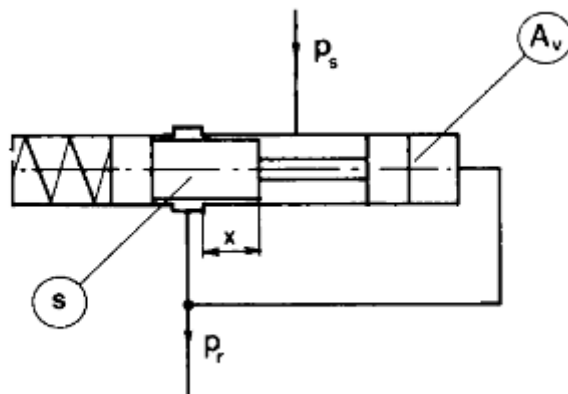
Zulo bat konpentsatzaile moduan duten kojinetetan, karga handitzen denean, h txikitzen da eta honek emaria txikitzen du. Emaria txikitzearen ondorioz, zuloaren erresistentzia txikitzen da eta  $P_r$  handitzen da, kapilar batean handitzen dena baino balioa altuago batera, 5.1 eta 5.3 ekuazioetan ikus daitekeen bezala,  $Q$  berbi dugulako kasu honetan. Beraz, zulo batek zurruntasun handiago bat ematen dio kojineteari, kapilar batekin alderatuz.

Kapilar konpentsatzaile batek ordea, abantaila garrantzitsu bat du. kapilar bat duen kojinete baten irteerako eta sarrerako erresistentziak, jariakinaren biskositatearen menpekoak dira soilik eta beraz tenperatura aldatzen denean, biskositatea aldatzen denez, irteerako erresistentziaren eta sarrerakoaren arteko ratioa ez da aldatzen. Baina zuloaren kasuan, irteerakoa soilik da biskositatearen araberakoa eta beraz tenperatura aldatzean erresistentzien arteko ratioa aldatu egiten da eta ondorioz baita zurruntasuna ere, zurruntasuna, irteerako eta sarrerako erresistentzien arteko ratioaren menpekoa delako.

### 3.4.2.2 RESTRIKTORE ALDAGARRIAK

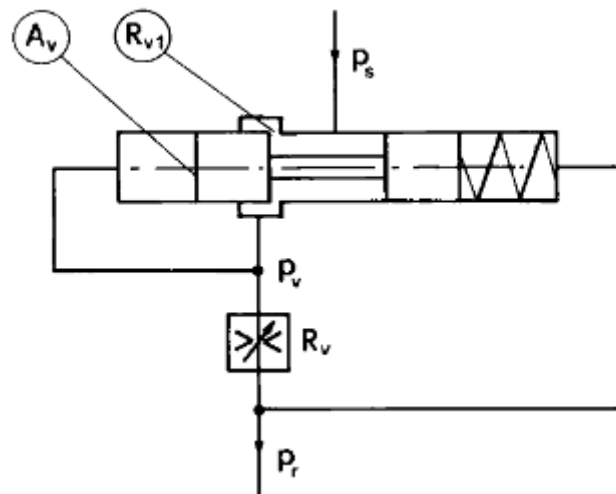
Konpentsatzaile hauek, beraien erresistentzia aldatzen dute presio erorketa dela eta. Hau da, erresistentzia hidraulikoa handitu egiten da  $P_s$  eta  $P_r$ -ren arteko diferentzia handitzen denean eta alderantziz. Beraz hauen funtzionamendua hurrengoa da: Kojinetearen gain egindako karga handitzean,  $h$  txikitzen da eta honek  $P_r$  handitzea dakar eta konpentsatzaile hauen erresistentzia asko txikitzea. Erresistentzia aldatzeko moduaren arabera konpentsatzaile ezberdinak daude:

- Kapilar elastikoak: Diametro txikiko tutu bat da goma moduko material batekin beteta. Barrunbeko presioa igotzen denean, tutuaren zuloa handitu egiten da eta erresistentzia hidraulikoa txikitu egiten da. Zulo elastikoak ere existitzen dira.
- Zilindroz kontrolatutako konpentsatzailea: Jariakina tarte txiki batetik pasarazten da zilindro eta balbularen gainazalaren artean dagoena. Zilindro hori orekan dago malgukiaren eta barrunbeko presioaren artean. Beraz presioa igotzean zilindroa bultzatu egingo du eta emaria handiagoa pasako da



18. Irudia: Zilindroz kontrolatutako konpentsatzailea[4]

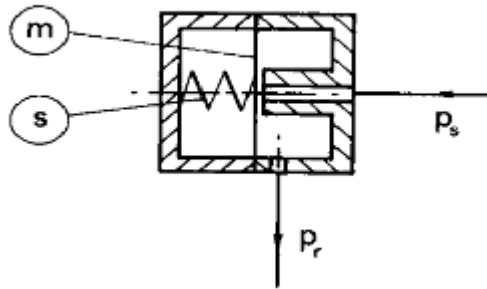
- Emari konstanteko balbulak: Balbula hauek 19. Irudiko itxura dute. Zilindroa orekan dago alde batetik  $P_v$  presioak eragiten diolako eta bestetik malgukiaren indarrak eta  $P_r$  presioak.



19. Irudia: Emari konstanteko balbula[4]

$R_v$ -tik pasatzen den emaria konstante izateko, beharrezkoa da bertan ematen den presio saltoa konstante izatea kojinetean karga aldaketak ematen direnean.  $P_r$  aldatzen denean, zilindroa mugitu egiten da  $R_{v1}$  barne erresistentzia aldatuz eta oreka puntu berri batera iritsiz,  $P_v$  ere aldatuz. Zilindroaren desplazamenduak txikiak direnez malgukiaren elastizitatearekin alderatuz, ekuaziotik malgukiaren indarraren aldaketa mesprezatu daiteke eta beraz suposa daiteke  $P_r$  aldatu den berdina aldatu dela  $P_v$  eta beraz beraien arteko diferentzia ez dela aldatu. Ondorioz emari konstantea lortzen da.

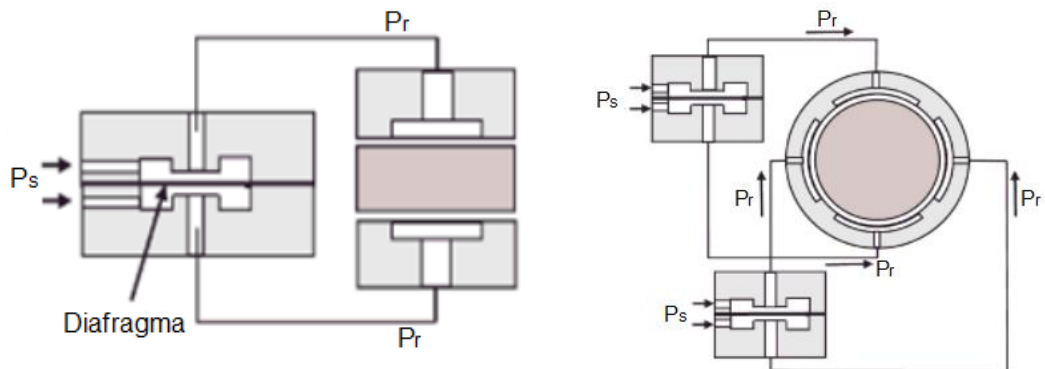
- Diafragmaz kontrolatutako balbulak: Kasu honetan diafragma batek kontrolatzen du barrunbean sartzen den emaria. Barrunbeke presioa handitzen denean kojinetearen gain eragiten duen karga handitu delako, jariakinak diafragman egiten duen indarra handitzen da eta desplazatu egiten du konpentsatzailearen erresistentzia txikituz eta beraz emaria handituz. Honela diafragmaren zurruntasunaren aukeraketa egoki batekin, diafragmaren deformazioak emari hazkunde proportzional bat eragiten du eta beraz zurruntasun infinitoa. Diafragma zurrunegia bada, kapilar bat bezala konportatuko da eta finegia bada, kojinetea ezegonkortu dezake.



20. Irudia: Diafragmaz kontrolatutako balbula[4]

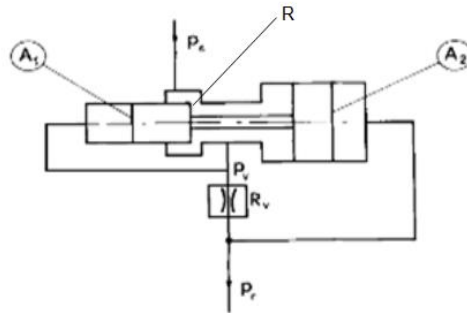
Balbula hauek aurrez aurreko kojinetetan ibiliz gero, euskarri bakoitzerako bat, balbula bakoitza saiatuko litzateke jariakinaren kaparen lodieraren kontrola edukitzen. Honela, bi balbulak guztiz irekita ala guztiz itxita funtzionatuko lukete eta kojinetean zurruntasun oso txikia ala zero izango litzateke. Ondorioz ezin dira aurrez aurreko kojinetetan erabili.

Arazo hau konpontzeko, Rowe-k [1] aurreko balbularen aplikazio bat asmatu zuen. Bertan, balbula bakarra erabiltzen da bi euskarri-ak elikatzeko eta erdian diafragma bat du. Diafragma ez du malgukirik eta orekan dago bi barrunbetako presioa dela eta. Balbula hau hurrengo 21. Irudian ikus daiteke. Erraz ikus daiteke, balbula honen beste aplikazio bat biraketa kojinetek izan daitezkeela, aurrez aurre dauden barrunbeak balbula konpartitzen dutelarik.



21. Irudia: Rowe-ren balbula[1]

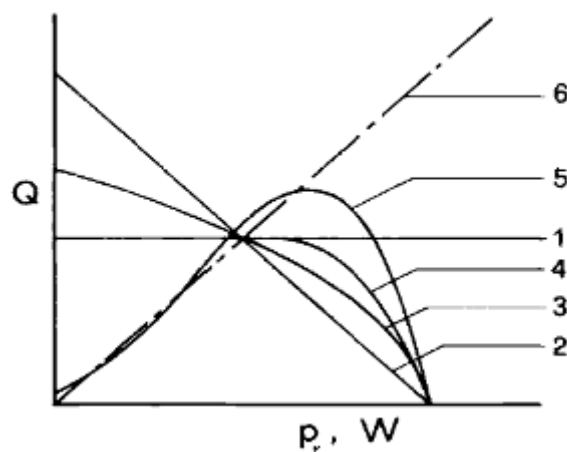
- Zurruntasun infinituko balbulak: 22. Irudian ikusten den balbula, barrunbeko presioari,  $P_r$ , proportzionala den emaria emateko kapaza da.



22. Irudia: Zurruntasun infinituko balbula[4]

Pistoiaren orekan dago  $P_r$  eta  $P_v$ -ek gainazal ezberdinetan eragiten dutelako. Beraz, pistoiak bere oreka posizioa bilatzen du barneko erresistentzia doituaz ( $R$ ).  $P_r/P_v$  ratioa,  $A_2/A_1$  ratioaren berdina izan arte.  $R_v$  erresistentzia konstantea denez, bertatik pasatzen den emaria  $P_v$  eta  $P_r$ -ren arteko presio diferentziaren proportzionala da (kapilar baten gertatzen den bezala), eta nola  $P_v$ ,  $P_r$ -ren arabera den, lortzen den emaria  $P_r$ -ren proportzionala da. Lortu nahi den proportzioaren arabera  $A_2$  eta  $A_1$  azalerekin jolasten da. Adibide moduan demagun  $A_2=2 \cdot A_1$  dela, beraz oreka posizioan  $P_v=2 \cdot P_r$  izango da eta  $R_v$  erresistentzian emango den presio erorketa  $P_r$  izango da.

23. Irudian, konpentsatzaile mota bakoitzak ematen duen zurruntasuna ikus daiteke. Zurruntasun infinitua lortzea da helburua, grafika honetan lerro diagonal izango litzatekena.



23. Irudia: Konpentsatzaile ezberdinen zurruntasuna[4]: 1 emari konstantea, 2 capillary, 3 orifice, 4 emari konstanteko balbula, 5 diafragmaz kontrolatutako balbula, 6 zurruntasun infinitua



## 5.6. OINARRIZKO EKUAZIOAK

Atal honetan, jariakinen inguruko oinarrizko ekuazioak nondik lortzen diren ikusiko da, ondoren kalkulu numerikoetan erabiltzen diren ekuazioak justifikatzeko. Hiru dimentsiotan jariakin baten portaera aztertzeko Navier-Stoke ekuazioak aztertu behar dira.

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \rho \frac{Du}{Dt} = \rho X - \frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[ 2\mu \left( \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{1}{3} \nabla v \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\
 \quad \quad \quad + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \\
 \rho \frac{Dv}{Dt} = \rho Y - \frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[ 2\mu \left( \frac{\partial v}{\partial y} - \frac{1}{3} \nabla v \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right] \\
 \quad \quad \quad + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \right) \right] \\
 \rho \frac{Dw}{Dt} = \rho Z - \frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[ 2\mu \left( \frac{\partial w}{\partial z} - \frac{1}{3} \nabla v \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[ \mu \left( \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} \right) \right] \\
 \quad \quad \quad + \frac{\partial}{\partial y} \left[ \mu \left( \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} \right) \right]
 \end{array} \right. \quad (5.4)$$

Non  $u, v$  eta  $w$  abiadura bektorearen osagaiak diren eta  $X, Y$  eta  $Z$  indar bolumetrikoak masa unitatearekiko.

3 ekuazio dira eta lau ezezagun (abiadura osagaiak eta presioa) beraz beste ekuazio bat behar da. Ekuazio hau “jarraitutasun” ekuazioa da eta masaren balantzea bolumen kontrol infinitesimal batean zehar bezala adierazten da.

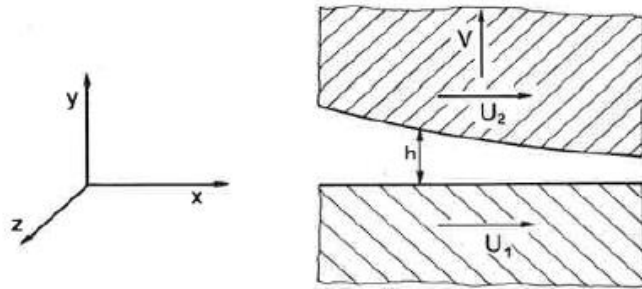
$$\dot{\rho} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0 \quad (5.5)$$

### 5.6.1. REYNOLDS-EN EKUAZIOA

Kojinete hidrostático, hidrodinámico eta hibridoen kasuan, olioaren lodieraren dimentsioa oso txikia izan ohi da gainerako dimentsioekin alderatuta. Beraz, “Navier-Stoke” ekuazioak sinplifikatu ahal dira hurrengo hipotesiak kontuan hartuz (24. Irudia):

1. Olio kaparen lodiera oso txikia da gainerako dimentsioekin alderatuz.

2. Beraz, presioa, dentsitatea eta biskositatea konstante suposatu daitezke y-ren norabidean eta beraz  $dp/dy=0$ ,  $d\rho/dy=0$  eta  $d\mu/dy=0$ .
3.  $du/dy$  eta  $dw/dy$ -rekin alderatuz gainerako abiadura gradientek mesprezagarriak dira. Hau justifikatuta dago u eta w, v baino handiagoak direlako eta y norabideko olioaren lodiera txikia delako.
4. Fluxua laminarra da, ez dago turbulenziarik.
5. Indar bolumetrikoak mesprezagarriak dira biskositate indarrekin alderatuz.
6. Inertzia indarrak ere mesprezagarriak dira biskositate indarrekin alderatuz.
7. Gainazalarekin kontaktuan dagoen jariakinak, gainazalaren abiadura berdina du kontaktu puntuetan.



24. Irudia: Reynolds-en hipotesiak[4]

Aurreko hipotesiak kontuan hartuz 5.4-eko bigarren ekuazioa ezabatu daiteke eta beste biak hurrengo itxura hartzen dute:

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} = \mu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \\ \frac{\partial p}{\partial z} = \mu \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \end{cases} \quad (5.6)$$

Lehen ekuazioa bi aldiz integratuta eta,  $y=0$  denean  $u=U_1$  eta  $y=h$  denean  $u=U_2$  ingurune baldintzak aplikatuz, x norabideko jariakinaren abiaduraren osagaia lortzen da:

$$u = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} y(y-h) + \left(1 - \frac{y}{h}\right) U_1 + \frac{y}{h} U_2 \quad (5.7)$$

Modu berdinean, beste osagaia atera daiteke:

$$w = \frac{1}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial z} y(y-h) \quad (5.8)$$

Azkenik, 5.5 jarraitutasun ekuazio integratuz jariakinaren lodieran zehar, Reynolds-en ekuazio generalizatua lortzen da:

$$\begin{aligned}
 \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{\rho h^3}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \right) \\
 = 6 \frac{\partial}{\partial x} [\rho h (U_1 + U_2)] - 12 \rho U_2 \frac{\partial h}{\partial x} + 12 \rho V + 12 \rho h
 \end{aligned} \quad (5.9)$$

Kojinete hidrostatikoko planoak kontsideratuz,  $U_1$  eta  $U_2$  gainazalen abiadurak ez daude koordinatuen menpe. Gainera, olioaren kapa finean dentsitatea eta biskositatea konstantetzat hartzen dira eta beraz,  $V$  abiadura hurrengo erara idatzi daiteke.

$$V = U_2 \frac{\partial h}{\partial x} + \dot{h} \quad (5.10)$$

Honela ekuazioa sinplifikatu egiten da.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \mu U \frac{\partial h}{\partial x} + 12 \mu \dot{h} \quad (5.11)$$

Non  $U = U_1 + U_2$ .

Demagun orain biraketako kojinete bat dugula,  $x = \Theta R$  eta  $y$  koordinatu tangenziala eta erradiala izanik hurrenez hurren. Kasu honetan ere  $U$  eta  $V$  ez direla  $\Theta$ -rekiko independenteak izango. Ardatzaren gainazaleko edozein punturen abiadura, bere ardatzaren abiadura eta ardatzaren inguruko abiaduraren batura bektoriala izango da. Beraz, ardatzaren abiadura erradiala eta axiala hurrengo eran idatz daitezke.

$$U = \dot{e} \sin(\Theta - \phi) - \dot{e} \cos(\Theta - \phi) + \Omega \frac{D}{2} \quad (5.12)$$

$$V = \dot{e} \cos(\Theta - \phi) - \dot{e} \sin(\Theta - \phi) + \Omega \frac{\partial h}{\partial \Theta}$$

$U_1 = 0$ ,  $\mu = k\tau e$  eta  $\rho = k\tau e$  suposatuz, 5.9 ekuazioa hurrengo eran geratzen da.

$$\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \Theta} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \Theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 12 \mu \left[ \frac{-U}{D} \frac{\partial h}{\partial \Theta} + V + \frac{h}{D} \frac{\partial U}{\partial \Theta} \right] \quad (5.13)$$

5.12 ekuaziotik garbi ikusten da  $V = \partial U / \partial \Theta + \Omega \partial h / \partial \Theta$ . Gainera  $h \ll D$ enez 5.13 ekuazioaren eskubiko aldea hurrengo eran idatz daiteke

$$12\mu \left( \frac{-U}{D} \frac{\partial h}{\partial \theta} + \frac{\partial U}{\partial \theta} + \Omega \frac{\partial h}{\partial \theta} \right) \quad (5.14)$$

Aurreko adierazpena eta 5.12 adierazpenak ordezkatur, eta jariakinaren lodiera ordezkatur,

$$h = C + e * \cos(\theta - \phi) \quad (5.15)$$

5.13 ekuazioak hurrengo itxura hartzen du

$$\begin{aligned} \frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) \\ = 12\mu \left( \dot{e} [\cos(\theta - \phi) - \frac{e}{D} \sin^2(\theta - \phi)] + e \left( \dot{\phi} - \frac{\Omega}{2} \right) \sin(\theta - \phi) \right) \end{aligned} \quad (5.16)$$

Azken ekuazioan  $\sin^2$ -ari proportzionala den terminoa anulatu daiteke batz bestea, beste terminoak baino txikiagoa delako eta honela biraketako kojinetentzako Reynolds-en adierazpena lortzen da.

Reynolds-en beste forma bat oso erabilia da,  $\theta$  koordenada angeluarra erabiltzen duena, non bere hasiera jariakinaren lodiera maximoa den puntuan den. Honela jariakinaren lodieraren adierazpena eta bere deribatuak hurrengoak dira.

$$\begin{aligned} h = C + e * \cos(\theta) \quad \frac{\partial h}{\partial \theta} = -e * \sin(\theta) \\ \frac{\partial h}{\partial t} = \dot{e} * \cos(\theta) - e \dot{\theta} * \sin(\theta) = \dot{e} * \cos(\theta) - e \dot{\phi} * \sin(\theta) \end{aligned} \quad (5.17)$$

Honela, Reynolds-en ekuazioa jariakin konprimaezin eta isobiskosoentzat hurrengo adierazpena oso erabilgarria da biraketako kojinetetan.

$$\frac{1}{R^2} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 12\mu \left( \dot{e} * \cos(\theta) + e \left( \dot{\phi} - \frac{\Omega}{2} \right) \sin(\theta) \right) \quad (5.18)$$

Hainbat metodo daude Reynolds-en ekuaziotik abiatuz kojinete bateko presio distribuzioa ateratzeko baina Reynolds-en ekuazioa askatu ahal izateko ( $p$ -ren adierazpena lortu), hipotesi batzuk hartu behar dira kontuan bestela ezinezkoa da. Hipotesi horiek, besteak beste kojinete oso luze bat edo oso motz bat kontuan hartzea dira honela Reynolds-en ekuazioa osatzen duten bi parametroetako bat ezabatu daitekalarik.

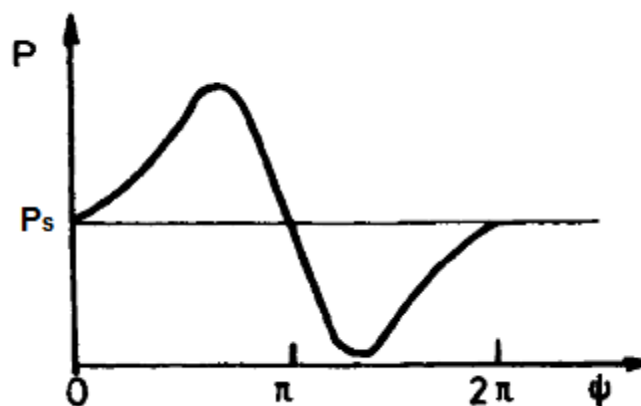
Reynolds-en ekuazioa askatzerakoan kojineten hidrodinamikoetan, presio positiboak eta negatiboak agertzen dira. Presio negatiboak, kendu egin behar dira errealitatean kojineten batean ez direlako existitzen. Presio negatibo hauek, ingurune baldintza berezi batzuk aplikatuz ezereztzen dira. Hiru ingurune baldintza existitzen dira, Sommerfeld, Gumbel eta Reynolds. Biraketa kojineten lau baten presio distribuzioa oinarritzat hartu azalduko dira ingurune baldintza hauek.

### Sommerfeld

Sommerfeld-ek, inposatzen duen baldintza hurrengoa da.

$$p(\theta = 0) = p(\theta = 2\pi) = P_s$$

Beraz, presio negatiboak eliminatzen ditu soilik hornitze presioa,  $P_s$  oso altua denean edo karga oso txikietan.

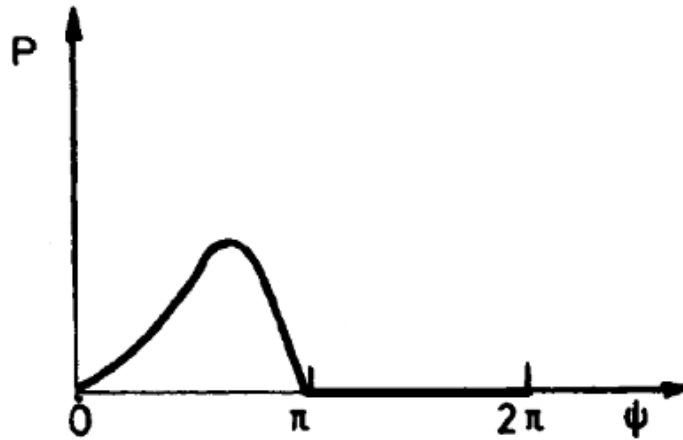


25. Irudia: Sommerfeld

### Gumbel

Gumbel-ek, Sommerfeld-en agertzen diren presio negatiboak eliminatzen ditu. Nahiz eta fisikoki ez den onargarria, metodo hau askotan erabiltzen da emaitza esperimentalen hurbilketa on bat delako.

Hornitze presio erlatiboa zero den kasurako hurrengo grafikoan ikus daiteke Gumbel-en baldintza aplikatutako kojineten baten presio distribuzioa.



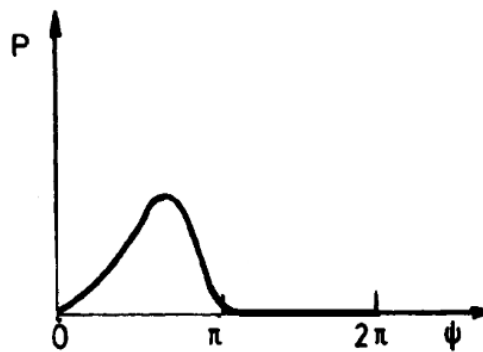
26. Irudia: Gumbel

### Reynolds

Gumble-ren hipotesi berdina jarraitzen du, presio negatibo denak zero bihurtzea, baina jakina denez emari jarriak presio gradientean jarraitutasuna inposatzen duela, zona aktiboa (p+) eta zona ez aktiboaren (p-) artean jarraitutasun bat egon behar da eta beraz Reynolds-ek Gumble-ri hurrengo baldintza gehitzen dio:

$$P(\theta = \theta_s) = \left(\frac{dp}{d\theta}\right)_{\theta=\theta_s} = 0$$

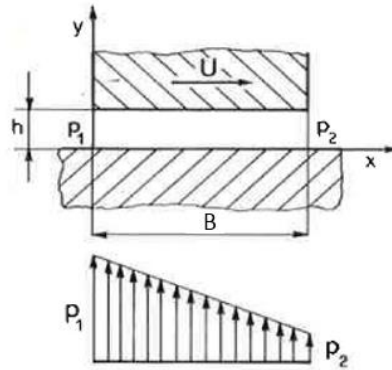
Beraz, presio distribuzioa hurrengo grafikoan ikusten den bezala geldituko litzateke.



27. Irudia: Reynolds

### 5.6.2. BI PLAKA PARALELOEN ARTEKO JARIAKINA

Azkenik, jariakin batek bi plaka paraleloen artean pasatzean duen erresistentziaren adierazpena aterako da. Horretarako suposatuz luzera infinituko gainazal beste gainazal batekiko mugituz U abiadura batekin.



28. Irudia: Bi plaka paraleloen arteko jariakina[4]

Jariakinaren abiadura 5.7 ekuaziotik lortu daiteke:

$$u = \frac{y}{h}U + \frac{h^2}{2\mu} \frac{\partial p}{\partial x} \left( \frac{y^2}{h^2} - \frac{y}{h} \right) \quad (5.19)$$

Abiadura perfila, bi fluxuez osatuta dago.  $U=0$  denean, abiadura perfila parabola bat da, eta parabola honen simetria ardatza  $y=h/2$  altueran dago eta fluxu honi, presio fluxua edo "Poiseuille" fluxua deritzo. Normalean, abiadurak fluxuan eragiten duen efektua,  $Uy/h$  "Couette" fluxua deritzona, parabolari gehitu behar zaio.

Reynolds-en ekuazioa, 5.11, erraz sinplifikatu daiteke luzera infinituko bi plaka paraleloen kasurako:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0$$

Adierazpen hau bi aldiz integratuz gero eta  $p=p_1$   $x=0$  denean eta  $p=p_2$   $x=a$  denean ingurune baldintzak aplikatuz gero, hurrengo adierazpen linearra lortzen da:

$$p = p_1 - (p_1 - p_2) \frac{x}{B} \quad (5.20)$$

5.19 ekuazio integratuz eta bertan 5.20 sartuz, emaria luzera unitateko atera daiteke:

$$q_x = \frac{1}{12} \frac{h^3}{B\mu} (p_1 - p_2) + \frac{h}{2} U$$

L luzera baterako, emariaren adierazpena hurrengo da:

$$Q = Lq_x = \frac{1}{12} \frac{h^3 L}{B\mu} (p_1 - p_2) + \frac{h}{2} U \quad (5.21)$$

Erresistentzia hidraulikoa, presio erorketa eta “Poiseuille” fluxuaren arteko ratioa bezala definitzen da, hau da,  $U=0$ .

$$R = \frac{p_1 - p_2}{Q} = 12\mu \frac{1}{h^3} \frac{B}{L} \quad (5.22)$$

Aipatu beharra dago fluxuak laminarra izan behar duela eta beraz Reynolds-en zenbakiak hurrengo baldintza bete behar duela:

$$\Re = \frac{\rho}{\mu} \bar{u}h < 2000 \quad (5.23)$$

Non  $\bar{u} = \frac{q_x}{h}$ , batz besteko abiadura den.



## 6. GAIAREN EGOERA

Prestazio handiko kojinete hidrostático eta hidrodinamikoaren eskaera gero eta handiagoa da doitasun handiko makina erramintetan. Beraz kojinete horien kalkulua egin ahal izatea oso garrantzitsua da ondoren makinak, funtzionamenduan dagoenean arazorik eman ez dezan.

Orain dela urte batzuk arte, kojinete hauen kalkulu numerikoa ezinezkoa zen ordenagailuen prestazioak ez zirelako nahikoak kalkulatu hauei aurre egiteko. Hardwarea eta softwarea eboluzionatuz joan den heinean, gero eta ingeniartzako arazo konplexu gehiagori bilatu ahal izan zaio irtenbidea erraminta konputazionalak erabiliz. Honela, azken urteotan asko izan dira kojinete hidrostático eta hidrodinamikoaren kalkulua egiteko, JDK-eko programak erabili dituztenak. Programa mota hauek Navier Stoke-ren ekuazioak askatzen dituzte eta beraz beraien erabileraren arrazoiak hurrengoak dira:

- Kalkulu analitikoetan, lehenago esan den bezala Reynolds-en adierazpena askatzen da. Adierazpen horretara iristeko hipotesi batzuk hartu dira kontuan. Gerta daiteke hipotesi horiek balio ez duten kasuren batean egotea; jariakinaren inertzia garrantzitsua izatea, jariakin turbulentua izatea, edo jariakin biskoelastikoa izatea.
- Programa hauetan, forma guztietako kojineteak simulatu daitezke zailtasun handirik gabe, kalkulatu analitiko programetan berriz, aldaketa handiak egin behar dira forma ezberdineko modeloak simulatu ahal izateko.
- Nahiz eta kalkulatu analitikoa bizkorragoa izan, Reynolds-en ekuazioa askatzea Navier Stokes-ena askatzea baino errazagoa delako, gero eta ordenadore hobek askatzea kalkulatu hau nahiko erraz egin dezaketenak.

### 6.1. LEHEN IKASKETAK

Kojineteen mundu honetan lehen modelo numerikoa XX mendearan amaieran egin ziren. Lehena San Andres [5] izan zen eta ondorengo ikasketei bidea ireki zien. Bertan, likido kriogeniko bat eraztun formako junta batean zehar simulatzeko, modelo numeriko termo hidrodinamiko bat egin zuen 1993an. Bere ondorioetan aipatzen da modelo numerikoekin lortutako emaitzak eta sinplifikatutako modelo analitikoekin lortutakoak antzekoak direla, honela JDK-tik lortutako emaitzak ontzat joaz.

Hurrengo ikasketa P G Tucker-ek [6] egin zuen. Bere ikasketan biraketa kojinete lau baten JDK batek askatzen dituen ekuazioak azaltzen ditu, bere abantailak eta limitazioak aipatuz. JDK-tik lortutako emaitzak, ordurako eginak zeuden proba esperimentalekin

alderatzen ditu. Topatutako limitazioen artean, oraindik ere JDK batean kabitazioa ondo definitzea eta tenperatura distribuzio ona lortzea daude besteak beste.

Jarraian, P S Keogh-ek [7] JDK erabili zuen bi arteka axial dituen biraketako kojineten baten aurreikuspen termikoak egiteko. Horretarako aldagai ezberdinak probatuz kalkulu ezberdin asko egiten zituen eta termikoki gehien eragiten duten parametroak zein ziren ondorioztatu zuen. Horrela kalkulu asko modu erraz batean egiteko erraminta on bat zela demostratu zen

Ondoren, James H Ball-ek [18] bultzada kojineten aplikazio ezberdinetarako kontuan eduki beharreko diseinu parametroen ikasketa egin zuen. Reynolds-en ekuazioak ematen zizkion emaitzak baino zehaztasun handiagoa lortu asmoz erabili zuen JDK, lehenago azaldu bezala, Reynoldsek kontuan hartzen ez dituen hipotesi batzuk kontuan hartzen dituelako. Ondorioetan aplikazio bakoitzerako behar den bultzada kojinetek diseinatzeke orduan JDK-k duen malgutasuna (diseinu ezberdin asko azkar simulatzeko gaitasuna) azpimarratzen du.

Azkenik J. X. Zhang-ek [8] bultzada kojinete batean tartean eta arteketan jariakinaren inertziak aztertzeke erabili zuen JDK. Horretarako erabiltzen duen sarea hurrengoa da: tartean 8 elementu sartu zituen eta sarearen nodoen arteko distantzia uneoro  $10^{-2}$  baino txikiagoa zen. Ondorioetan aipatzen du JDK-ri esker geometrikoki konplexuak diren kojineten simulazioak egin daitezkeela emaitza onak lortuz.

Orain arte aipatutako ikasketetan, norberak egindako JDK-rako kodeak erabili zituzten simulazioak egiteko. Beraz kode bakoitza, ikasketa bakoitzean simulatzen den kojinete motara dago egokituta. Ikasketa hauek, ondorengoei bidea ireki zieten, nolabait JDK erraminta ziur bat dela ondorioztatu baitzuten.

## 6.2. AZKEN URTEETAN

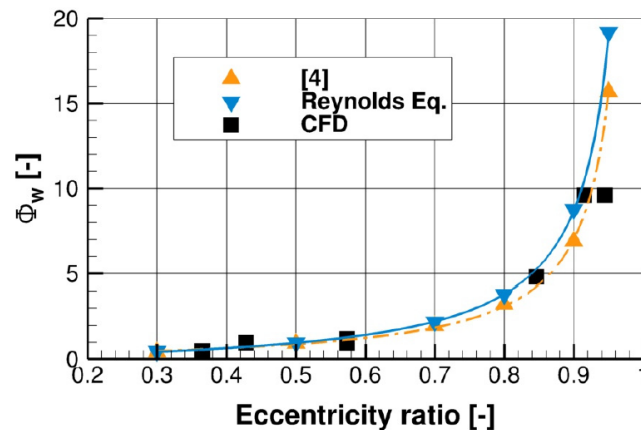
JDK-ren inguruko ikasketa gehienak mende honetakoak dira, bai ordenagailuak eta baita softwareak ere asko garatu direlako. Ondorengo ikasketa hauetan JDK komertzialak erabiltzen dira. Orain arte egindako ikasketen artean, bi talde bereiziko dira, batetik JDK soilik erabiltzen dutenak, hau da, jariakinaren jarrera aztertu nahi dutenak eta bestetik JDK erabiltzen dutenak ondoren kalkulu estrukturala egiteko.

### 6.2.1. JDK-ren INGURUKO IKASKETAK

P. Brajdic-Mitidieri-k [9] egindako ikasketan, euskarri lineal bat simulatu zuten barrunbe batek kojinete baten marruskadura koefizientean duen eragina aztertzeke, lehenik beste ikasketa batean garatutako FOAM kodea erabiliz. Ikasketan helburu ziren emaitzak lortzen hasi aurretik JDK-ko modeloaren balioestea egin zuten. Horretarako bi simulazio ezberdin egin zituzten. Batetik tartea bakarrik barrunberik gabe eta sare tamaina ezberdinekin simulatu zuten eta Reynolds-en ekuaziotik lortutako balorearekin alderatu

zuten. Hemendik lortu nahi zen zehaztasunaren arabera tartean erabili beharreko elementu tamaina ondorioztatuz. Bestetik, lehengo modeloari barrunbea gehitu eta hau ere tamaina ezberdineko elementuekin saretu zuen, bakoitzetik presioa maximoa eta indarra kalkulatu eta egokiena hartzeko. Honela, ikasketan simulatu beharreko modelooren sarea definituta eta balioestatua gelditu zen.

Moskun egindako beste ikasketa batean [10] biraketa kojineten kalkulua egiteko ANSYS CFX erabili zuten. Simulazioak hiru jariakin ezberdinekin egin zituzten, olioia, ura eta airea. Lan honetan aipatzen da, beste lan baten ondorio bezala 77 milioi nodo arte diferentziak ikus zitekeela presioaren pikoetan. Baina kostu konputazionala eta behar den zehaztasuna kontuan hartuz, olioaren kasuan beraiek erabilitako sarea 4662240 nodoz osatuta zegoen.



29. Irudia: Reynolds eta CFD [10]

Lan honetan ondorioztatzen da JDK-tik lortutako emaitzak onak direla eszentrikotasun oso handiak ez diren arte. Hau 29. Irudian ikus daiteke, bertan olioaren kasurako lortutako emaitzak daude irudikatuta, Reynolds-enarekin batera eta beste emaitza teoriko batzuekin batera.

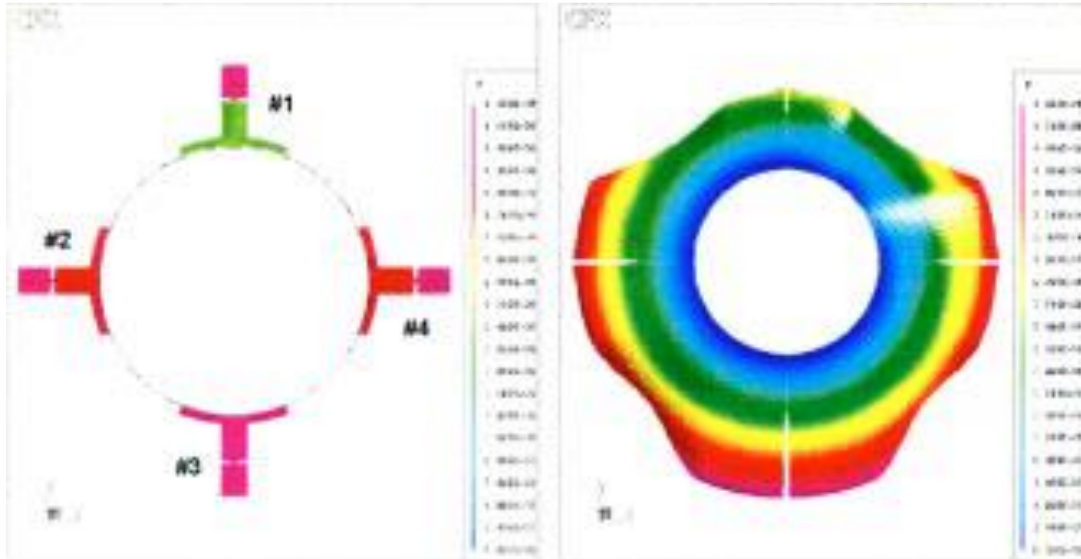
Priyanka Tiwari-k eta Veerendra Kumar-ek [11] biraketa kojinete baten kalkulu analitikoa eta numerikoa egin zuten bien emaitzak alderatzeko. Horretarako infinituki luzea den biraketa kojinetearen hipotesia erabili zuten, kalkulu analitikoa sinplifikatua izateko. JDK kalkuluan erabilitako modelooren sareak, 7290579 nodo zituen. Modelo honekin lortutako emaitzak ontzat jo zituzten eta beraz JDK balioztatutzat jo.

Zenglin Guo-k [12] biraketa kojinete ezberdinen analisia egin zuen CFX-TASC izeneko JDK erabiliz. Bertan biraketako kojinete hidrostático, hidrodinámico eta hibridoen simulazioen emaitzak azaltzen dira eta baita konpentsatzaileko kojinete hibrido batenak ere.

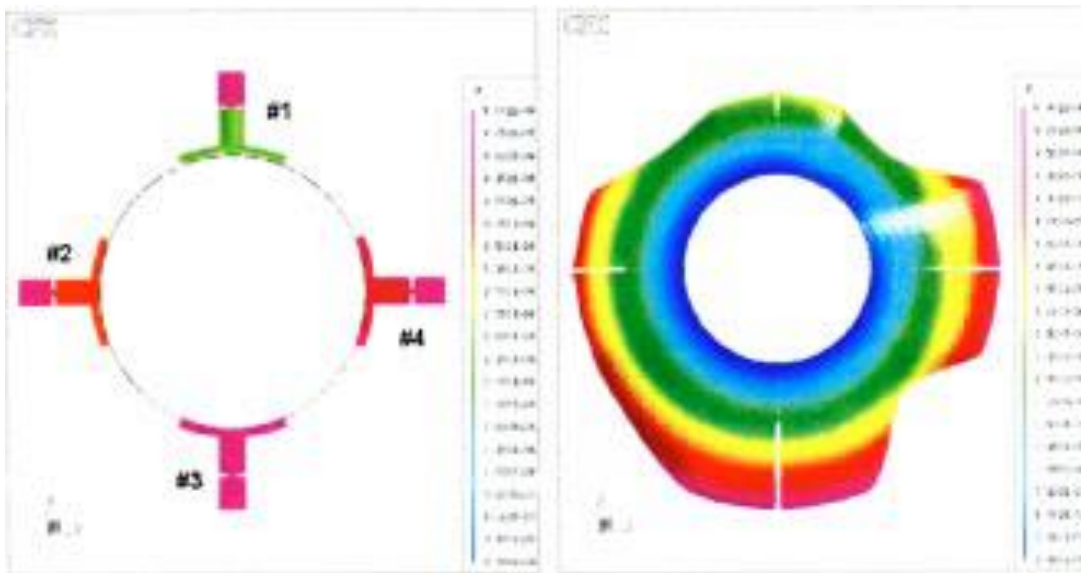
Kalkulu hidrodinamikoan sare ezberdinak erabiltzen ditu eta sarearen tamainaren arabera simulazioak iraun duen denbora aipatzen du. Lortutako emaitzak, kalkulu analitikoak

egiteko beste software batzuk emandako emaitzekin alderatu zituen. Bertan ikus daiteke lortutako emaitzak onak direla.

Ondoren kalkulu hidrostatikoa eta hibridoa egin zituen eta zulo konpentsatzaileak sartu zituen eta berriz kalkulu hidrostatikoa eta hibridoa egin zituen. Hurrengo irudietan ikus daitekeen bezala emaitzak itxura ona dute.



30. Irudia: Biraketa kojineteko hidrostatikokoaren presio distribuzioa



31. Irudia: Biraketa kojineteko hibridoaren presioa distribuzioa

Irudietan ikus daitekeen bezala, ardatzari eszentrikotasun bat eman zion beherantz. Lau zulo konpentsatzaileen sarreraren sarrerako presioa berdina da eta konpentsatzailearen ondoren eszentrikotasunaren ondorioz presio ezberdina lortzen da barrunbetan. Hibridoaren kasuan, barrunbetako presioaz gain, ardatzak duen abiaduraren ondorioz barrunbeen artean efektu hidrodinamikoaren ondorioz presioa sortuz.

Xiadong Yu [13] egindako ikasketan berriz, euskarri anizkoitzdun bultzada kojineten bat simulatu zuen barrunbearen sakonera ezberdinekin eta ardatzaren biraketa abiadura ezberdinekin, bi parametro hauek presioan duten garrantzia kuantifikatzeko asmoz. Erabilitako softwarea CFX izan zen eta modelo egiterako orduan, euskarri bakarria simulatu zuen eta bera saretzeko erabilitako elementu kopurua 265000 inguru izan zen. Honela lortutako emaitzak emaitza teorikoen antzekoak izan ziren.

### 6.2.2. JDK-FSI IKASKETAK

Jariakina aztertzeaz gain ikasketa hauek jariakina beraien barnean hartzen duten elementuetan duen eragina aztertzen dute. Azken urteotan gai honi buruzko ikasketa asko egin dira, esanguratsuenak hurrengoak izanik.

Lu Lihua-k [14] biraketa kojineten hidrostatikoen baten zurruntasun estatikoaren ikasketa egin zuen JEI erabiliz. JDK egiteko FLUENT erabili zuen eta analisi estrukturala egiteko berriz ANSYS. Lehenik JDK erabili zuen sarrera moduan ardatzaren biraketa abiadura sartuz eta bertatik, jariakinak kojinetean eragindako presioa eta temperatura aldaketak kalkulatu zituen. Ondoren, bi aldagai hauek FSI-ren sarrera bezala sartu zituen eta kojineten zurruntasun estatikoa kalkulatu zuen. Ondorioetan aipatzen du, jariakinaren eragina kontuan hartzeagatik, zurruntasun estatikoa %78 jaisten zela. Beraz ikasketa honetan garbi geratzen da JDK bezalako erraminta baten erabileraren garrantzia kojineten bat diseinatzerako momentuan.

S.Chaitanya Kumar-ek eta R. Ganapathi M.Tech-ek ere JEI metodoa erabili zuten kasu honetan jariakinaren ondorioz kojinetean ematen diren deformazioak kalkulatzeko [15]. Aurreko kasuan bezala hemen ere FLUENT eta ANSYS erabiltzen dira eta emaitzetan ikus daitekeen bezala jariakinaren ondorioz kojinetean ematen diren deformazioak ez dira mespretxagarriak eta kontuan hartu behar dira kojineten diseinatzerakoan.

Azkenik, gai honen inguruan egin den azken ikasketa urte honetako da eta Indiako irakasle eta ikasle talde batek egin du [17]. Bertan biraketa kojineten lau baten kalkulu ezberdinak egin dituzte eszentrikotasun ezberdinak eta olio ezberdinak erabiliz. Horretarako ANSYS erabiltzen dute, lehenik jariakinak kojinetean eragiten duen presioa kalkulatzeko eta ondoren kojinetean tentsioak eta deformazioak kalkulatzeko presio horren eraginez. Kalkulu ezberdinen alderaketak egiten dituzte eta biraketa kojinetek emaitza onenak ematen dituen eszentrikotasuna eta olioaren zein den erabakitzen dute.

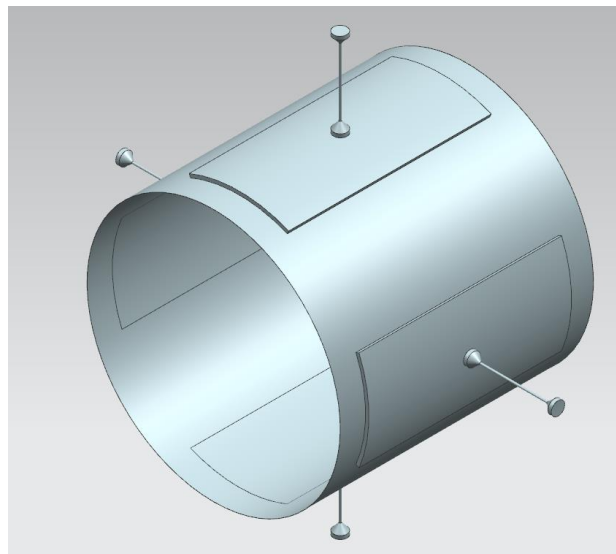
Orain arte egindako ikasketak ikusita, garbi dago kojinetek eta JDK arteko lotura orain dela gutxikoa dela eta ezagutza ez dela handia. Gainera gehienek erabiltzen duten softwarea ANSYS da. Ikasketa hauetatik abiatuz, lan honetan orain arte ezezaguna den software bat erabiliko da NX-FLOW.

## 7. HELBURUAK ETA HELMENA

Proiektu honen helburua, makina erramintan erabiltzen diren kojineten hidrostato hidrodinamiko eta batez ere hibridoaren kalkulurako eta simulaziorako bi erramintak ezagutzera eragotzea izan da.

Erabili diren erramintak, MATLAB eta NX FLOW izan dira. Erraminta hauek erabiltzeko modua guztiz ezberdina da eta bakoitzak bere abantaila eta desabantailak ditu. Bi irizpide jarraitu dira nagusiki software bakoitzak dituen abantaila eta desabantailak baloratzeko, batetik azkartasuna eta bestetik malgutasuna. Azkartasuna soluzioa lortzeko behar den denborarekin baloratu da eta malgutasuna berriz, modelo batetik beste modelo batera aldatzeko erraztasunarekin.

Proiektuaren helburuak kontuan hartuta, bere helmena ondorengo irudian agertzen den bezalako kojineten batek ematen duen zurruntasuna kalkulatzeko da aurrerago aipatutako bi erramintak erabiliz, sarrerako parametroak edozein direla ere.



32. Irudia: Kojinete hibridoa

32. Irudian ikus daitekeen bezala, helburua kapilar konpentsatzaileko kojineten hibrido bat simulatzea da. Gainera eszentrikotasun ezberdinak aplikatuko zaizkio bere zurruntasun estatikoa eta dinamikoa kalkulatzeko. Zurruntasunaren kalkulua NX-FLOW-en eta MATLAB-en egingo da eta zurruntasun teorikoarekin alderatuko dira.

Beste helburu bat, IK4-IDEKOn dauden kojineten zirkular eta linealen entsegu bankuen prestaketa izan da, etorkizun batean martxan jarri ahal izateko.

## 8. PROIEKTUAREN ONURAK

Proiektuaren helburuak kontuan hartuta, proiektua amaitzean kojinetek simulatzeko erraminta egoki bat izango da. Beraz honek onura teknikoak eta ekonomikoak izango ditu.

### 8.1. ONURA TEKNIKOAK

Onura teknikoa nabarmena da. Kojineteen simulaziorako erraminta potente bat edukitzeaz aparte, erraminta horrek dituen onurak eta limitazioak ezagutuko dira. Beraz kojinete ezberdin asko simulatu ahalko dira modu azkar batean eta ondoren emaitza onenak ematen dituztenak, etorkizunean martxan egongo diren entsegu bankuetan probatu ahal izango dira.

Kojineteak alde batera utzita, proiektua hau amaitzean jariakinen simulaziorako erraminta potente baten ezagutza izango da eta honek IK4-IDEKOri merkatua handitzen dio, besteak beste, deformazio termikoetan, mekanizazioko refrigerazioetan eta lubrikazio dimentsionalean...

### 8.2. ONURA EKONOMIKOAK

Onura ekonomikoei dagokienez, simulaziorako erraminta bat edukitzeak, kojinete bat ondo ala gaizki egitearen arteko diferentzia marka dezake. Demagun gure bezero den enpresa txinatar bati guk saldutako makinan biraketa kojinetek apurtzen zaiola gaizki diseinatua izan delako. Akats horren kostua hurrengo eran banatuko litzateke:

- Kojinete bat apurtzen denean, kojinetek eta bere ardatzaren arteko talkarengatik izaten da. Beraz ardatza, kojinetek eta montaje osoa aldatu behar da = 3000€
- Langile bat bidali behar da gutxienez astebeterako, gastuak eta langilearen solda= 5000€
- Kojinetek oraindik garantian badago, enpresa txinatarrek produkzioa geldirik edukitzearen kostua, gure gain eroriko da, eguneko kostua produkzioa geldirik edukitzeagatik=1500€ (hau noski enpresaren araberakoa da).

Beraz 15000 € inguruko gastuaz hitz egiten ari gara kojinete bat gaizki diseinatzeagatik. Ondoren aurrekontuan ikusiko den bezala, NX-Flow-ren lizentzia urtean 8000 € ordaintzen da. Beraz onura ekonomikoa nabarmena da.

---

## 9. ALTERNATIBEN ANALISIA

Proiektua gehienbat kojineten simulazioan zentratuko denez, simulazioak egiteko erabili ahal diren software ezberdinen analisia egin da. Horretarako, bi software mota hartu dira kontuan; MATLAB eta NX-FLOW.

### **MATLAB**

MATLAB-ena abantaila nagusia da, IK4-IDEKO-n iadanik badagoela programa bat MATLAB-en egin kojineten simulaziorako. Gainera, oso erraz erabiltzen da eta nahikoa da kojinetearen neurri denak sartzeta eta emaitza oso azkar lortzen da.

Desabantailen artean, programa limitatuta dago barrunbe laukietara eta barrunbearen forma aldatu nahi izateak, programa osoa aldatzera derrigortzen du. Nahiz eta MATLAB-ko hizkuntza ez izan programaziozko softwaretan bezain konplikatu, ez da erreza holako programa batean gauzak aldatzea.

### **NX-FLOW**

JDK batek duen abantaila nagusia malgutasuna da, aurreko kasuan baino askoz errezago aldatu daiteke kojinetearen geometria simulazio batetik beste simulazio batera. Kontua da geometria berri bat modelizaten, saretzen eta ingurune baldintzak jartzen zenbat denbora tardatzen den. Erraminta hau interesgarria izan dadin, prozedura horrek azkarra izan behar du bestela ez du zentzurik JDK bat erabiltzeak, berak ematen duen abantaila ez bada berez abantaila bat.

Beste aldetik, duen desabantaila modelo bakoitza simulatzeko behar duen denbora da. Denbora hau sarea sortzean sartu diren nodo kopuruaren araberakoa da. Beraz ahalik eta nodo gutxien sartzeta komeni da baina beti ere emaitzen zehaztasuna galdu gabe.



## 10. ARRISKUEN ANALISIA

Proiektua egiten den bitartean, hainbat arazo sor daitezke proiektuaren amaitze epeak atzeratu ditzaketenak. Arrisku horiek hurrengoak izan daitezke:

- Sarearekin arazoak: Egiten den guztia sarean gordetzen da, ordenadorean gordetzea baino seguruagoa delako, baina sarea erori daiteke eta beraz ezin dira sarean dauden artxiboak ireki. Arazo honek proiektua ordu batzuk atzeratu dezake, gehienez egun bat (egunero “back up”-a egiten delako).
- Lizenziarekin arazoak: Proiektua egin ahal izateko, NX-FLOW lizentzia izatea derrigorrezkoa da. Proiektuan zehar gerta daiteke software honen lizentzia arazoak izatea eta proiektuan aurrera ezin jarraitu izatea. Arazo honek sor dezaken atzerapena, egun batzuetakoa izan daiteke.
- Ordenadorearekin arazoak: Bakoitzak bere ordenadorea du eta simulazioak egiteko beste ordenadore bat dago. Ordenadore horri zerbait gertatuz gero, ezingo dira simulazioak egin. Atzerapena ordenadoreak duen arazoaren araberako izango da, pare bat asteko kontua izan daiteke.
- Lana, informazioa, datuak...galtzea: Nahiz eta sarean lan egin eta egindako dena bertan gorde, birus batek sarea baliogabetu dezake eta egindako lana ezabatu. Atzerapena galtzen den dokumentuaren garrantziaren araberakoa izango da, egun bat edo hilabete edo lana berriz hasi beharra ere gerta daiteke.

		PROBABILITATEA	
		BAXUA	ALTUA
ONDORIOAK	ARINA	Lizenziarekin arazoak	Sarearekin arazoak
	LARRIAK	Lana, informazioa galtzea	Ordenadorearekin arazoak

I. Taula. Arriskuak

# 11. METODOLOGIA

## 11.1. KALKULU NUMERIKOA MATLAB ERABILIZ

MATLAB-en batetik, biraketako kojineten baten kalkulua egiteko programa nola egin beharko litzatekeen azalduko da eta bestetik, MATLAB-ek duen deribatu partzialetako ekuazioak askatzeko erraminta azalduko da, PDE-TOOL izenekoa.

### 11.1.1. KODIGOAREN AZALPENA

Biraketako kojineten baten kalkulua konplexuak dira, barrunbeentzako fluxua trukatzeko delako eta beraz, barrunbe bateko presioa ez da soilik konpentsatzailearen arabera, ondoko barrunbetako presioaren arabera ere bada. Hainbat modu daude kojineten mota hauen kalkulurako, horietako bat, atal honetan azalduko dena da.

Alde batetik, presio hidrostatiakoak kalkulatu dira eta bestetik, presio hidrodinamiakoak. Ondoren, bi presio eremuak batuko dira kojineten jasan dezakeen indarra kalkulatzeko.

Lehenik, barrunbe guztietan dagoen presio hidrostatiakoak kalkulatu dira. Esan den bezala, barrunbe bakoitzeko presioan eragina du ondoko barrunbetako presioak. Kalkulu hau egiteko, ondoren azalduko den erresistentzia hidraulikoen metodoa erabiliko da.

$i$  barrunbetatik ateratzen den emaria hiru zatitan banatu daiteke:  $q_i^{(-)}$ ,  $i-1$  barrunbera joango da,  $q_i^{(+)}$ ,  $i+1$  barrunbera (fluxu zirkunferentzialak) eta  $q_i^{(0)}$  axialki kojineten kanpoaldera. Noski hurrengoak betetzen direla  $Q_i = q_i^{(-)} + q_i^{(+)} + q_i^{(0)}$  eta  $q_i^{(-)} = q_{i-1}^{(+)}$ .  $q_i^{(+)} = q_{i+1}^{(-)}$  bakoitza kojineten konfigurazio geometrikoaren arabera da ( $\epsilon, \phi$ ) eta baita barrunbearen presioaren arabera ere. Beraz:

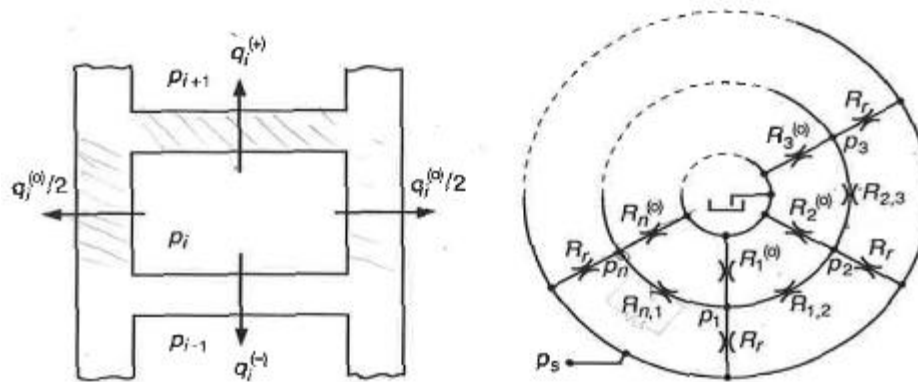
$$q_i^{(0)} = \frac{p_i}{R_i^{(0)}} \quad q_i^{(-)} = \frac{p_i - p_{i-1}}{R_{i,i-1}} \quad q_i^{(+)} = \frac{p_i + p_{i+1}}{R_{i,i+1}} \quad (11.1)$$

$R_i^{(0)}$  eta  $R_{i,j}$  erresistentzia hidraulikoak gainazal errektangularretan Reynolds-en ekuazioa garatuz kalkulatu daitezke, fluxua zirkunferentzialki edo axialki soilik mugitu daitekeen hipotesia erabiliaz. Beraz biraketa abiadura txikientzat eta  $\phi=0$  den kasurako hurrengoak dugu:

$$R_i^{(0)} = \frac{12 a \mu}{D C^3} \frac{1}{\int_{\frac{\pi}{n}(2i-3)}^{\frac{\pi}{n}(2i-1)} (1 - \varepsilon \cos(\alpha))^3 d\alpha} \quad (11.2)$$

$$R_{i,i+1} = R_{i+1,1} = \frac{6 \mu \theta D}{L \left(1 - \frac{2a}{L}\right) C^3} \frac{1}{1 - \varepsilon \cos \left[\frac{\pi}{n} (2i - 1)\right]^3}$$

Behin erresistentzia hidraulikoak ditugula, Pi barrunbeko presioak erraz lortu daitezke kojinetea erresistentzia hidraulikoz osatutako sare bat bezala irudikatuz.



33. Irudia: Erresistentzia hidraulikoen metodoa[4]

Barrunbe bakoitzean, emari balantze bat egin behar da, sartzen dena=irteten dena, baina nola barrunbeak elkar baldintzatzen duten, ekuazio sistema bat lortzen da, matrize moduan irudikatu daitekeena hurrengo eran:  $[A] * \{Pr\} = \{b\}$ . Adibide moduan 4 barrunbedun kojinetete bat hartuz, hurrengo eran idatziko lirateke matrizea eta bektoreak.

$$A = \begin{bmatrix} \frac{1}{R_1^0} - \frac{1}{R_{res1}} - \frac{1}{R_{12}} - \frac{1}{R_{41}} & \frac{1}{R_{12}} & 0 & \frac{1}{R_{41}} \\ \frac{1}{R_{12}} & -\frac{1}{R_2^0} - \frac{1}{R_{res2}} - \frac{1}{R_{23}} - \frac{1}{R_{12}} & \frac{1}{R_{23}} & 0 \\ 0 & \frac{1}{R_{23}} & -\frac{1}{R_3^0} - \frac{1}{R_{res3}} - \frac{1}{R_{34}} - \frac{1}{R_{23}} & \frac{1}{R_{34}} \\ \frac{1}{R_{41}} & 0 & \frac{1}{R_{34}} & -\frac{1}{R_4^0} - \frac{1}{R_{res1}} - \frac{1}{R_{41}} - \frac{1}{R_{34}} \end{bmatrix}$$

$$Pr = (P_1, P_2, P_3, P_4)$$

$$b = \left( \frac{-P_s}{R_{res1}}, \frac{-P_s}{R_{res2}}, \frac{-P_s}{R_{res3}}, \frac{-P_s}{R_{res4}} \right)$$

Honela, barrunbe bakoitzeko presio hidrostatikoa lortzen da.

Ondoren, kojinetete osoko presio hidrodinamikoa kalkulatu da. Horretarako, Reynolds-en adierazpenetik abiatu da.

$$\frac{\partial}{R^2 \partial \theta} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( h^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6 \mu \omega \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (11.3)$$

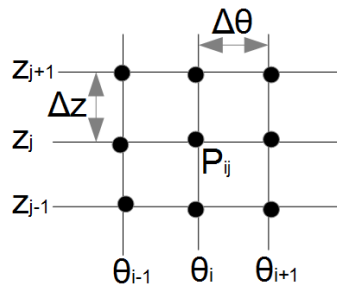
Hemendik hurrengo erako deribatu partzialen ekuazioa lortu nahi da.

$$AP_{\theta\theta} + BP_{zz} + DP_{\theta} = E$$

Horretarako eragiketa erraz batzuk eginik eta kontuan hartuz  $h = C + e \cos(\theta)$  dela, hurrengora iristen da.

$$\frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} + R^2 \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} + \frac{3}{h} \frac{\partial h}{\partial \theta} \frac{\partial p}{\partial \theta} = \frac{6 \mu \omega R^2}{h^3} \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (11.4)$$

Beraz lortu da nahi zen adierazpenaren itxurara lortu da. Deribatu partzialen ekuazio hori askatu ahal izateko, diferentzia finituen metodoa erabiliko da. Horretarako, deribatu partzial horri dagokion eremua diskretizatu behar da, hau da, saretu egin behar da. Gure kasuan, sare horren aldagaiak,  $z$  eta  $\theta$  izango direlarik, beraz:



#### 34. Irudia: Diferentzia finituetako sarea

Behin ekuazioa askatu nahi den ingurua saretu dugula, diferentzia finituen metodoak egiten duena, hurrengo hurbilketa da.

$$P_{\theta} \cong \frac{P(\theta + \Delta\theta, z) - P(\theta - \Delta\theta, z)}{2\Delta\theta} = \frac{P_{i+1,j} - P_{i-1,j}}{2\Delta\theta} \quad (11.5)$$

Beraz egiten duena zera da,  $P$ - $\theta$  grafikoan  $\theta$  puntuko grafikoaren tengentea, hurrengo puntua ( $\theta + \Delta\theta$ ) eta aurrekoa ( $\theta - \Delta\theta$ ) elkartzen dituen zuzenarekin ordezkatzeko du. Beraz argi ikusi daiteke, zenbat eta saretze hobe egin ( nodo gehiago), orduan eta hurbiltze hobeagoa izango dela baina noski, eragiketak ere konplikatu egingo dira kalkulatu beharreko presioak gehiago direlako.

Bigarren mailako deribatu partzialak, lehen mailakoekin egindako hurbilketak deribatuz lortzen dira. Honela hurrengo adierazpenak lortuz.

$$\begin{aligned}
 P_{\theta\theta} &\cong \frac{P_{\theta}\left(\theta + \frac{1}{2}\Delta\theta, z\right) - P_{\theta}\left(\theta - \frac{1}{2}\Delta\theta, z\right)}{\Delta\theta} = \frac{P_{i+1,j} - 2P_{i,j} + P_{i-1,j}}{\Delta^2\theta} \\
 P_{zz} &\cong \frac{P_z\left(\theta, z + \frac{1}{2}\Delta z\right) - P_z\left(\theta, z - \frac{1}{2}\Delta z\right)}{\Delta z} = \frac{P_{i,j+1} - 2P_{i,j} + P_{i,j-1}}{\Delta^2 z}
 \end{aligned} \tag{11.6}$$

Behin hurbilketa hauek eginda, lortu dugun deribatu partzialen ekuazioan ordezkatu behar dira eta honela, nodo bakoitzaren presioaren adierazpen bat lortzen da inguruko lau nodoen presioen menpe.

$$\begin{aligned}
 \frac{R^2}{\Delta^2 z} P_{i,j+1} + \left(\frac{1}{\Delta^2\theta} - \frac{3}{2h} \frac{\partial h}{\partial\theta} \frac{1}{\Delta\theta}\right) P_{i-1,j} + \left(\frac{-2}{\Delta^2\theta} - \frac{2R^2}{\Delta^2 z}\right) P_{i,j} \\
 + \left(\frac{1}{\Delta^2\theta} + \frac{3}{2h} \frac{\partial h}{\partial\theta} \frac{1}{\Delta\theta}\right) P_{i+1,j} + \frac{R^2}{\Delta^2 z} P_{i,j+1} = \frac{6\mu\omega R^2}{h^3} \frac{\partial h}{\partial\theta}
 \end{aligned} \tag{11.7}$$

Kalkulu hidrodinamikoak bukatzeko, ingurune baldintzak jarri behar dira. Kasu honetan, jarri behar diren baldintzak dira  $z=L/2$  eta  $z=-L/2$  denean, presioa zero dela (atmosfera).

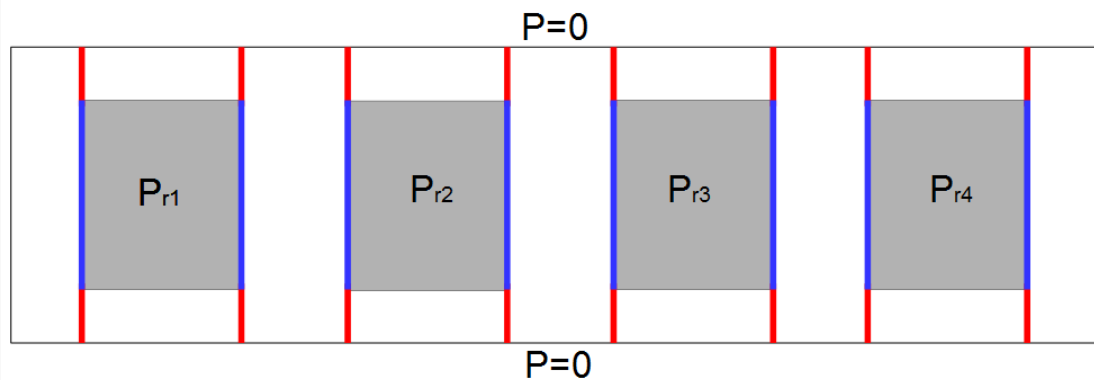
Barrunbeko presioak ateratzeko egin den bezala, kasu honetan ere presioaren adierazpen denak, ingurune baldintza eta guzti matrize moduan jar daitezke  $[A]+\{P_{ij}\}=\{b\}$ . A matrizean 11.7 ekuazioko P ezberdinen konstanteak jarriko dira modu egokian eta b bektorean, eskuineko zatia. Kontuan hartu behar da, kojineten osoko presio hidrodinamikoak kalkulatu ari garenez, barrunbeak dauden lekuetan, h, berezko h+barrunbeko altuera dela.

Behin presio distribuzioa aterata, analitikoki zenbakiak soilik direnez, presio negatiboak agertuko dira. Badakigunez egoera errealean kojinetean presio negatiborik ez dela emango, Gumble-ren hipotesia jarraituko da eta presio negatibo guztiak zero bihurtuko dira.

Behin presio hidrodinamikoak kalkulatu, presio hidrostatoak falta dira. Horretarako lehenik, barrunbearen artean dagoen gainazal eremuetako presio hidrostatoak kalkulatu behar da. Presio hauek kalkulatzeko, presio hidrodinamikoak kalkulatzeko jarraitu diren pauso berdina jarraitu behar dira, aldatzen den bakarra da  $\omega=0$  dela eta beraz Reynolds-en ekuazioko eskuineko aldea anulatu egiten dela. Kontuan hartu behar den beste gauza bat da, oraingoan ez dela  $\theta$  osoan kalkulatu, barrunbearen tartean dagoen eremuan soilik

kalkulatuko da, barrunbeen azpiko tarte zatian dagoen presioa barrunbean dagoenaren berdina delako.

Gainera, kontuan eduki barrunbetako presio hidrostatikoa jadanik kalkulatuta daudela, beraz hauek ingurune baldintza bezala jarriko dira gainazal eta barrunbea elkartzen diren lerroan (35. Irudiko lerro urdinean) eta gainazal-aren bi ertzetan barrunbearekin kontaktuan ez dagoena (irudiko lerro gorriak) erorketa lineala barrunbeto presiotik hasi eta ertzean presioa zero izan arte (atmosferikoa). Baldintza hauetaz gain, hidrodinamikoan jarri den baldintza ere jarriko da, hau da,  $z=L/2$  eta  $z=-L/2$  presioa zero izatea.



35. Irudia: MATLAB presio hidrostatikoa kalkulatu ingurune baldintzak

Lehen bezala matrize moduan jarriko da ekuazio sistema osoa eta bertatik barrunbe tarteko gainazaleko presio guztiak aterako dira. Ondoren, presio hauek interpolatu egiten dira kojineten osora. Honela, barrunbean, hasieran barrunberako ateratako presioa izango dugu, baldintza hori jarri baitugu gainazaleko presioa ateratzeko, beraz 35. Irudiko marra urdinetan,  $P_r$  egongo dira eta beraz bi marra urdinen artean dagoen gainazal osoan,  $P_r$  lortuko da interpolazio bidez. Azkenik, barrunbetik kanpora dagoen gainazal zatian, erorketa lineal bat egongo da presio atmosferikoa izan arte kojinetaren ertzean.

Hemen ere presio hidrodinamikoan bezala, Gumble-ren teoria jarraituko da eta presio negatibo guztiak anulatu egingo dira.

Behin kojinete osoko presio hidrostatikoa eta hidrodinamikoak kalkulatuta, bi eremuak gehitu egin behar dira eta honela kojinetean izango dugun presio totala aterako da.

### 11.1.2. PDE TOOL

MATLAB-en erraminta bat dago deribatu partzialetako ekuazioak askatzeko. Aplikazio horrek, deribatu partzialetako ekuazio adierazpen ezberdinak ditu. Erraminta honen erabilpena hurrengoa da.

Reynolds askatu nahi den eremua irudikatu behar da (noski 2D). Horretarako erraminta ezberdinak daude eta edozein forma irudikatu daiteke. Ondoren ingurune baldintzak jarri behar dira, kontuan hartu ingurune baldintza hauek irudikatu den formaren ertzean jarri behar direla. Bi ingurune baldintza posible daude, Neumann-ena eta Dirichlet-ena.

Dirichlet-en ingurune baldintzarekin, presioaren balio bat jartzen da ertz batean eta Neumann-en inguru baldintzarekin, presioaren deribatuaren balioa.

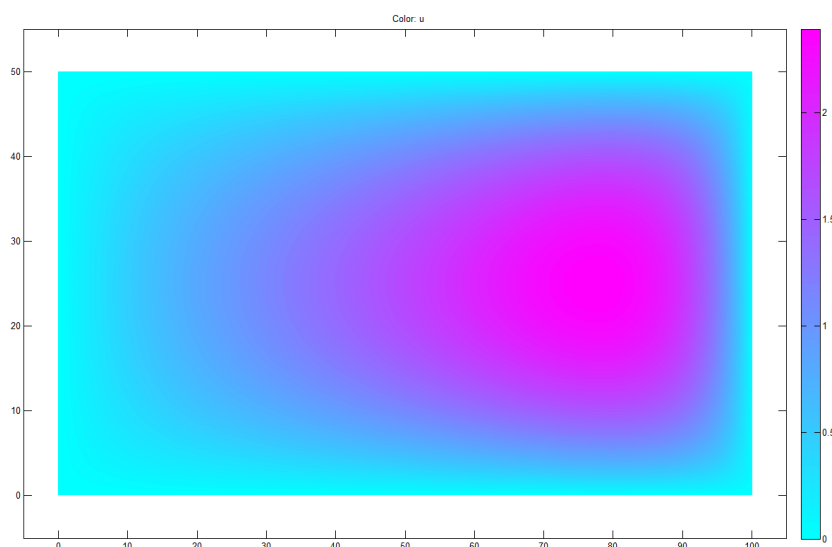
Hurrengo pausoa, PDE-TOOL-ek bere barnean dituen deribatu partzialetako ekuazio bat aukeratu eta bere konstanteen balioak sartzea da. Aipatu behar da, behar den aplikazioaren arabera, aukera ezberdinak ematen dituela (elektrostatikoa, bero fluxua, eskalarra generikoa...) eta beraz ekuazioak ere aldatu egiten direla. Gure kasuan, presioak eskalarrak direnez, eskalar generikoa aukera aukeratu da. Bertan hurrengo aukerak daude:

$-\text{div}(c*\text{grad}(u)) + a*u=f$ Eliptikoa
$d*u' - \text{div}(c*\text{grad}(u)) + a*u=f$ Parabolikoa
$d*u'' - \text{div}(c*\text{grad}(u)) + a*u=f$ Hiperbolikoa
$-\text{div}(c*\text{grad}(u)) + a*u=\lambda*d*u$ Modo propioak

Reynolds-en adierazpenak, eliptikoaren antza du non  $c=h^3$ ,  $a=0$  eta  $f$ =eskubiko zatia diren.

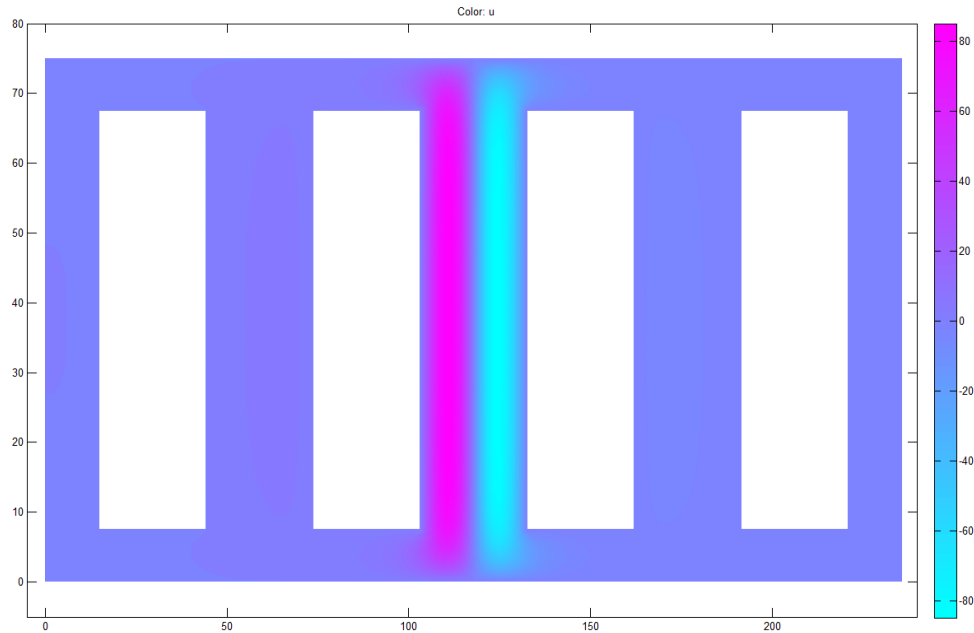
Ondoren ingurunea saretu behar da, saretzeko botoiari eman eta automatikoki saretzen du triangeluekin, aukera bakarra, saretzea elementu txikiagoekin egitea da berriz ere botoiari emanda. Azkenik solve botoiari eman eta zuzenean presioaren distribuzioaren irudia ematen du erraminta honek.

Hainbat kasurako, erraminta oso baliagarri da, bi plakaren artean dagoen jariakina simulatzeko adibidez hurrengo irudian ikusten den bezala, hau da, 2D+h moduko simulazioak egiteko oso erraminta ona da.



36: Irudia: PDE-TOOL kojineten laua

Baina barrunbeak dauden kasuan, erraminta hau ezin da erabili, gainazal eta barrunbeak batera ezin direlako simulatu. Ala ere, probatu dira simulazio batzuk, biraketa kojinetea desarrolatuta marratzuz eta barrunbeak dauden gunekak kendu, beraien ertzetan barrunbe presioa jarri ahal izateko ingurune baldintza bezala. Honela eginda hurrengo emaitzak lortu dira:



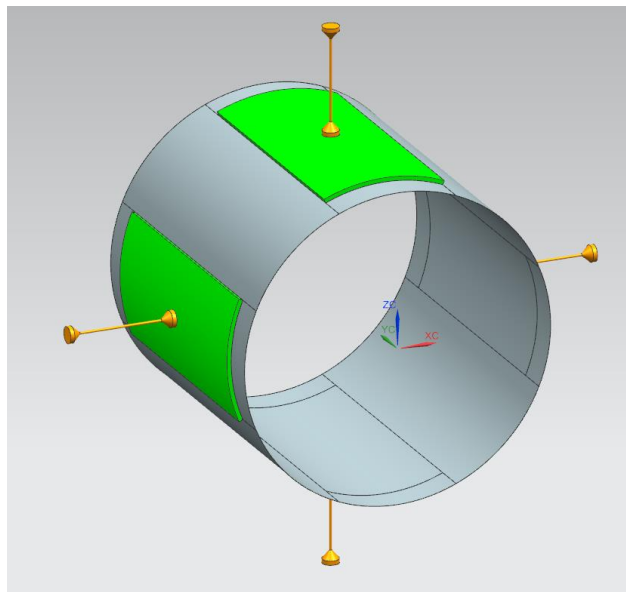
37. Irudia: PDE-TOOL biraketa kojinetea

Erraminta honek duen limitazio nagusia da modeloa 2D-n egin behar dela eta beraz barrunbeak ezin dira simulatu. Beraz erraminta hau erabilgarria da Reynolds-en ekuazioa askatzeko gainazal lau batean.



## 11.2. KALKULU NUMERIKOA NX-FLOW ERABILIZ

Lehenago esan bezala, kalkulu numerikoa egiteko NX-FLOW softwarea erabiliko da. Bertan 38. Irudiko modeloa simulatzera heltzea da helburua baina horretarako egindako pausu ezberdinak azalduko dira hemen.



38. Irudia: Biraketa kojineteko hibridoa zatikatuta

38. Irudian ikus daitezkeen bezala, modeloan 3 zati garbi ikus daitezke, batetik tartea bezala ezagutzen dena ( kolore grisa ) , bestetik barrunbeak ( kolore berdea) eta azkenik konpentsatzaileak (kolore laranja). Modelo honen konbinazio asko nahi dira simulatu; biraketa kojineteko tamaina ezberdinekin, eszentrikotasun ezberdinekin, barrunbe forma eta tamaina ezberdinekin, konpentsatzaile moduan zuloa edo kapilarra erabiliz... Hau modu erraz batean egin ahal izateko, hurrengo helburuak bete behar dira:

- Garbi ikus daiteke, saretzen zailena tartea izango dela, mikra batzuetako lodiera duelako. Beraz lehen helburua, zati horretarako saretze erraz eta azkar bat lortzea da emaitza onargarriak ematen dituen. Zenbat eta saretze errazagoa izan, elementu gutxiago izango ditu eta denbora gutxiago tardatuko du programak emaitza lortzen.
- Tartearen, barrunbeen eta konpentsatzaileen sareak, erraz lotzeko modu bat bilatzea. Ideala atal bakoitzaren sarea gainontzekoekiko independentea izatea da eta ondoren elkarrekin nolabait lotzeko aukera izatea, dena sare jarrai bat izan dadin.

### 11.2.1. SARETZEA

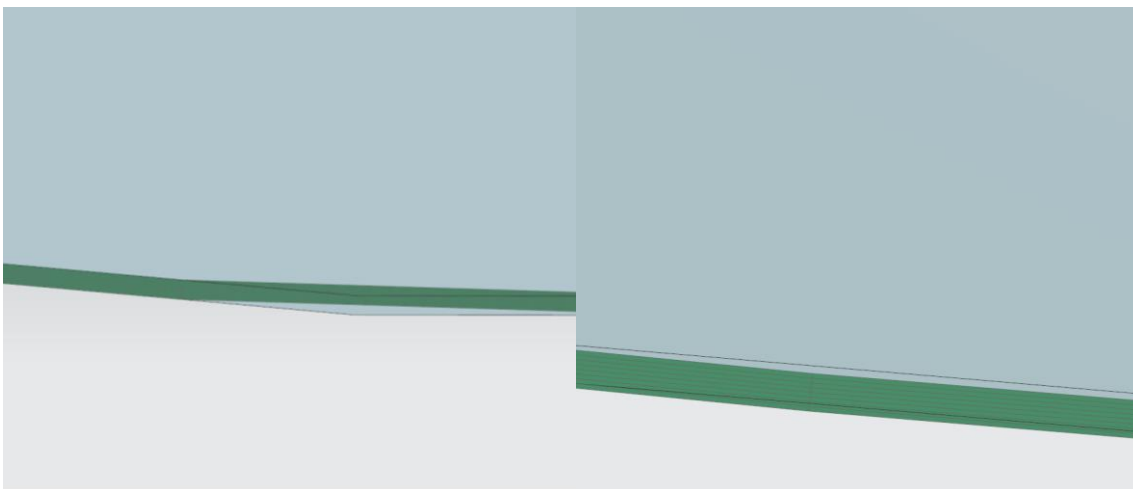
Lan honen gakoa, saretzean dago. Sare erraz bat egitea lortzen bada, Flow-a oso erraminta erabilgarria bihurtuko da eta ez bada lortzen, kalkulu oso konplexuetarako soilik erabiliko da. Sarea, elementu hexaedroekin egitea erabaki da, emaitza onenak ematen dituztenak

direlako eta gure geometria erregularra denez, egokienak direlako. 3D modelo baten sarea egiteko, bi modu daude, batetik modu automatikoa, geometria saretzen duena, eta bestetik modu manuala, geometriaren erreferentzia hartuz egiten du sarea baina ez da geometriari lotuta geratzen, beraz modeloan aldaketak egiten badira, sarea ez da automatikoki aktualizatzen, eta beraz berriz egin behar da. Hasiara batean, modu automatikoa erabiliko da baina aurrerago ikusiko den bezala, modu manuala ere erabilgarria izango da. Modu automatikoan, hainbat erraminta daude sarea osatzeko, gure kasuan erabiliko den estrategia hurrengoa da:

- Lehenik kojinetearen ertzetan 2D-ko sareak egingo dira altueran, zabalera eta luzeran sartuko diren elementu tamaina ezarriz, “2d Mapped” erramintak erabiliz.
- Ondoren 2D hauek oinarri moduan hartuta 3D sarea egingo da solidoaren bolumen osoa sartzeko, “3D swept” erramintaren bidez. Honela eginez, sarea geometriari lotuta geratzen da eta geometriari edozein aldaketa egiten dela, aldaketa horrek sareari eragiten dio.

Sarea egiten hasi aurretik, geometria preparatu egin behar da sarea sortzerako unean arazorik ez egoteko. Prestakuntza honetan, geometria zati ezberdinetan mozten da. Ondoren zati bakoitza independenteki saretzen da. Geometria moztetakoan “keep imprinted edges” aukera aktibatu daiteke. Aukera hori aktibatzen bada, mozten diren gainazalean ( moztu ondoren bi zatiek elkarbanatuko dutena) saretze berdina izatera behartzen ari zara eta beraz saretze jarrai bat lortzen da, ondoz ondoko zatien sareak konektatuta egongo dira. Aukera hau oso erabilgarria da tartea zati ezberdinetan zatitzen denean erabiltzeko, honela tarte osoa sare jarrai bat izango delako.

Kontuan hartuta lodiera oso txikiko modeloak erabiliko direla, NX-ek aukera bat du “High resolution polygon body” izena duena. Hau aktibatuz egiten den sarea, modu optimoago batean lotzen da solidoari. Honek bere abantailak eta desabantailak ditu aurrerago ikusiko den bezala. Hurrengo irudian, aukera hau aktibatuta eduki ala ez daukan diferentzia ikusi daiteke.

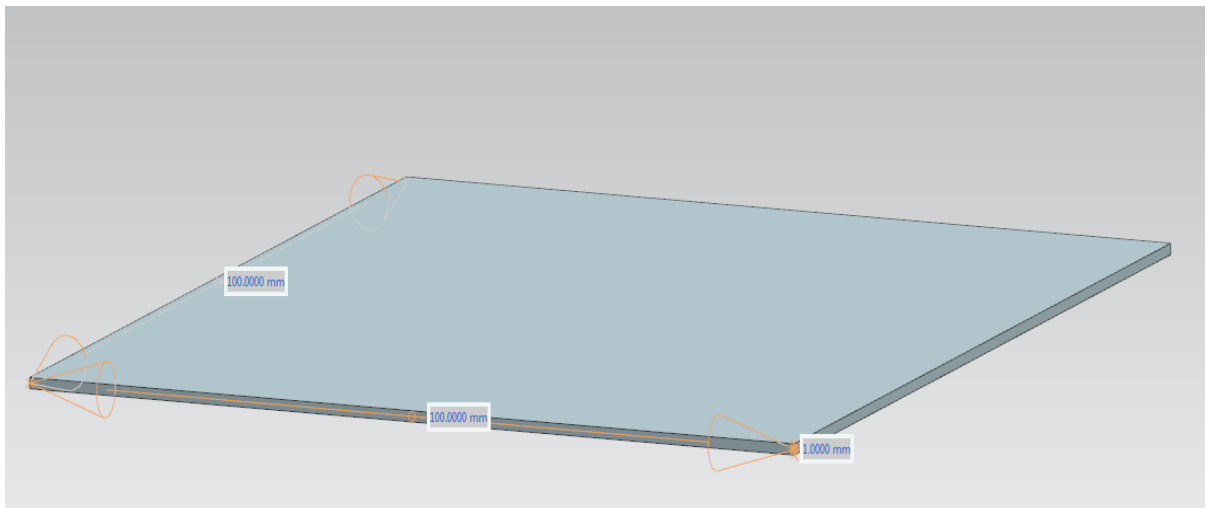


39. Irudia: Ezkerrean "High resolution polygon body" aktibatu gabe, eskubian aktibatuta

39. Irudian ikusten den bezala, resoluzio altuko aukera aktibatuz gero, modeloa eta sarea gehiago hurbiltzen dira zirkunferentzi teoriko batera. Desaktibatuta berriz, n aldeko poligono batera hurbiltzen da. Gainera, desaktibatuta edukiz gero, 2D sarea modu honetan egiten bada, ezin da sare automatikoa egin, 2D solidotik kanpo geratzen delako (39. Irudia ezkerre) eta programak ezin du solidoari lotutako sare bat sortu 2D honetan oinarrituta. Beraz, printzipioz aukera hau aktibatu egingo da (39. Irudia eskubia).

### 11.2.2. ELEMENTU KOPURUA LODIERAN

Behin jakinda nola saretuko den, sare horretako elementu tamaina jakin behar da. Azaldu bezala, emaitza onargarriak ematen dituzten elementu tamaina handienak interesatzen dira. Lehenik egin dena izan da, tartearen lodieran zenbat elementu jarri behar diren adostu emaitzak onargarria izan daitezzen. Horretarako modelo simple bat hartu da eta Flow-ak emandako emaitzak emaitza teorikoekin alderatu dira. Hartu den modeloa hurrengo da:



40. Irudia: Kojinete laua (NX)

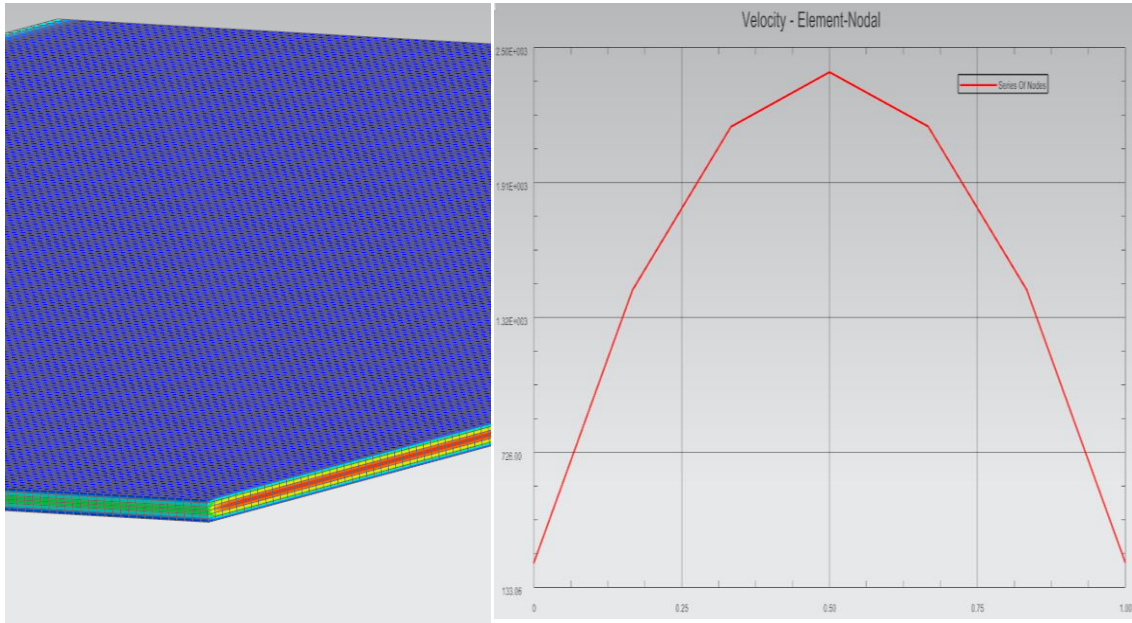
Nahiz eta bilatzen diren emaitzak presioarenak diren, presioak abiaduretatik datoz eta beraz modelo honetan abiadurak alderatuko dira. Bi plaka paraleloen arteko jariakinaren abiadura distribuzioa ezaguna da, parabola bat hain zuzen eta bere batz besteko abiadura hurrengo formuletatik erraz atera daiteke.

$$\Delta P = Q * R$$

$$R_k = \frac{12 \mu l}{b h^3}$$

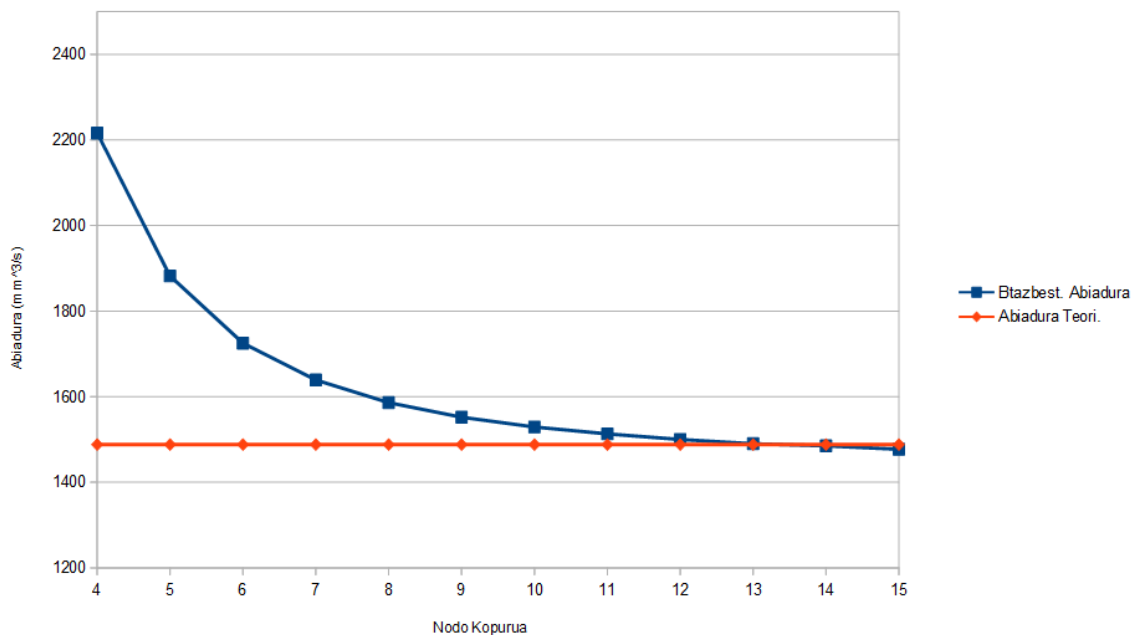
Hemendik emaria askatu da eta modeloko jariakinaren irteerako azalera dugunez, batz besteko abiadura teorikoa atera da.

Bestetik, modeloan lodieran elementu kopuru ezberdinak jarri dira eta batuz besteko abiadura atera da tarteko lodierako nodoen abiadura grafikatu eta grafiko honetatik eragiketa erraz batzuk eginez.



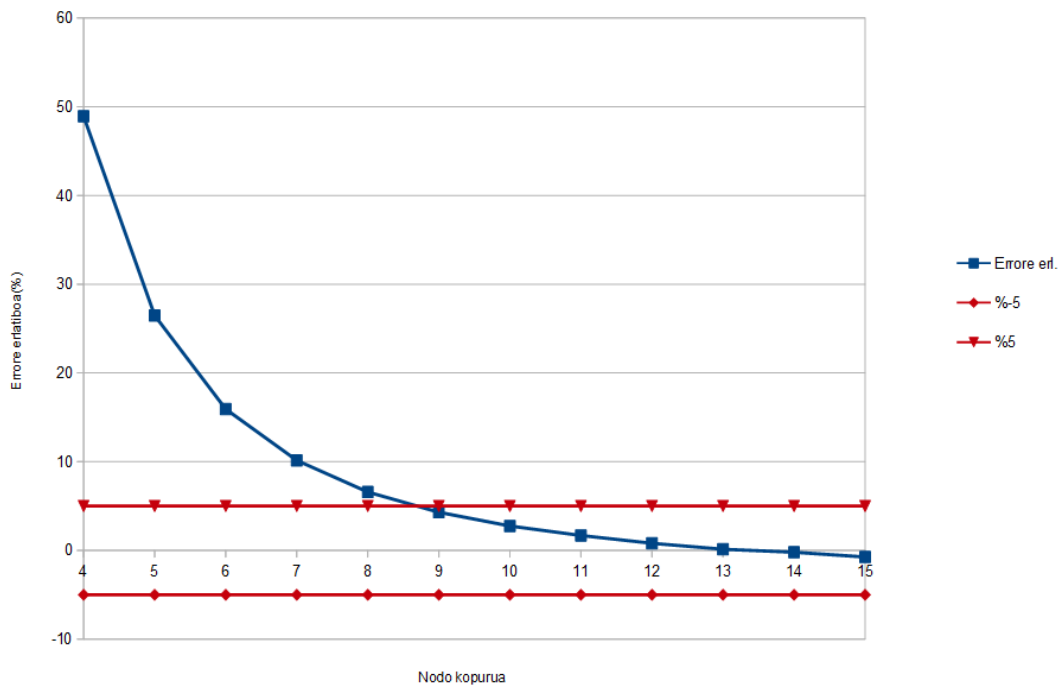
41. Irudia: Abiadura distribuzioa tartearen lodieran

Nodo kopuru bakoitzerako lortu diren batuz besteko abiadurak eta abiadura teorikoa hurrengo grafikoan irudikatu dira.



42: Irudia: Tartearen lodierako abiadura, nodo kopuruekiko

42. Irudian garbi ikusten da zenbat eta elementu gehiago sartu lodieran, emaitza zehatzagoa dela eta gehiago hurbiltzen dela emaitza teorikora, normala den bezala. Gutxienez zenbat elementu onartuko diren zehazteko,  $\% \pm 5$ -eko errore erlatibo bat onartu da eta 43. Irudian irudikatu dira nodo kopuru bakoitzerako errore erlatiboak. Onartzen den azken balorea 9 nodoei dagokiena da, nahiz eta onartutako errorearen limitean egon, onartu egingo da elementu kopuru txikiena lortzeko. Beraz lodieran 8 elementu. Hemendik aurrera egin diren simulazio guztiak 8 elementu izango dituzte tartearen lodieran.



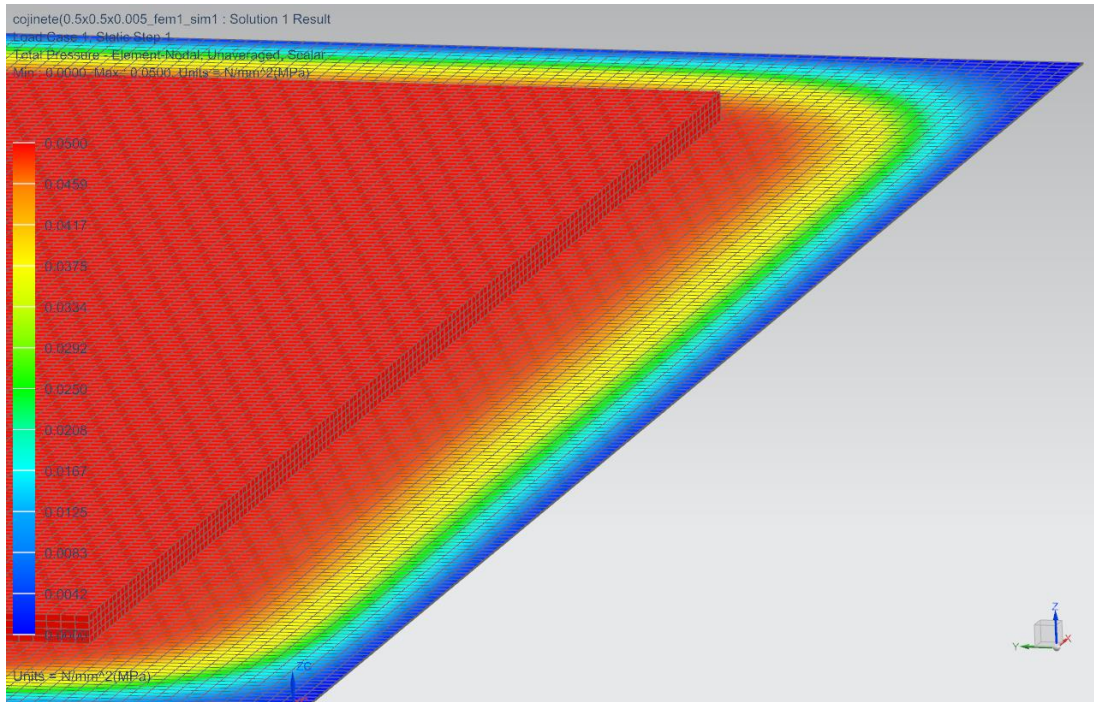
43. Irudia: Tartearen lodierako abiduraren errore erlatiboa, nodo kopuruarekiko

### 11.2.3. ELEMENTU TAMAINA GAINAZALEAN

Behin adostuta erabiliko den elementuak izango duen altuera, azalera zehaztea falta da. Horretarako, orain arte erabili dugun modelo alde batera utzi eta euskarri bat erabili da modelo bezala. Teorian azaldu den bezala, euskarri horren presio distribuzioa ezaguna delako, hau da, barrunbean konstante da eta ondoren linealki erortzen da euskarriaren ertzean presio atmosferikoa lortu arte.

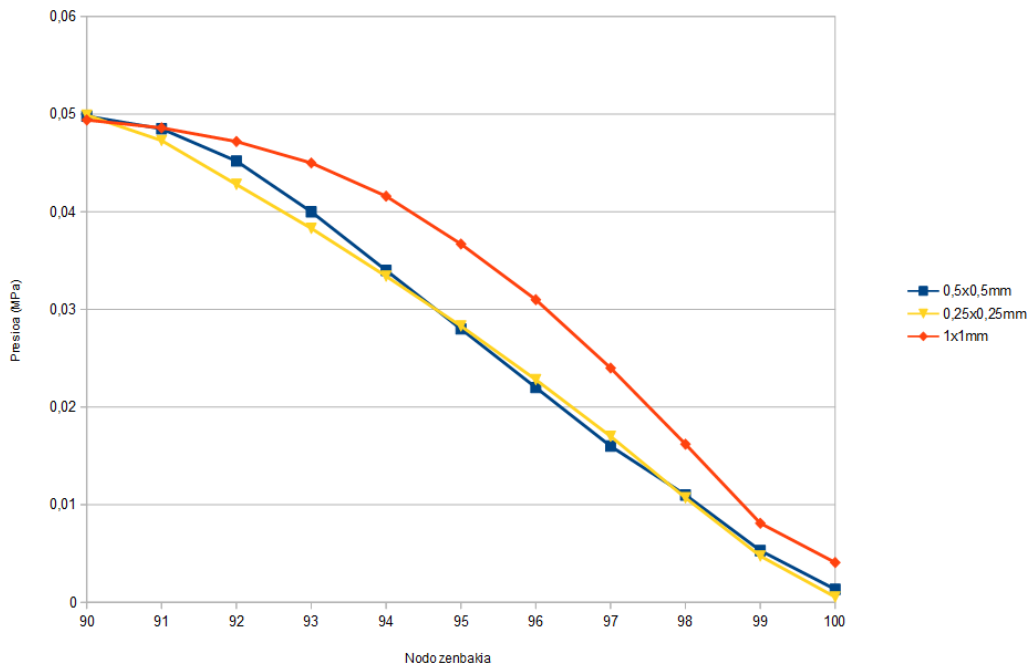
Simulazioa egiteko, modeloari sarrera bat jarri zaio barrunbeko azalera txiki batean 0.5 bar balioduna eta euskarriaren lau ertzetan opening inguruko baldintza jarri zaio, hau da presio atmosferikoa.

Kasu honetan ere, simulazioa ezberdinak egin dira elementu tamaina ezberdinentzat baina beti ere lodieran 8 elementu jarritz. Simulazio hauek eman dituzten emaitzak, hurrengo itxura dute.



44. Irudia: Euskarri baten presio distribuzioa (NX)

45. Irudian, gainazal eremuan ematen den presio jaitsiera ploteatu da egin diren simulazio ezberdinetatik hartutako emaitzekin.

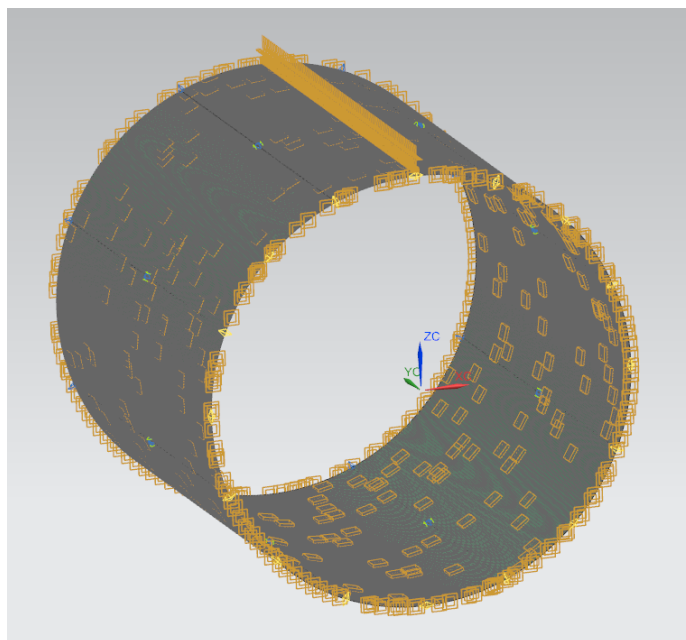


45. Irudia: Elementu tamaina ezberdinetzat presio distribuzioa, nodo kopuruarekiko

Normala den bezala, zenbat eta elementu gehiago, grafikoa gehiago hurbiltzen da lerro zuzen batera. 0,25x0,25 mm-tako elementuak hartzea izango litzateke onena baina kontuan hartuta 0,5x0,5mm-tako elementuekin ezberdintasuna txikia dela eta honela elementu kopurua asko txikituko dela, 0,5x0,5mm-tako elementuak erabiltzea adostu da. Beraz tarteko elementuek, lodiera/8 mm-ko altuera izango dute eta gainazalean 0.5x0.5 mm-ko elementuak.

#### 11.2.4. BIRAKETA KOJINETE LAUAREN SAREA ETA SIMULAZIOA

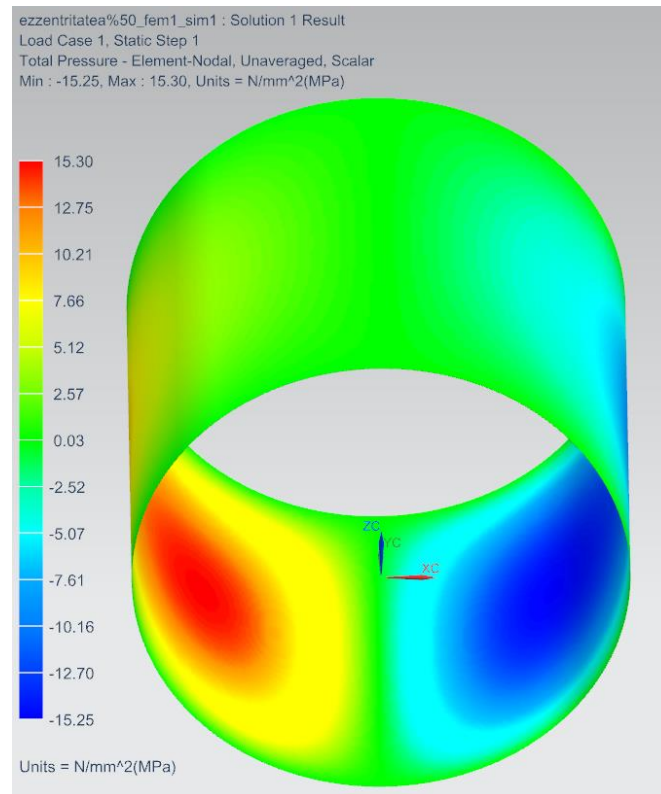
Behin erabaki dela tarteko elementuen tamaina, biraketa kojinetete laua saretzeari eta simulatzeari ekin zaio, emaitzak onargarriak izan daitezzen, bertako sarea nolako izan behar den ezagutzen delako. Biraketa kojinetete laua simulatu ahal izateko, eszentrikotasuna sartu behar zaio. Horretarako eszentrikotasun ezberdinak sartu dira, %5eko eszentrikotasunarekin hasi eta %95 arte. Simulazio hauetarako erabili den kojinetetearen dimentsioak hurrengoak dira; 75mm-tako kanpo diametroa, 74.93mm-tako barne diametroa eta 75mm-tako luzera. Simulatu ahal izateko sartu diren ingurune baldintzak, hurrengoak dira.



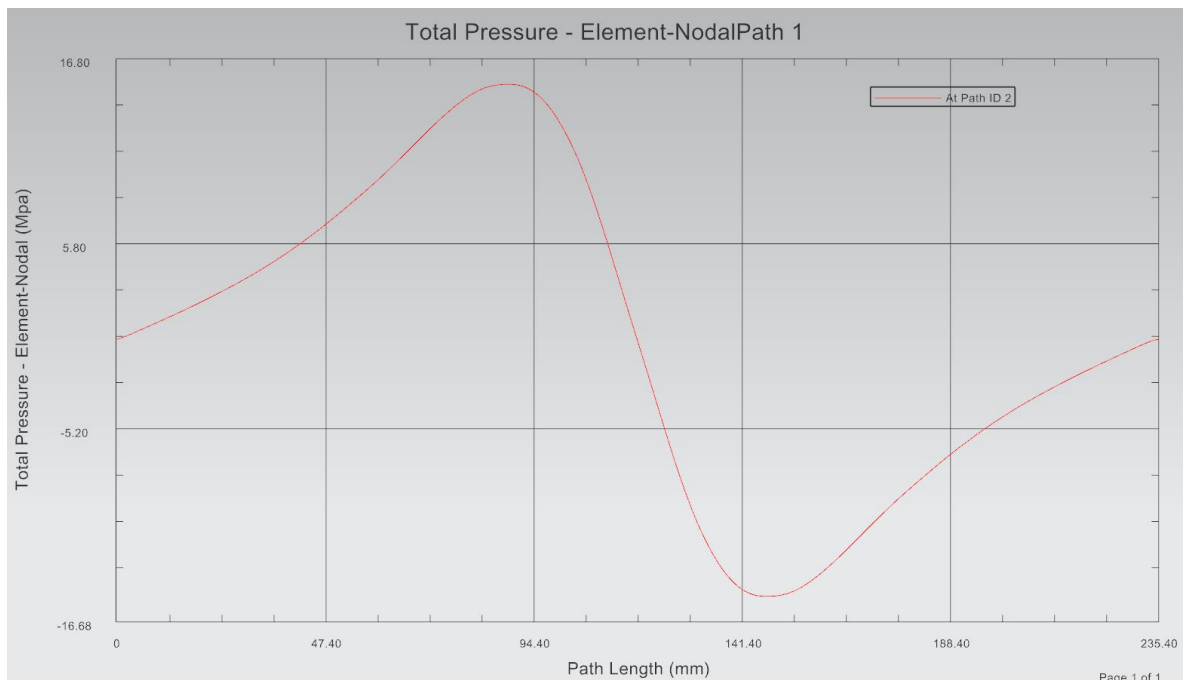
46. Irudia: Biraketa kojinetete lau batentzat ingurune baldintzak (NX)

46. Irudian ikusten den bezala, goiko aldean kojinetetearen luzera osoan sarrera bat jarri da oso presio txikiarekin, emari bat ziurtatzeko bakarrik. Bestetik, kojinetetearen ertzetan “opening”-ak jarri dira eta azkenik, barruko gainazaleko elementuen aurpegietan, “Flow surface” bat jarri da, honela barruko gainazala biraka dabilen ardatz batekin kontaktuan dagoela inposatzen dugu.

Gorago azaldu den bezala, abiadura sartu dugunez emaitzetan presio negatiboak eta positiboak azalduko dira. Hain zuzen ere hurrengo irudiko presio distribuzioa lortu da %50eko eszentrikotasunarekin.



**47. Irudia: Biraketa kojineten lauaren presio distribuzioa (NX)**



**48. Irudia: Biraketa kojineten lauaren erdiko sekzioko distribuzioa**

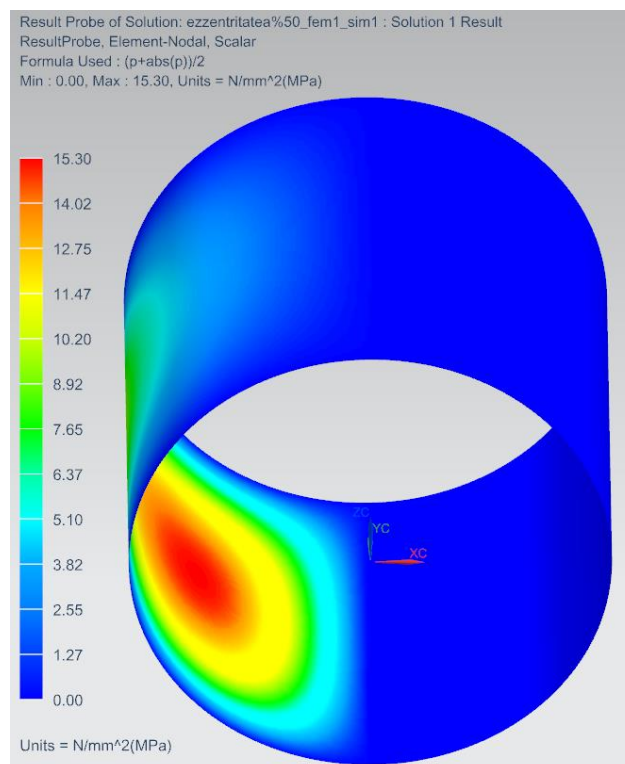


JDK batentzat, presioak zenbakiak besterik ez direnez, presio negatiboak ere ematen ditu, baina lehenago azaldu den bezala, presio negatiboak ez dute zentzurik gure modeloan. Beraz soluzioak ematen duen indar totalak ez digu balio, presio negatiboak kontuan hartu dituelako indar hori kalkulatzekoan. Presio negatibo hauek kendu eta indar berria kalkulatzeko erabili den metodologia hurrengoa da:

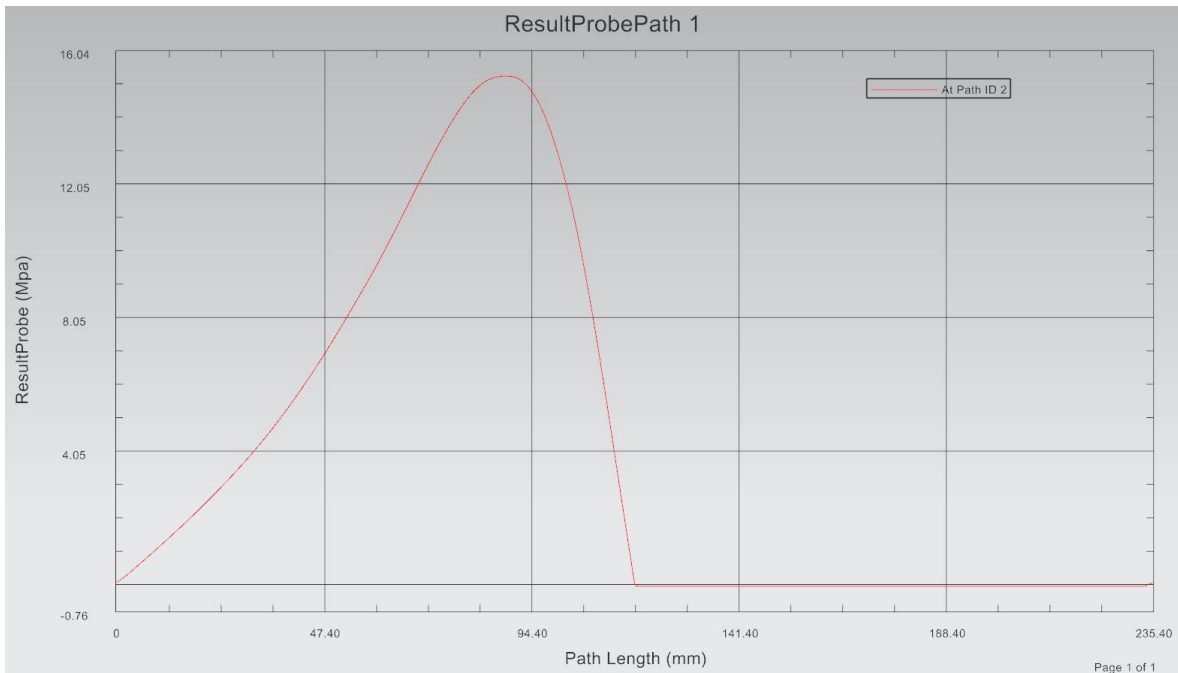
- Lehenik, presio negatiborik gabeko presio distribuzio bat sortu behar da, horretarako P izeneko aldagai bat sortu da 47. Irudiko presio guztiak barne hartzen dituena. Ondoren, presio distribuzio berri bat sortu da aldagai hori hurrengo eran erabiliz.

$$\text{Presio distribuzio berria} = \frac{P + |P|}{2}$$

Honela, presio positiboak lehen bezala geratzen dira eta presio negatiboak, zero bihurtzen dira, hau da, Gumble-ren hipotesia aplikatzen da, nahiz eta ikusi den bezala ez izan hipotesia zehatzena. Reynolds-en hipotesia aplikatu ahal izateko, lehenago azaldu den baldintza, hau da, deribatua zero izatea presioa negatibo bihurtzera doanean, ez da lortu NX-en sartzea. Beraz Gumble aplikatuz, hurrengo itxurako presio distribuzioa lortu da.

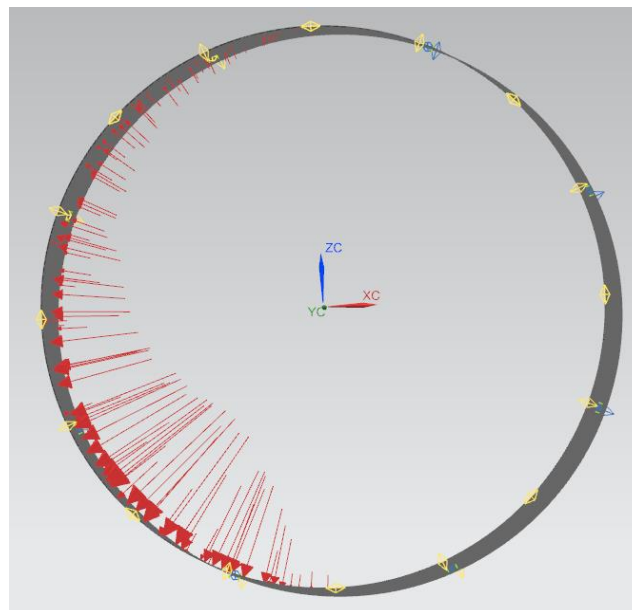


49. Irudia: Presio distribuzioa Gumble aplikatuta



50. Irudia: Erdiko sekzioko presioa, Gumble aplikatuz

- Hurrengo pausoa, kojinetearen barruko gainazaleko presio distribuzioa, taula batean jasotzea da. Horretarako, postprozesadorean, barruko gainazaleko nodo guztien presioak identifikatu eta taula bat osatu behar da datu horiekin.
- Azkenik, beste soluzio bat sortu behar da, estukturala kasu honetan. Bertan sartu behar den baldintza bakarra, nodoetako presio distribuzioa da, beraz, barruko gainazaleko nodo guztiak aukeratu eta presioaren balioa sartu behar den lekuan, lehen egin dugun taula sartu behar da. Honela hurrengo irudian ikusten den modeloa dugu.

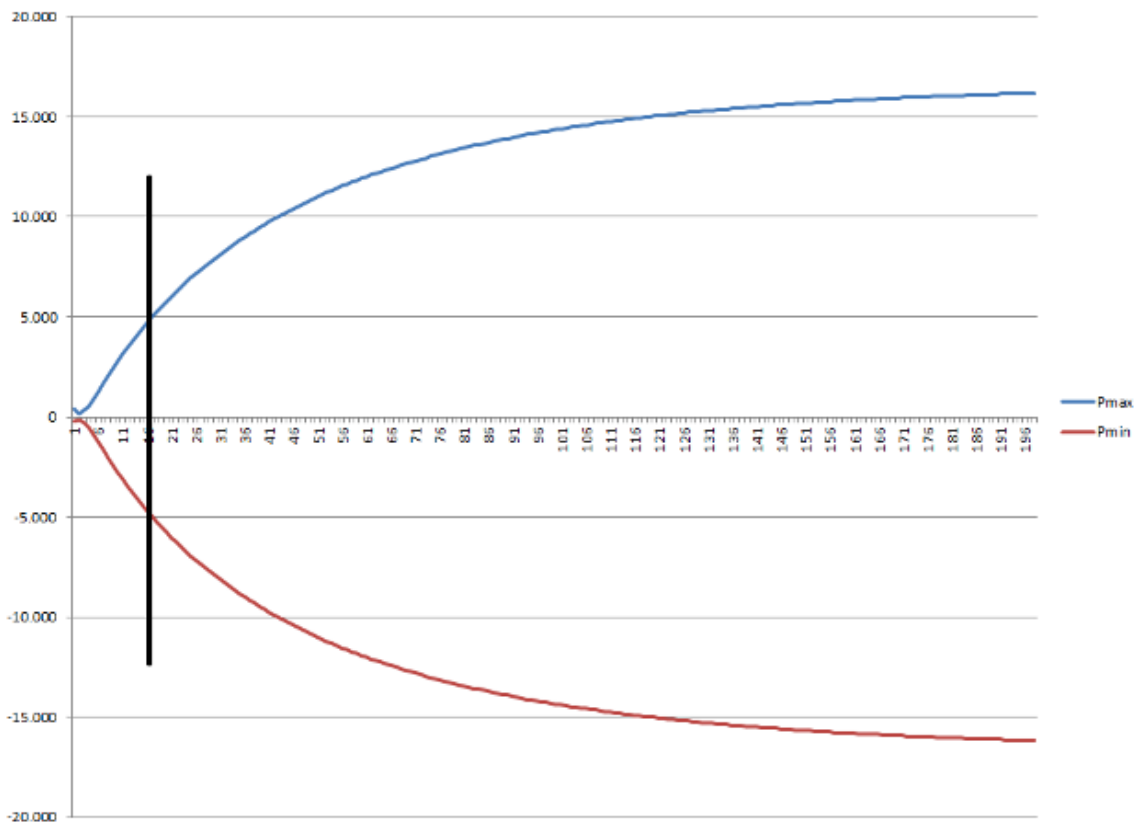


51. Irudia: Kojinetean eragiten duen presioa

Soluzio honetatik, “Mechanical load summary” egin daiteke, soluzio bilatu gabe eta honela, modeloaren gain dauden baldintzen indarra ateratzen du, hiru ardatzetan banatuta, beraz, indarraren modulua eta norabidea lor daitezke.

Behin jakinda presio negatiboak nola ezabatu, modelo saretu eta simulatu da. Prozesu horretan bi arazo nagusi egon dira .

Batetik, simulazioan egon da arazoa. Orain arte egindako simulazioetan, presio maximoak balio batera konbergitzen zuen, baina kasu honetan, presioa handituz doa eta asko kostatzen zaio konbergitzea. Hurrengo grafikoan ikus daiteke kasu bat, 6 orduko simulazioaren ondoren presio maximoak eta minimoak izan duten bilakaera ikus daiteke bertan.



52. Irudia: Presio maximoen bilakaera, iterazioekiko

Emaitzak ontzat jotzeko eta simulazioa geratzeko orain arte inposatu diren baldintzak (residualak 0,0001 baino txikiagoak eta masa balantze eza %2 baino txikiagoa), lerro beltza dagoen unerako lortuta zeuden. Beraz, zenbatgarren iteraziotik aurrera hartu ahal dira emaitzak onargarritzat?

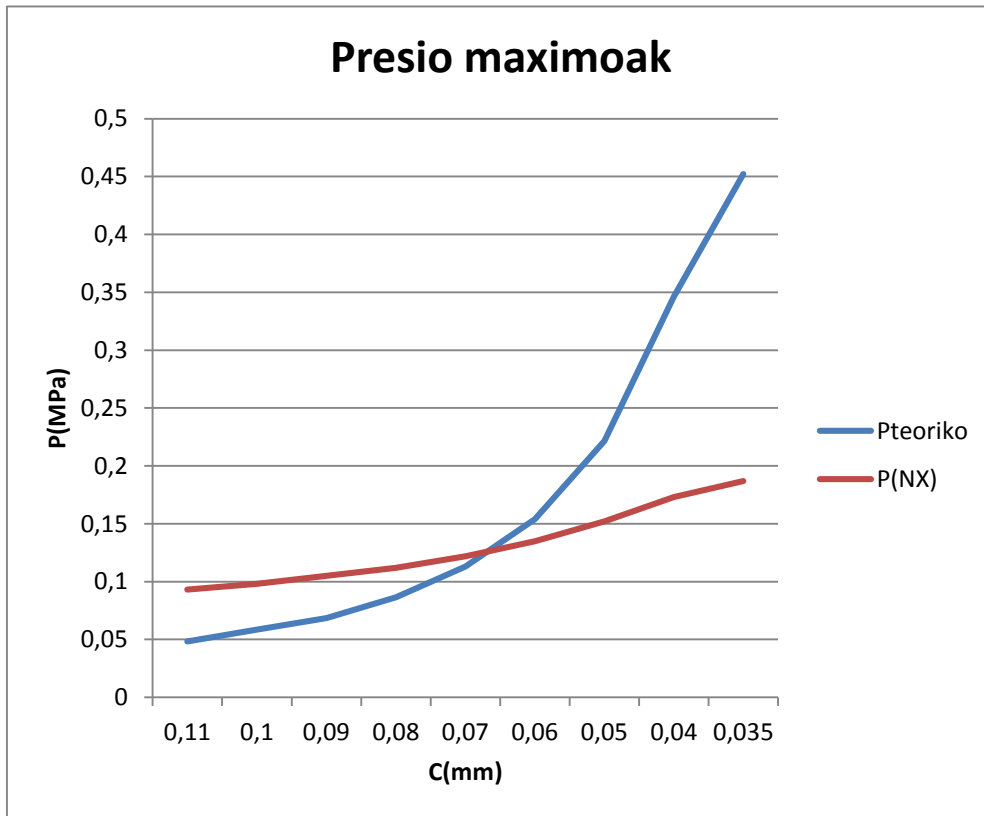
Galdera honi erantzuteko NX bidez lortutako emaitzak eta [4] dagoen formula teorikoak alderatu dira. Liburu honetan, “Short Journal Bearing”-arentzat dauden formulak hartu

dira kontuan eta bertan jartzen duenez  $L/D=1/8$  baino txikiagoa duten kojineteentzat balio dute. Liburuko formulak, hurrengoak dira:

$$p(\theta, z) = \frac{-3 \mu \omega}{C^2} \left( z^2 - \frac{L^2}{4} \right) \frac{\varepsilon \sin(\theta)}{(1 + \varepsilon \cos(\theta))^3}$$

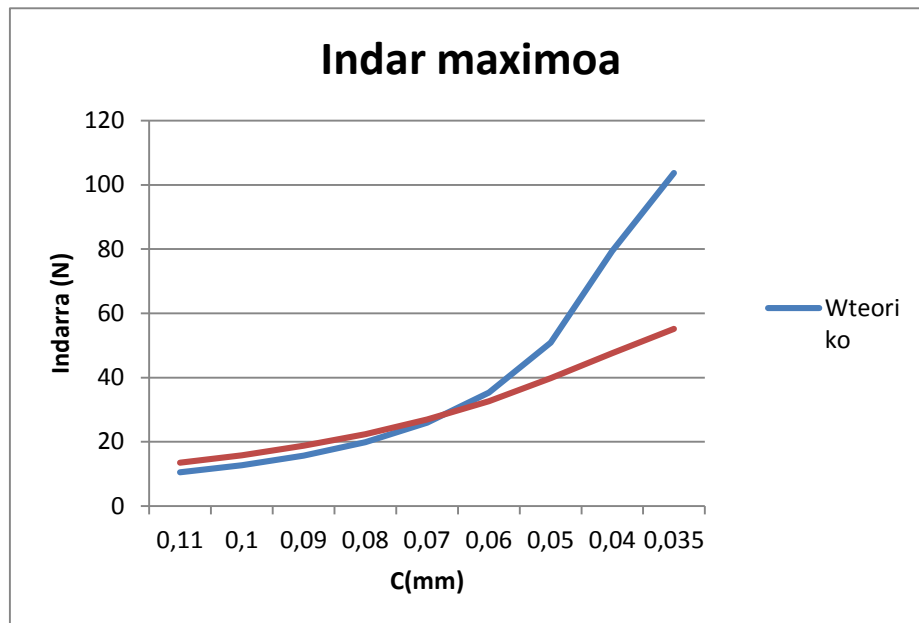
$$W = \mu LR \omega \left( \frac{L}{D} \right)^2 \left( \frac{R}{C} \right)^2 \frac{\varepsilon}{(1 - \varepsilon^2)^2} [16\varepsilon^2 + \pi^2 (1 - \varepsilon^2)]^{\frac{1}{2}}$$

Ekuazio teoriko horietatik lortutako emaitzekin alderatzeko, 75mm-tako diametroa eta 8mm-tako luzera duen kojinete bat erabili da. Alderaketa egiteko, tarte erradial ezberdinak jarriz joan da modeloan baina eszentrikotasuna, %50 izanik beti. Honela, lortu diren presio maximo teorikoak eta NX bidez ateratakoak 53. Irudian ikus daitezke:



53. Irudia: Presio maximoak, tarte erradialarekiko

Presio maximoaz gain, indarra ere atera da eta emaitzak 54. Irudian ikus daitezke.



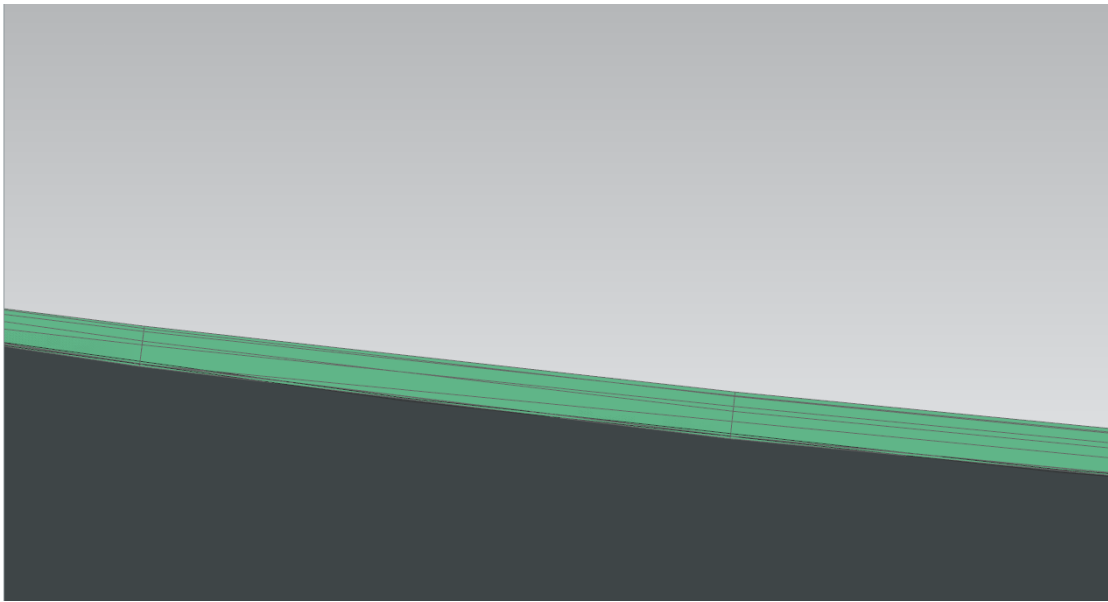
54. Irudia: Indar maximoa, tarte erradialarekiko

Aipatu behar da, NX-tik atera diren emaitzak, presio maximoa lortzen den unekoak direla, hau da, 52.Irudian presioaren lerroak horizontal bihurtzen diren uneko presioak.

Irudietan ikusten denez, tarte erradiala 0,07 izan arte, NX-etik ateratako emaitzak, teorikoaren gaitetik daude eta beraz kasu horretan, iterazio kopurua txikitu daiteke. Gainera, C-ren balio hortararte, emaitza teorikoak eta numerikoak tendentzia berdintsua jarraitzen dute, hau da, lerroak paraleloak dira. Baina C txikiagoentzat, ekuazio teorikoetatik ateratako emaitzak asko handitzen dira, NX-etik ateratakoak, aurreko tendentzia jarraitzen duten heinean.

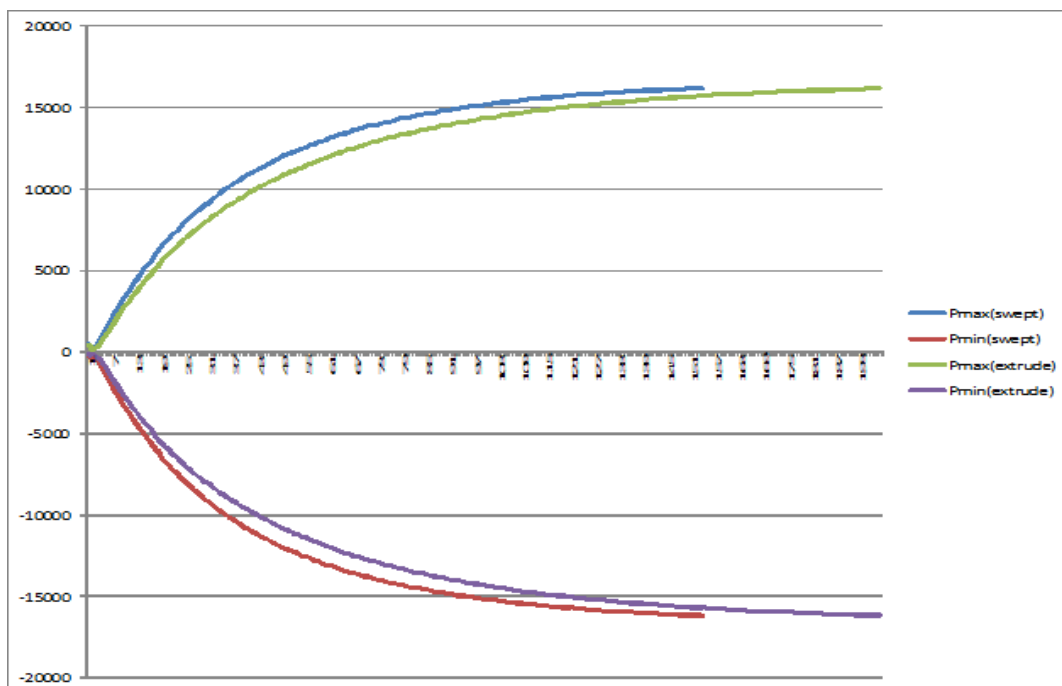
Analisi honetatik atera daiteken ondorioa hurrengoa da, formula teoriko horiek atera ahal izateko, hainbat hipotesi hartu dira kontuan, besteak beste, gaiaren egoera atalean azaldutakoak. NX-ek berriz, beste hipotesi batzuk hartzen ditu kontuan eta gauza da, nor hurbiltzen da gehiago errealitatera? Galdera hau erantzun ahal izateko, entseguak egin behar dira eta bertan ateratako emaitzak balioztatuko dituzte emaitza batzuk ala beste batzuk.

Simulazioa alde batera utziz, modelo honetan izan den beste arazo bat, sarea egiterako unean izan da. Eszentrikotasuna %60 izan arte, sarea ondo egin ahal izan da, lehen azaldu den bezala. Baina eszentrikotasuna %60 baino handiagoa denean, hau da, kojinetearen beheko aldean 15 mikra inguru gelditzen direnean, ez da lortu 2D on bat egitea eta beraz ezin da 3D sarea egin lehen azaldu den metodologia erabiliz. Hau hurrengo irudian ikus daiteke.



55. Irudia: Eszentrikotasun altuetan 2D sarea

Beraz, eszentrikotasun honetatik aurrera, lehen aipatu den “high resolution polygon bodies” desaktibatu behar da. Lehen aipatu den bezala, aukera hori desaktibatuz gero, 2D sarea ez da geometriari ondo lotuta geratzen eta beraz ezin da 3D sarea orain arte bezala egin. Hori dela eta, eszentrikotasun handiekin sarea manualki egin behar da, “extrude” erraminta erabiliz. Sarea egiteko modua aldatu denez, konprobatu eginda ea saretze modu honek emaitza onargarriak ematen dituen. Horretarako egin dena da %50 eszentrikotasuna duen modeloa hartu eta bi modutan saretu eta simulatu. Presio maximoen bilakaera.



56. Irudia: Bi modeloen presio maximoak, iterazioekiko

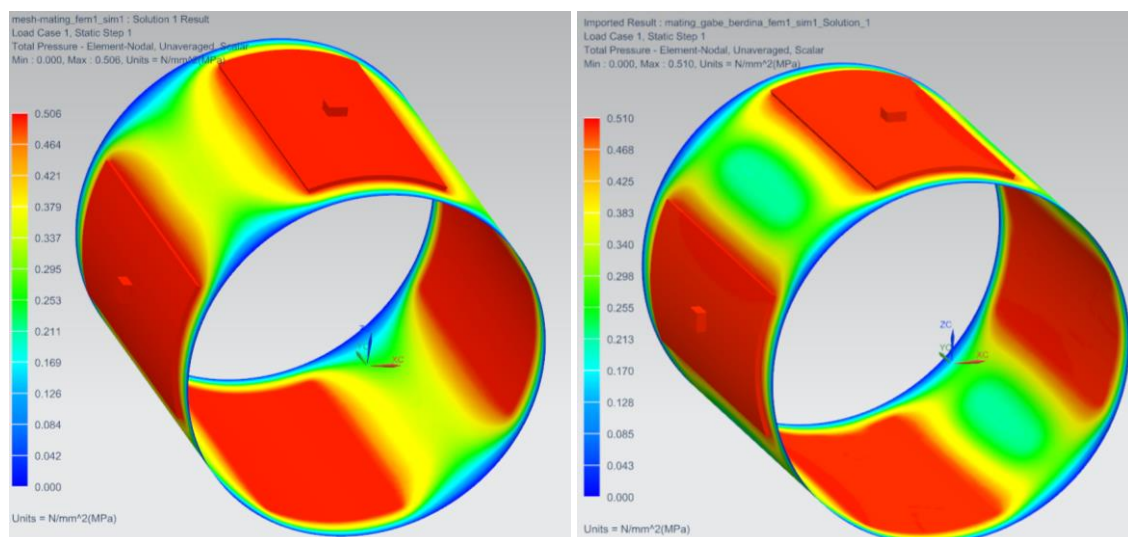
Nahiz eta “extrude” bidez saretu denari gehiago kostatzen zaion, bi modeloak presio berdintsuan konbergitzen dute. Beraz modu honetan saretutako modeloak ontzat hartuko dira baina ahal dela geometriari lotutako sareak egingo dira, arinago konbergitzen dutelako eta geometrian aldaketak eginez gero automatikoki kargatzen delako sare berria.

### 11.2.5. BARRUNBEKO SAREA ETA TARTEAREKIN LOTURA

Behin tartea saretzea eta simulatzea lortu dela, hurrengo pausoa, barrunbeak gehitzea izango da. Simulazioak egiteko, 45°-ko 4 barrunbe erabiltzea erabaki da, 60mm-ako luzera dutenak. Hasiera batean, barrunbeko sarea tartekoaren berdina izango da, altueran 8 elementu eta azaleran 0,5x0,5 sekzioko elementuak. Ideala, barrunbearen sareak eta tartearenak, elkarrekin inolako menpekotasunik ez edukitzea izango litzateke, honela bakoitza libreki saretu ahal izateko.

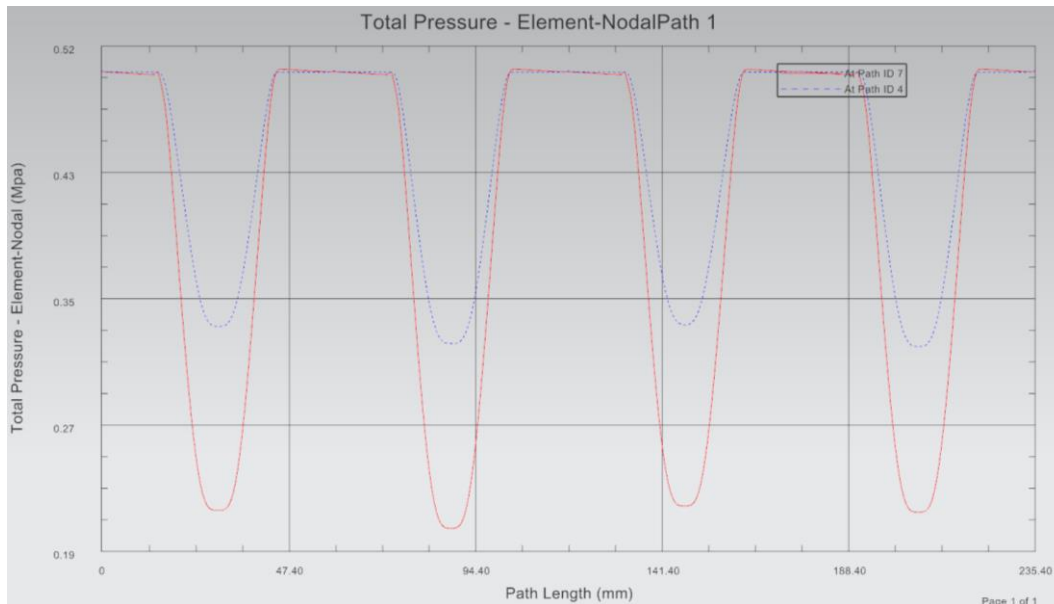
#### 9.2.5.1 BARRUNBE ETA TARTEAREN ARTEKO LOTURA

NX-ek aukera bat du, “Connect disjoint fluid meshes”. Honen arabera, kontaktuan dauden geometrien sareak elkartzen ditu, kontaktuan dauden bi aurpegi-tako nodoak ez dute bat etorri behar baina sarearen dentsitateak berdintsua izan behar du emaitzak onak izan daitezen. Aukera honek barrunbea eta tartea ondo lotzen dituen ala ez konprobatzeko, bi modelo berdina simulatu dira (biak elementu tamaina berdinarekin), batean “mesh mating”-a eginda (behartuta barrunbeak eta tartearak sare berdina izatera kontaktu azaleran) eta bestean libreki saretu dira eta “Connect disjoint fluid meshes” aktibatuta da. Bietan ingurune baldintza berdina jarri dira, sarreran 0,5 MPa eta kojinetearen ertz osoan presio atmosferikoa, kasu honetan ez da abiadurarik jarri, kasu hidrostatikoa analizatu nahi delako .



57. Irudia: Ezkerrean "Mesh Mating"-a eginda, eskubian egin gabe

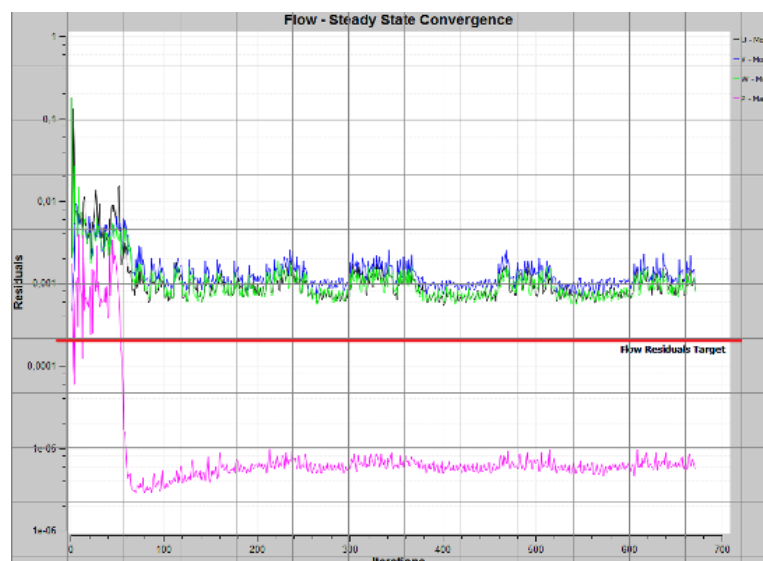
57. Irudian ikus daitezkeen bezala, “mesh mating”-a egiten denean barrunbearen arteko tartean lortzen diren presioak handiagoak dira. Bi modelo hauen erdiko sekzioko presio distribuzioa ikus daiteke hurrengo irudian.



58. Irudia: "Mesh Mating" jartzearen diferentzia

58. irudian ikusten denez, barrunbeen artean lortzen diren presioak desberdinak dira bi kasuetarako. Ezberdintasuna gainera handia da mesprezatu ahal izateko, zehazki barrunbetan 5 MPa dauden bitartean, "mesh mating"-aren kasuan barrunbeen artean 0,34 Mpa inguru da balore minimoa eta libreki saretutakoan, 0,22 MPa inguru. Erabaki bat hartu aurretik, berriz ere bi modelo hauek simulatu dira baina oraingoan, sarrerako presioa 5 Mpa jarri da.

"Mesh mating"-a eginda emaitza onak lortu dira. Libreki saretuta berriz, simulazioak ez du konbergitu eta gainera masa balantze eza %33 inguruan geratu da eta beraz lortu diren emaitzak ezin dira ontzat jo.



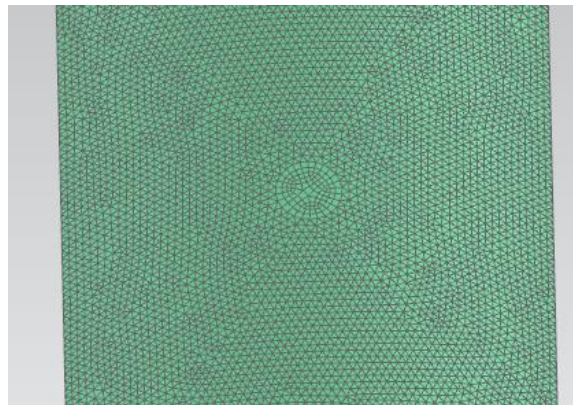
59. Irudia: " Mesh mating" gabe konbergentzia



Aurreko bi kasuak aztertuta, hartu den erabakia hemendik aurrera ondoz ondoko geometria guztien sareak, “mesh mating” bidez elkartuko direla eta beraz sareak baldintzatuta egongo direla da.

### 9.2.5.2 BARRUNBEAREN SAREA

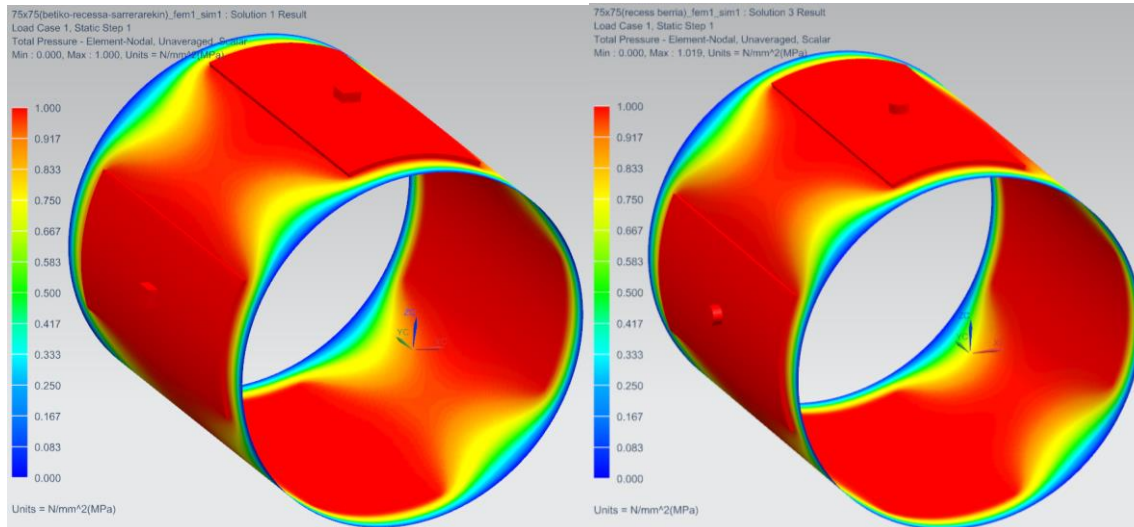
Orain arte erabili den barrunbearen sareak, emaitza onak eman ditu baina aurreko puntuan ondorioztatu da, gorputz ezberdinen elkartze gainazalean sarea bera izango dela. Beraz, barrunbeak beheko gainazalean tartearen sare bera izan behar du eta goiko gainazaleko azalera txiki batean, konpentsatzailearen sare bera. Konpentsatzailearen eta barrunbearen arteko lotura lauki formako gainazal bat izango balitz, orain arte erabili den sarea erabili daiteke, baina ondoren ikusiko dugun bezala, konpentsatzaileen basea zirkularra da. Beraz, barrunbearen goiko gainazalak hurrengo itxurako sare bat izan beharko du konpentsatzaileekin “mesh mating”-a egin ahala izateko.



60.Irudia: Barrunbearen goiko gainazaleko sarea

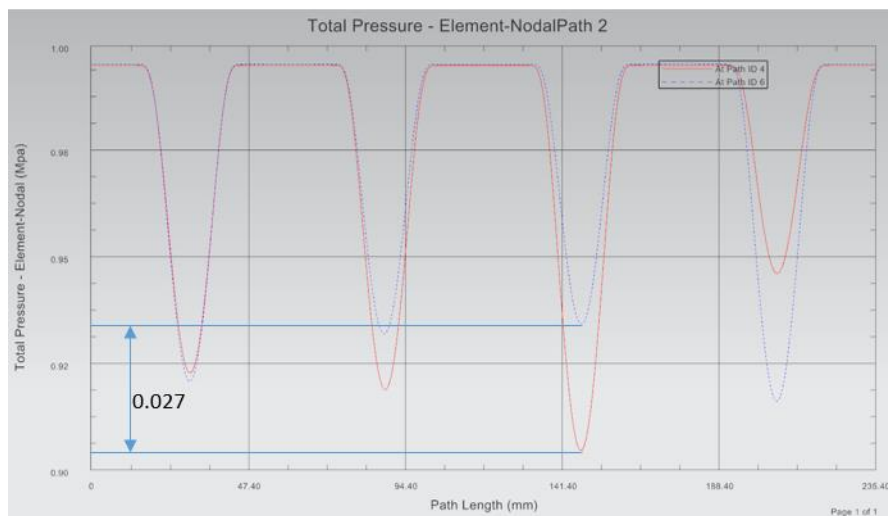
Barrunbearen goiko eta beheko gainazaleko sarea definituta, biak lotzeko modu bakarra, elementu tetraedrikoekin saretzea da, orain arte bezala elementu hexaedrikoekin saretuz gero errorea ematen baitu. Elementu tetraedrikoekin saretzean, NX-ek aukera ematen du elementu hexaedrikoekin lotura egitean, piramide moduko elementuak erabiltzeko eta beraz, beheko gainazal osoan eta goiko gainazaleko zati batean, piramide formako elementuak sartu dira.

Barrunbea honela saretuta modeloak ematen dituen emaitzak onak direla ziurtatzeko, egin dena da bi modelo berdin, ezberdin saretu. Batetik, barrunbearen sarea orain arte bezala egin da elementu hexaedrikoekin eta bestetik, beste bat orain azaldu den bezala, elementu tetraedrikoekin. Simulazio hauek eman dituzten emaitzak 61. Irudian ikus daitezke.



61. Irudia: Barrunbearen sarearen alderaketa, ezkerrean hexaedroekin eta eskubian tetraedroekin

Ikusten den bezala, bi emaitzak itxura berdintsua dute, bietatik erdiko sekzioko presio distribuzioa atera da eta grafiko berdinean irudikatu dira.



62. Irudia: Gorria hexadrikoekin, urdina tetraedrikoekin

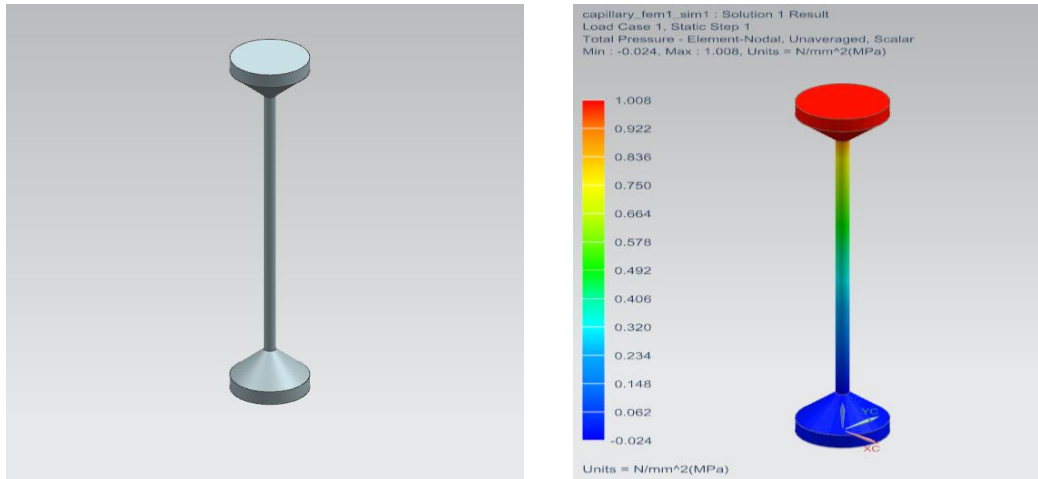
Ikusita emaitzen artean dagoen ezberdintasuna oso txikia dela, distribuzioen artean ematen den errore erlatibo maximoa %3 da. Beraz barrunbea elementu tetraedrikoekin saretzea ontzat hartuko da eta hemendik aurrera honela saretuko da.

### 11.2.6. KOMPENTSATZAILEAK

Azkenik, modeloari konpentsatzaileak gehitzea soilik falta da. Erabili diren konpentsatzaileak, kapilarra eta zuloa izan dira, modelizatzen errazten direlako.

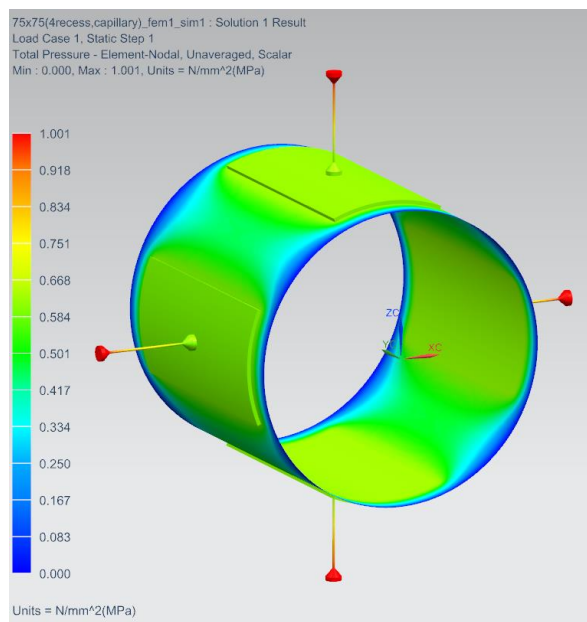
### 9.2.7.1 KAPILARRA

Lehenago azaldu den bezala, kapilarra tutu estu eta luze bat da eta kasu honetan, 20 mm luze den eta 0,6 mm-tako diametroa duen kapilar bat modelizatu da. Ondoren presioan garrantzirik ez duen sekzio handitze bat egin zaio barrunbera hobeto konektatzeko.



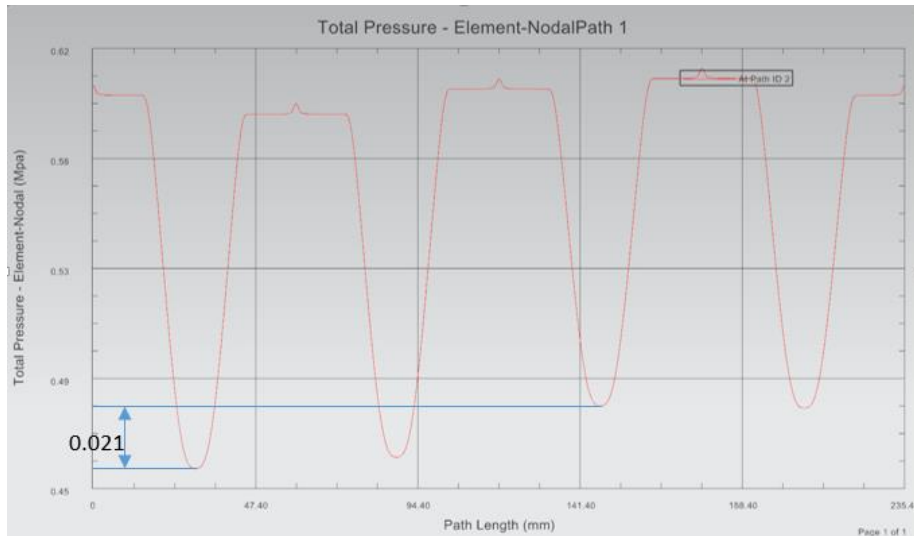
63. Irudia: Kapilarraren modeloa

Helburua, sarreran 1MPa jarri eta konpentsatzailean 0,5MPa-eko presio galera bat lortzea da. Horretarako, saiakera asko egin dira kapilarraren luzera eta diametroa aldatuz. Azkenean goian aipatu diren neurriekin emaitza onargarriak lortu dira. Konpentsatzaileak sartuta modeloak emaitzak onak ematen dituen ala ez ikusteko, modelo bat eginda eszentrikotasunik gabe eta beraz, barrunbe guztiek presio bera eduki beharko lukete. Emaitzak hurrengo irudian ikus daitezke.



64. Irudia: Kapilarrekin presio distribuzioa

Presio distribuzio horretatik, erdiko sekzioko presio distribuzioa atera da ikusteko ea barrunbe denetan emaitza berdintsuak lortu diren eta baita barrunbeen artean ere.

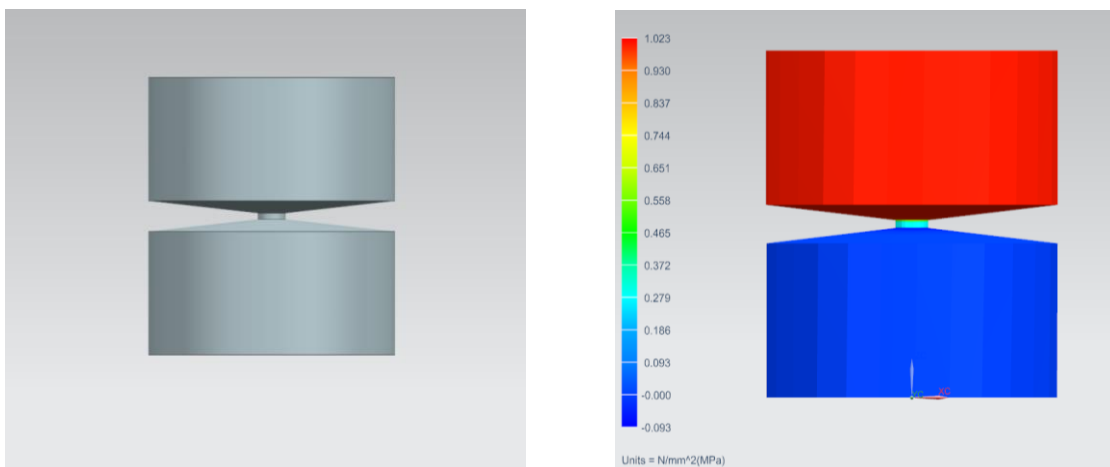


65. Irudia: Kapilarrekin kojinetearen erdiko sekzioko presio distribuzioa

65. Irudian ikus daitekeen bezala, barrunbetan presio berdintsua ematen du, sarreran 1Mpa izanik ezberdintasuna 0,021 Mpa-ekoa izanik. Barrunbeen arteko presioarekin berdina gertatzen da, beraz emaitzak ontzat hartuko dira.

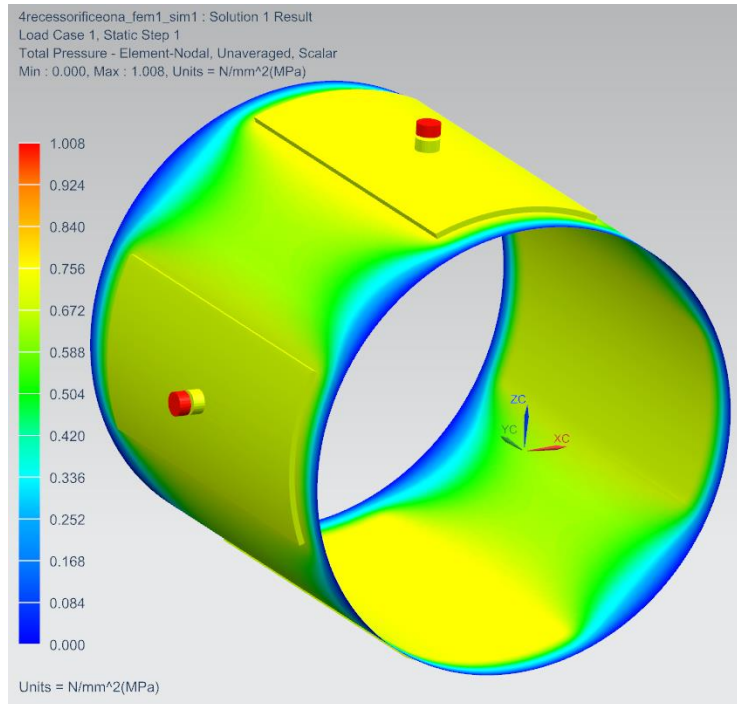
### 9.2.7.2 ZULOA

Zulo bat, bat bateko estugune bat da oso altuera gutxikoa. Kasu honetan, 0,45mm-tako diametroa duen zulo bat egin da eta 0,1mm-ko altuera duena. Irudian ikusten den bezala, zuloari modifikazio txiki bat egin zaio, “mesh mating”-a egin ahal izateko.



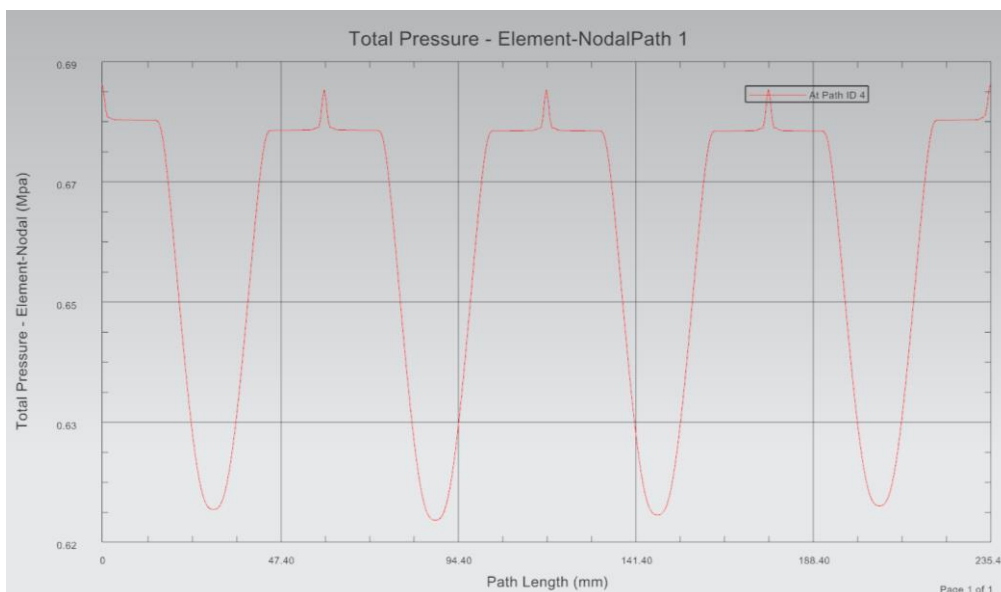
66. Irudia: Zuloaren modeloa

Behin ikusita zuloak ondo egin duela presio jaitsiera, kapilarrarekin egin den bezala modeloan jarri da eta simulatu egin da, lehen bezala, modeloa zentratuta dagoelarik eta helburua beraz lau barrunbetan presio berdintsua lortzea da, baita barrunbe arteko gainazal guztietan ere.



67. Irudia: Zuloak sartuta presio distribuzioa

67. Irudian ikusten den bezala presio distribuzio on bat lortu da. Erdiko sekzioko presio distribuzioaren grafikoa atera da aurreko kasuetan bezala.



68. Irudia: Zuloekin kojinetearen erdiko sekzioko distribuzioa

68. Irudian ikus daitekenez, lortutako emaitzak oso onak dira, barrunbe guztietan presio berdina lortu dela eta barrunbeen artean ere.

### 11.2.7. MODELO OSOAREN PLANTEAMENDUA

Hasieran planteatu den modeloaren zati guztiak modelizatzea eta saretzea lortu da eta ikusi da ere dena batera simulatuta emaitza onak lortu direla. Beraz azken pausoa, modelo honen dibertsifikazio azkar bat nola lortu aztertzea da. Hau da, modelo bat simulatu eta beste bat simulatu nahi bada zerbait aldatuta, aldaketa hori azkar egin ahal izatea dena hasieratik egin beharrean, aldaketa horiek hurrengoak izan daitezke:

- Tarteari dagokionez, diametroa, luzera, c (tarte erradiala) edo eszentrikotasuna aldatu daitezke.
- Barrunbeari dagokionez, kopurua, forma, alineamientoa ( eszentrikotasunarekikoa), tamaina ( bai luzeran eta baita angeluari dagokionez ere) eta kurbadura erradioa (hau noski, tartearen diametroarekin bat dator).
- Konpentsatzaileei dagokionez, kapilarra edo zuloa izan daitezke eta aparte, bakoitzaren luzera eta diametroa aldatu daitezke.

Hau dena kontuan hartuz, aldaketa hauek azkar egiteko, bi metodologia planteatu dira.

Batetik, NX-ek duen aukera bat, konjuntua .fem artxiboan osatzeko aukera ematen duela da, “assembly” bezala ezagutzen dena. Honela, aparte modelizatuta eta saretuta eduki daitezke alde batetik, tarte ezberdinak, bestetik barrunbe ezberdinak eta azkenik konpentsatzaileak. Lehenago ondorioztatu dugun bezala, gure modeloko hiru osagaien sareak, elkarren menpekoak izan behar dute emaitzak ondo eman dezaten (elkartzen diren gainazaletan sare berdina), beraz assembly-ak egitea ez du zentzurik, osagai bat aldatzeak eta ondorioz bere sarea, gainerako osagaien sareetan du eragina eta beraz metodologia honek ez du zentzurik kasu honetan.

Bestetik, aldaketak azkar egiteko aukera bat modelo parametrizatzea da. Honela, modeloaren kota guztiak parametro batzuen menpe geratzen dira. Beraz aldaketak egiteko nahikoa da modelora joan, parametro bat aldatu eta sarea dagoen artxiboa kargatu eta ondoren simulazioko artxiboa kargatzea. Sare guztiak geometriari lotuta daudenez, aldaketa guztiz automatikoa da.

Modu honetan, goian aipatu diren aldaketa ia denak egin daitezke oso azkar. Baina barrunbe kopurua aldatzean edo barrunbearen forma aldatzean logikoa den bezala, sarea berriz egin behar da. Arazo honi aurre egiteko, erabaki da barrunbearen forma eta kopuru bakoitzeko eta konpentsatzaile mota bakoitzeko modelo bat prest edukitzea. Beraz egingo diren modelo kopurua, barrunbeen forma ezberdinak bider barrunbe kopuru ezberdinak bider konpentsatzaile mota ezberdinak. Honela edozein alternatiba prest edukiko da eta nahikoa izango da simulatu nahi den modelo aukeratu eta bertan parametroak aldatu dena automatikoki kargatu eta simulatzeko prest egoteko.

# 12. ZURRUNTASUNAREN KALKULUA

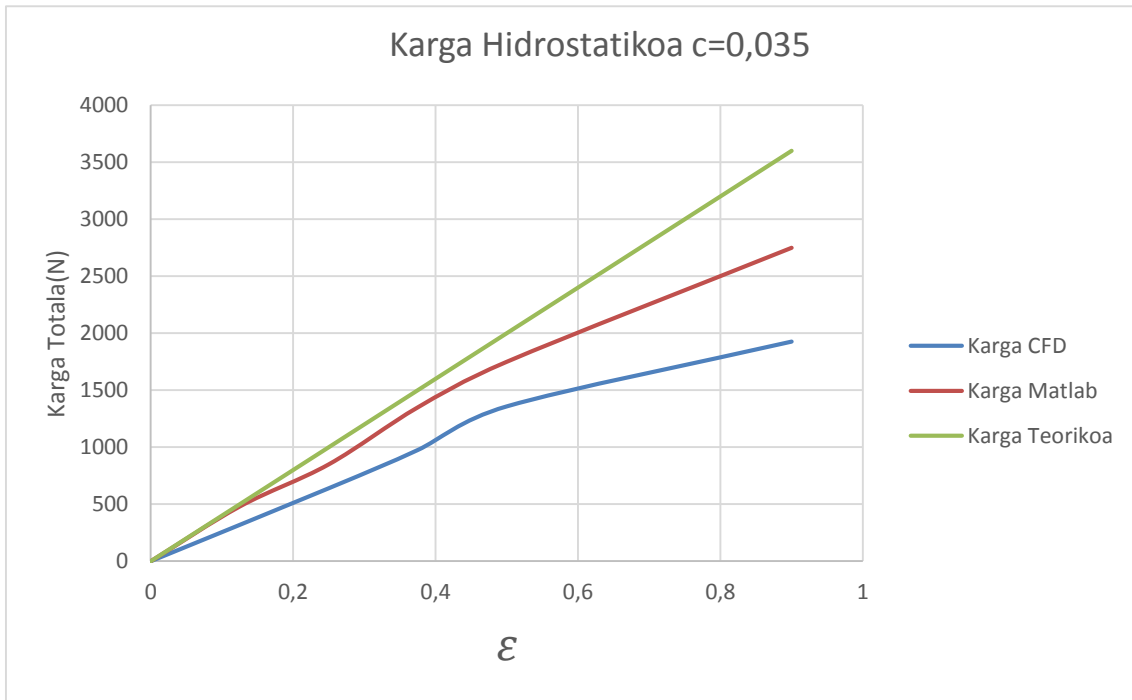
Proiektua amaitzeko, biraketa kojineten osoaren zurruntasuna kalkulatu da, bai modu analitikoan eta baita numerikoki ere. Zurruntasuna kalkulatzeko kapilar konpentsatzaile biraletako kojineten hibrido bat erabili da hurrengo dimentsioak eta olioaren propietateak dituen:

Ardatzaren diametroa	75 mm
Kojinetaren luzera	75 mm
Tarte erradiala	0.035mm
Euskarriaren dimentsioak	4 euskarri: 45°, 60mm, 1mm
Eszentrikotasuna	%25,%50,%75,%90
Biraketa abiadura	1000 bira/min
Kapilarraren luzera	20 mm
Kapilarraren diametroa	0.6 mm
Olioaren dentsitatea	860 kg/m <sup>3</sup>
Olioaren biskositatea	0.028 Pa.s
Olioaren bero espezifikoa	2000 J/kg °K
Sarrerako presioa (Ps)	10 bar

2. Taula: Zurruntasunaren kalkulurako datuak

Modelo hau saretzeko, aurreko atalean ondorioztatutako elementu tamaina erabili da, hau da, tartean lodier/8mm-tako elementuak eta gainazalean 0,5x0,5mm-takoak. Honela saretuta milioi bat nodo inguru lortu dira. NX-FLOW-ek modelo honen emaitzak lortzeko 3 ordu inguru behar izan ditu.

Zurruntasunaren kalkulurako, “z” ardatzaren norabidean eszentrikotasun ezberdinak jarri zaizkio modeloari eta indar totala kalkulatu da. Eszentrikotasun bakoitzarekin bi simulazio ezberdin egin dira, bata, abiadurarik gabe eta beraz atera den indar totala, indar hidrostatikoa da. MATLAB-etik ateratako emaitzak eta NX-FLOW-etik ateratakoak, analitikoki ateratako emaitzekin alderatu dira. Probatutako dago kalkulu analitiko horrek emaitza onak ematen dituela eszentrikotasuna txikia den kasuan[4].



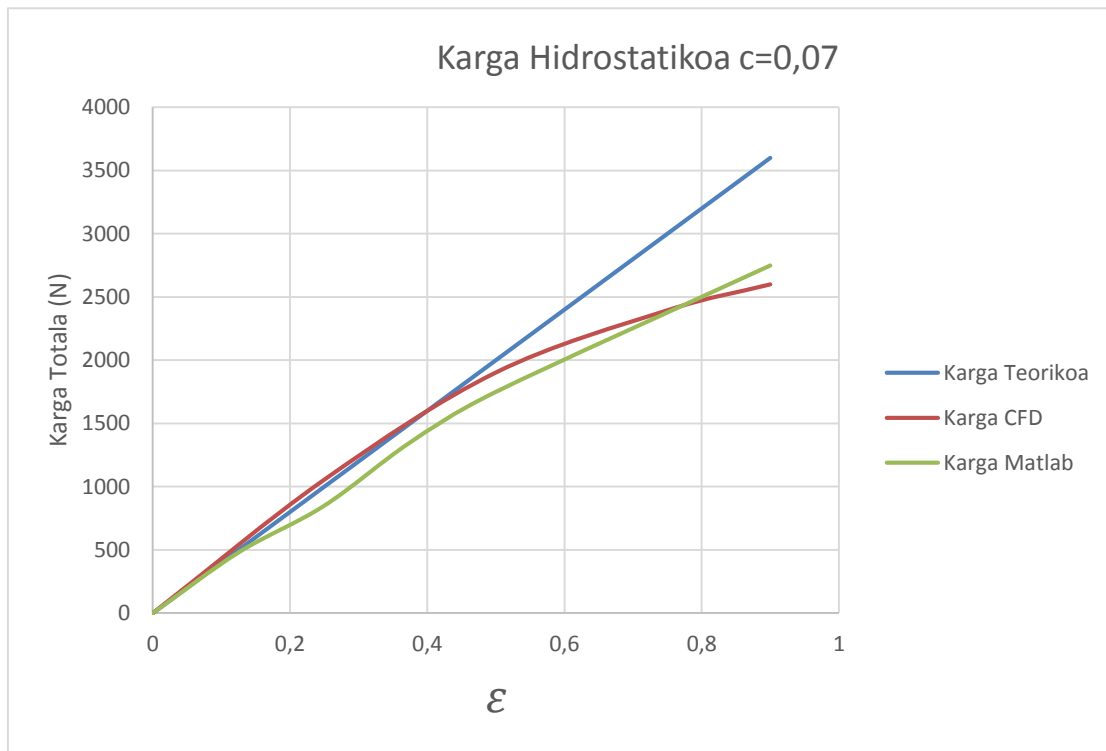
69. Irudia: Karga hidrostatikoa C=0.035mm

Grafikoan ikusten denez, indar hidrostatikoa eta eszentrikotasunaren arteko erlazioa lineala da. Zurruntasuna marra horren malda izango litzateke, hau da, indarraren aldaketa eta eszentrikotasunaren aldaketaren arteko produktua.

$$Zurruntasuna = \frac{\Delta F}{\Delta e}$$

JDK-ren kasuan, emaitzak ez dira espero ziren bezain onak. Emaitza hauen zergatia aztertzeko, kojinetearen tarte erradiala aldatzea erabaki da. Erabili den tarte erradial berria 0.07 mm izan da. Honela lortutako emaitzak hurrengo grafikoak ikus daitezke.





70. Irudia: Karga hidrostatikoa C=0.07mm

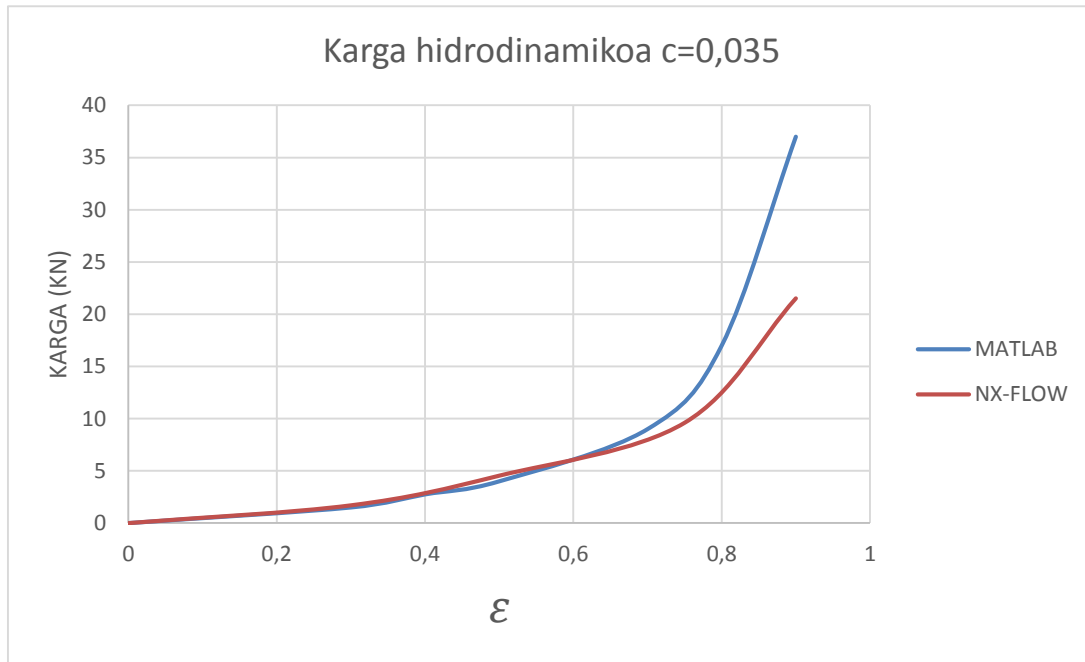
70. Irudian ikus daitekeen bezala, emaitzak hobeagoak dira. Eszentrikotasuna txikia denean, JDK bidez lortutako emaitzak teorikoaren oso antzekoak dira eta MATLAB bidez lortutakoak baino hobeak. Baina eszentrikotasun oso altutan, MATLAB bidez lortutako azpitik geratzen dira. Kontuan edukita simulazio guztitan erabili den elementu tamaina berdina dela, hemendik atera daitekeen ondorioa da elementuen aspektu ratio baterate NX-FLOW-ek emaitza onak lortzen dituela baina ratio horren gainetik, emaitzak ez direla onak.

Grafikoan ikusten denez, JDK-tik lortutako lerroa zuzena da  $\epsilon=0.5$  den arte, non bere aspektu ratioa lodiera txikieneko gunean 1:1:115 den. Aspektu ratio hori mantendu ahal izateko  $\epsilon=0.9$  denean sartu behar den elementu tamaina kontuan hartuz 25 milioi nodoko modelo bat beharko litzateke. Modelo hau simulatu ahal izateko egunak beharko liriteke. Azken grafikoko zurruntasunak tarteko eszentrikotasuna kontuan hartuz hurrengoak dira.

Modeloa	Teorikoa	NX-FLOW	MATLAB
Zurruntasuna(N/mm)	4000	3950	3480

3. Taula: Zurruntasunak

Behin indar hidrostatikoa eta zurruntasun hidrostatikoa kalkulatu, ardatzari abiadura sartu zaio eta berriz ere indarra kalkulatu da. Oraingoan ez dago modelo analitikorik emaitzak alderatu ahal izateko.



71. Irudia: Karga hidrodinamikoa,  $C=0.035\text{mm}$

Kasu honetan kalkuluak lehen modeloarekin soilik egin dira. Hemendik ateratzen den ondorioa berdina da, eszentrikotasuna erdi-baxua denean, NX-FLOW-k emandako emaitzak ontzat jo daitezke baina eszentrikotasun batetik aurrera elementu tamaina txikitu behar da emaitza onak lortzeko.

## 13. ENTSEGU BANKOAK

Esan den bezala, IK4-IDEKO-ko ultradoitasuneko laborategian, kojineten bi entsegu banku daude, bata biraketako kojinetearentzat eta beste kojinete lauentzat. Kontua da, lehen banku hauek beste leku batean zeudela eta lekualdaketaren ondorioz dena desmuntatuta dagoela. Beraz proiektu honen beste atal bat banku horiek prest jartzea da.

Entsegu bankua hurrengo osagaiak osatzen dute: Batetik, osagai hidrauliko bat dago, bertan olioaren tankeak eta bonbak daude beraien filtro etab-ekin. Tanke hauek uneoro hozkailuetara daude konektatuta, olioaren tenperatura konstantean mantentzeko. Azkenik aurrez aipatu diren entsegu bankuak daude.

Lehen osagai hauek denak batera zeuden leku berdinean eta beraz tankeetatik bankuetara 3 metro inguruko mangera batzuk zeuden. Baina lekualdaketaren ondorioz, tankeak eta bonbak dituen osagai hidraulikoa eta hozkailuak ezin dira ultrako laborategian sartu eta beraz beste leku batean jarri dira. Beraz egin dena izan da, lehen osagai hidraulikoan zeuden kontrol guztiak bikoiztu eta bankuak dauden lekuan panel hidrauliko bat jarri, bankuetan entseguak egin bitartean ekipoaren kontrol guztia edukitzeko.



72. Irudia: Entsegu bankoa

## 14. AURREKONTUA

Proiektu honen aurrekontua bi zatitan banatu daiteke, batetik bertan parte hartu duten pertsonen kostua eta bestetik proiektua egin ahal izateko erabili diren erraminten amortizazioa.

Proiektu honetan parte hartu duten pertsonak, proiektuaren egilea, bere enpresako tutorea, eta hainbat gauza egiten lagundu duten bi ingeniari izan dira. Bakoitzaren orduko kostua eta proiektua aurrera eramateko bakoitzak sartutako orduen arabera, hauen kostua hurrengoa da.

Langilea	Ordu kopurua (h)	Orduko Kostua (€/h)	Kostu Totala (€)
Estebe	915	3,85	3522,75
Harkaitz	50	100	5000
Ingeniero 1	30	75	2250
Ingeniero 2	20	55	1100
<b>Totala</b>			<b>11872,75</b>

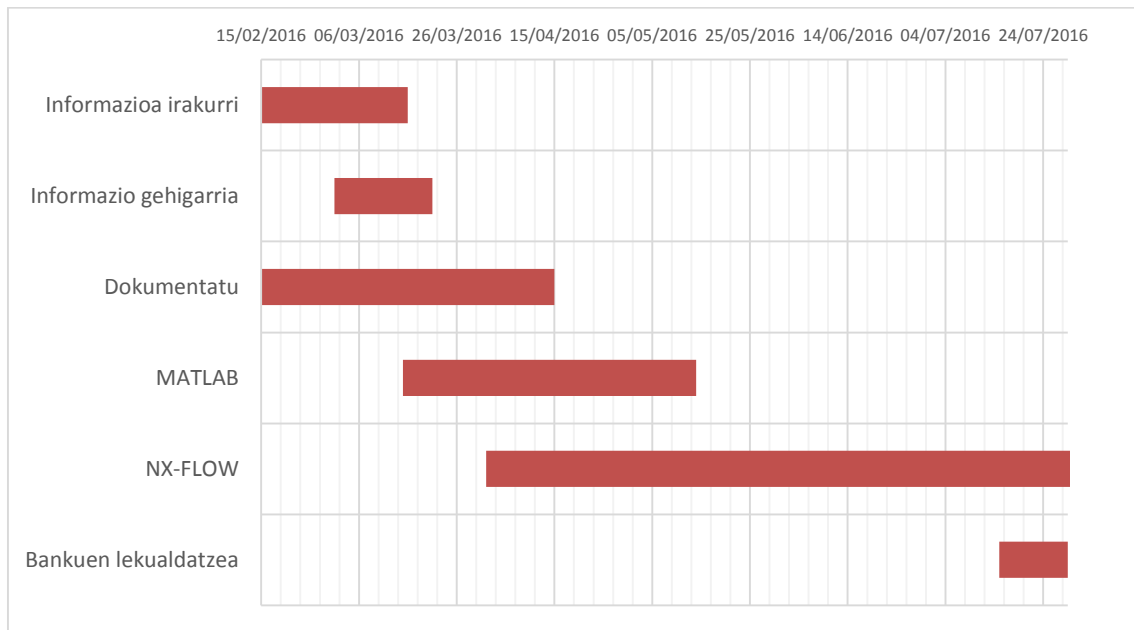
Bestetik, erabilitako erramintak NX, Matlab eta ordenadorea izan dira eta hauen amortizazioa hurrengo taulan ikus daiteke, NX eta Matlab-en kasuan, sartu den bitzita erabilgarria urtebetekoa jarri da eta beraz kostua ere urtebeteko lizentziarena da.

Amortizazioa	Kostua (€)	Bitzita erabilgarria (h)	Orduak lanean (h)	Kostu totala (€)
Ordenagailua	2000	6525	915	280,46
NX lizentzia	8000	1740	750	3448,27
Matlab	2000	1740	50	57,47
<b>Totala</b>				<b>3786,2</b>

Beraz proiektuaren kostu totala 15658,95 €-takoa da. Proiektuaren onura ekonomikoak kontuan hartuta, kostua ez da altua.

# 15. GANTT DIAGRAMA

Ondoren, proiektu hau egiteko egin diren faseak azaltzen dira, proiektua egiten pasa den denboran zehar.



## 16. ONDORIOAK ETA ETORKIZUNEKO LANAK

Proiektu honetan lanik gehiena NX-FLOW-en egin denez, saretzearen unean ateratako ondorioak aipatuko dira hurrena:

- Atera den lehen ondorioa da, kojinetek emaitza onak eman ditzan, tartearen lodieran gutxienez 8 elementu, hau da 9 nodo, eduki behar dituela. Gainera, azalera 0,5x0,5mm-tako azalera duten elementuak erabili behar dira. Beraz tarteko elementu tamaina definituta geratzen da.
- Hurrengo ondorioa, “High resolution polygon bodies” aukeraren ingurukoa da. Ikusi da aukera hau aktibatuta eduki ala ez dagoen diferentzia sarean dagoela, ez bada aktibatzen, ezin da sarea modu automatikoan egin eta beraz sarea ez da solidoari lotuta geratzen. Beraz, “High resolution polygon bodies” aukera aktibatu behar da.
- Postprozesadorean, presio distribuziotik indar totala ateratzeko presio negatiboak ezabatu behar dira. Hornitze presioa ez da nahikoa presio negatiborik ez agertzeko eta beraz Gumble-ren ingurune baldintza aplikatu da, Reynolds-en bigarren baldintza aplikatzea ez delako lortu.
- Beste arazo bat, tartea simulatzean sortu da. Simulazioak amaitutzat emateko jarri diren baldintzak bete ondoren, emaitzak asko aldatu daitezkeela ikusi da. Hemendik lortutako emaitzak emaitza teorikoekin alderatu dira simulazioak noiz moztu ahal diren jakiteko baina emaitza teorikoen lerroa eta NX-etik ateratako lerroa ez zetozen bat. Beraz etorkizuneko lana bezala, modelo erraz hori entsegu bankuetan probatzea izango da.

Gainera, beste ondorio bat da 15 mikratik bera, NX-ek limitazio bat duela modeloa saretzean. Beraz printzipioz %60tik goragoko eszentrikotasuna ezin izan da saretu modu automatikoan eta sarea manualki egin behar izan da. Ikusi den bezala, modu honetan saretuta ere emaitza onak lortu dira.

- Lortu den beste ondorio bat, geometria ezberdinak elkartzearena izan da. Ikusi da geometrien sareak elkartzeko modurik onena, emaitza onenak ematen dituen, “mesh mating”-a egitea dela, hau da, geometrien sareak elkartzen diren gainazalean sarea konpartitzea. Beraz, elkarren ondoan dauden geometrien sarea baldintzatuta geratzen dira, baina fluxua jarraia da eta emaitza onak lortu dira.
- Azkenik, atera den azken ondorioa, hasieran proposatu den malgutasunaren ingurukoa da. Ondorioztatu da malgutasun onena lortzeko, modeloa parametrizatzea dela irtenbiderik onena. Desabantaila bakarra da, modelo bat egin beharko dela, barrunbearen forma bakoitzeko, barrunbearen kopuru bakoitzeko eta konpentsatzaile bakoitzeko.

Bestetik, NX-FLOW-en eta MATLAB-en zehaztasunari begiratu gero atera den ondorioa da, biek emaitza onak ematen dituztela emaitza teorikoekin alderatuz. Eszentrikotasuna txikia eta ertaina den kasuan, NX.-ekin emaitza hobekak lortu dira baina eszentrikotasun handietan, MATLAB-ek emaitza hobekak eman ditu. Aipatu den bezala, honen zergaitia NX-en erabilitako elementu tamaina da, eszentrikotasuna handia denean, aspektu ratio oso txarra duelako.

Azkenik, ondorio nagusi bezala aipatu, modeloak errazak direnean, simulatzeko erraminta hobekoa dela MATLAB, kalkuluak oso denbora gutxian egiten dituelako. Baina modeloa zailtzen denean MATLAB-en kodigoa asko zailtzen da eta NX alternatiba on bat dela ikusi da. Beraz, MATLAB-ek behin kodigoa edukita azkartasuna ematen du, baina malgutasun oso txikia du, barrunbearen forma aldatu nahi izanez gero adibidez, kodigoa goitik behera aldatu beharko litzatekelako. NX-ek berriz, malgutasun hori badu baina azkartasuna falta du.

Etorkizunerako lanen artean, egin diren simulazioak entsegu bankuan probatzea dago, , NX FLOW-ek eta MATLAB-ek ematen dituen emaitzak, emaitza errealekin alderatzeko. Horretarako, entsegu bankua martxan jartzeko egin behar diren pauso guztiak eman beharko dira

Simulazioei dagokienez, oraindik baldintza gehiago jarri behar zaizkio modeloari errealitatera hurbiltzeko. Baldintza horien artean bat beroa da. Kojineteetan abiadura handiak ematen direnez, olio berotu egiten da paretekin ematen den marruskaduragatik eta tenperatura aldatetaren ondorioz, biskositate aldateta dago eta honenbestez presio distribuzioaren aldateta. Beste baldintzetako bat, olio berotzearen ondorioz, kojineteari ere berotu egingo da eta dilatazioak emango dira, berriz ere emaitzak aldatuz.

---

## 17. BIBLIOGRAFIA

1. Rowe WB. Hydrostatic, Aerostatic, and Hybrid Bearing Design. Elsevier; 2012. 353 p.
2. F. M. Stansfield. Hydrostatic bearings for machine tools and similar applications. 1970
3. Frene J, Nicolas D, Degueurce B, Berthe D, Godet M. Hydrodynamic Lubrication: Bearings and Thrust Bearings. Elsevier; 1997. 499 p.
4. Bassani R, Piccigallo B. Hydrostatic Lubrication. Elsevier; 1992. 559 p.
5. San Andres L, Yang Z, Childs DW. Thermal Effects in Cryogenic Liquid Annular Seals—Part II: Numerical Solution and Results. J Tribol. Abril de 1993;115(2):277-84.
6. Tucker PG, Keogh PS. A Generalized Computational Fluid Dynamics Approach for Journal Bearing Performance Prediction. Proc Inst Mech Eng Part J J Eng Tribol. 1 de junio de 1995;209(2):99-108.
7. Keogh PS, Gomiciaga R, Khonsari MM. CFD Based Design Techniques for Thermal Prediction in a Generic Two-Axial Groove Hydrodynamic Journal Bearing. J Tribol. 1 de julio de 1997;119(3):428-35.
8. Zhang JX, Rodkiewicz CM. On the Design of Thrust Bearings Using a CFD Technique. Tribol Trans. Enero de 1997;40(3):403-12.
9. Brajdic-Mitidieri P, Gosman AD, Ioannides E, Spikes HA. CFD Analysis of a Low Friction Pocketed Pad Bearing. J Tribol. 9 de mayo de 2005;127(4):803-12.
10. Ravikovich YA, Ermilov YI, Pugachev AO, Matushkin AA, Kholobtsev DP. Prediction of operational characteristics of fluid-film and gas bearings for high-speed turbomachinery using computational fluid dynamics. 1 de Enero de 2014
11. Tiwari P, Kumar V. Analysis of Hydrodynamic Journal Bearing Using CFD and FSI Technique. En ESRSA Publications; 2014
12. Guo Z, Hirano T, Kirk RG. Application of CFD Analysis for Rotating Machinery—Part I: Hydrodynamic, Hydrostatic Bearings and Squeeze Film Damper. J Eng Gas Turbines Power. Abril de 2005;127(2):445-51.
13. Yu X, Wang Z, Meng X, Li H, Liu D, Fu X, Wu B, Tan L, Qin B, Dong X. Research on Dynamic Pressure of Hydrostatic Thrust Bearing Under the Different Recess Depth and Rotating Velocity. Int J Control Autom. 7(2):439-46.



- 
14. Lihua L, Hao S, Yingchun L, Qiang Z. Research on Static Stiffness of Hydrostatic Bearing using Fluid-Structure Interaction Analysis. *Procedia Eng.* Enero de 2012;29:1304-8.
  15. S. Chaitanya Kumar, R. Ganapathi, JAWAHARLAL NEHRU TECHNOLOGICAL UNIVERSITY COLLEGE OF ENGINEERING, ANANTAPUR. CFD Analysis on Hydrodynamic Plain Journal Bearing using Fluid Structure Interaction Technique. *Int J Eng Res [Internet]*. 13 de julio de 2015
  16. James H. Ball. *Design Considerations for Thrust Bearing Applications*. 1998
  17. K B S V D Prasad, Dr. K. Balaji Reddy, R Sam Sukumar, Amruthaluri Sai Teja, Vanamali Rambabu, Gubbala Rajesh, Ravi Wesley Moses, Pilli Ashok Kumar. *Fluid Structure Interaction of Liquid Lubricated Cylindrical Journal Bearing using CFD*. 2016