

GRADUA: INDUSTRIA TEKNOLOGIAREN
INGENIARTIZAKO GRADUA
GRADU AMAIERAKO LANA

***ERRODAMENDU ALANBRIKOEN
EDO "WIRE-RACE BEARING"EN
PORTAERA ERRESISTENTEA***

Ikaslea: Olaetxea, Zabaleta, Martin

Zuzendaria: Aguirrebeitia, Celaya, Josu

Ikasturtea: 2017-2018

Data: 2018ko uztaila

AURKIBIDEA

Irudien zerrenda	3
Taulen zerrenda	5
Laburpena	6
Resumen	6
Abstract	7
1 Sarrera.....	8
2 Testuingurua.....	10
3 Helburuak eta irismena	14
4 Proiektuaren onurak	15
5 Artearen egoera.....	17
5.1 Lau kontaktu puntuko errodamenduak.....	17
5.2 Pista alanbrikodun edo “wire-race” errodamenduak	22
6 Alternatiben analisisa.....	24
7 Soluzioaren deskribapena.....	26
7.1 Lau kontaktu puntuko errodamenduaren eredua.....	26
7.1.1 Geometria	26
7.1.2 Sarea	32
7.1.3 Ingurune baldintzak	34
7.1.4 Azpimodeloa.....	34
7.1.4.1 Geometria	35
7.1.4.2 Sarea	35
7.1.4.3 Ingurune baldintzak.....	36
7.2 Pista alanbrikodun errodamenduaren eredua	37
7.2.1 Geometria	37
7.2.2 Sarea	43
7.2.3 Ingurune baldintzak	44
7.2.4 Azpimodeloa.....	45
7.2.4.1 Geometria	45
7.2.4.2 Sarea	45
7.2.4.3 Ingurune baldintzak.....	46
8 Metodologia.....	47
8.1 Ahalmen estatikoen lorpena.....	47
8.2 Analisisien gauzatzea.....	48
8.3 Soluzioen lorpena eta ondorioen ateratzea	50
8.3.1 Lau kontaktu puntuko errodamendu estandarra, $s=0.943$	50

8.3.2	Lau kontaktu puntuko errodamendu estandarra, $s=0.87$	53
8.3.3	Pista alanbrikodun errodamendua edo wire-race bearinga, $s=0.943$	55
8.3.4	Pista alanbrikodun errodamendua edo wire-race bearinga, $s=0.87$	57
9	Gantt diagrama	61
10	Aurrekontua	64
11	Ondorioak	66
12	Erreferentziak	68

IRUDIEN ZERRENDA

IRUDIA 1: Errodamenduen sailkapena.....	11
IRUDIA 2: Wire-race bearing edo pista alanbrikodun motako errodamendua.....	13
IRUDIA 3: Tanke bateko kanoiarene alanbredun motako errodamendua.....	13
IRUDIA 4: Lau kontaktu puntuko errodamendu batean aplikatu daitezkeen karga motak. ...	18
IRUDIA 5: Aplikaturiko kargen onartze-gainazala.....	18
IRUDIA 6: Emaitzen konparaketa, ardatz normalizatueta.....	19
IRUDIA 7: Lau kontaktu puntuko errodamenduen aukeraketa-kurbak.....	20
IRUDIA 8: IRAUNDI enpresaren POS214 errodamenduaren aukeraketa-kurbak.....	21
IRUDIA 9: 1 Ereduaren geometria.....	26
IRUDIA 10: 2 Ereduaren parametrizazioa (Kontutan izan irudian agertzen diren parametroen izenak ez direla definitiboak).....	27
IRUDIA 11: 3 Ereduaren geometria bat.....	28
IRUDIA 12: 3 Ereduaren parametroak.....	28
IRUDIA 13: Est. ereduaren geometria definitiboa.....	29
IRUDIA 14: Est. ereduaren bolaren sekzioa.....	32
IRUDIA 15: Est. ereduaren kanpo-eraztunaren eta bolaren sekzioa.....	33
IRUDIA 16: Est. ereduaren ingurune baldintzak.....	34
IRUDIA 17: Est. ereduaren azpimodeloaren geometria.....	35
IRUDIA 18: Est. ereduaren azpimodeloaren sarea.....	36
IRUDIA 19: Est. ereduaren azpimodeloaren ingurune baldintzak.....	36
IRUDIA 20: Al. ereduaren geometria bat.....	37
IRUDIA 21: Al. ereduaren bola.....	38
IRUDIA 22: Al. ereduaren kanpo-eraztuna.....	38
IRUDIA 23: Alanbre diametroa vs Bola diametroa FRANKE GMBHren errodamendu alanbrikoetarako.....	41
IRUDIA 24: Biribilketa erradioa vs Bolaren diametroa Franke GmbH-ren errodamendu alanbrikoetarako.....	42
IRUDIA 25: Al. ereduaren kanpo-eraztuna.....	43
IRUDIA 26: Al. ereduaren pista.....	44
IRUDIA 27: Al. ereduaren ingurune baldintzak.....	44
IRUDIA 28: Al. ereduaren azpimodeloaren geometria.....	45
IRUDIA 29: Al. ereduaren azpimodeloaren sarea.....	46
IRUDIA 30: Al. ereduaren azpimodeloaren ingurune baldintzak.....	46
IRUDIA 31: Análisi-metodologia eskema.....	47
IRUDIA 32: Akzio-erreakzio sistema EFM ereduaren.....	49
IRUDIA 33: Lau kontaktu puntuko ereduaren zurruntasun diagrama ($s=0.943$).....	50
IRUDIA 34: Est_0943 ereduaren kontaktu-portaera, $t=0.15789$ segundo.....	51
IRUDIA 35: Est_0943 ereduaren kontaktu-portaera, $t=0.68421$ segundo.....	52
IRUDIA 36: Est_0943 ereduaren kontaktu-portaera, $t=0.8$ segundo.....	52
IRUDIA 37: Est_0943 ereduaren kontaktuko tentsioak, $t=0.97$ segundo.....	53
IRUDIA 38: Est_087 ereduaren zurruntasun diagrama.....	54
IRUDIA 39: Est_087 ereduaren kontaktu-portaera, $t=1$ segundo.....	54
IRUDIA 40: Est_087 ereduaren kontaktuko tentsioak, $t=1$ segundo.....	55
IRUDIA 41: Al_0943 ereduaren zurruntasun diagrama.....	56
IRUDIA 42: Al_0943 ereduaren kontaktu-portaera, $t=0.21053$ segundo.....	56
IRUDIA 43: Al_0943 ereduaren kontaktuko tentsioak, $t=1$ segundo.....	57
IRUDIA 44: Al_087 ereduaren zurruntasun diagrama.....	58
IRUDIA 45: Al_087 ereduaren kontaktu-portaera, $t=0.26316$ segundo.....	58

IRUDIA 46: Al_087 ereduaren kontaktu-portaera, $t=0.73684$ segundo.	59
IRUDIA 47: Al_087 ereduaren kontaktuko tentsioak, $t=0.926$ segundo.....	59
IRUDIA 48: Al_087 ereduaren kontaktuko tentsioak, $t=0.825$ segundo.....	60
IRUDIA 49: Gantt diagrama.	63
IRUDIA 50: Zurruntasun kurbak.	66

TAULEN ZERRENDA

TAULA 1: Est. ereduaren parametroen sailkapena.	31
TAULA 2: Parametrizaziorako konstante biderkatzaileak.	31
TAULA 3: Al. ereduaren parametroen sailkapena.....	40
TAULA 4: FRANKE GMBHren errodamendu alanbrikoen parametrizaziorako konstante biderkatzaileen sailkapena.	41
TAULA 5: Ahalmen estatiko axial teorikoak.	48
TAULA 6: Ahalmen estatiko axial teoriko moldatuak.....	48
TAULA 7: Ahalmen estatiko axial teoriko moldatuak, EFM ereduaren kasuan.	48
TAULA 8: Analisi-parametroak landutako kasuen arabera.	50
TAULA 9: Est_0943 ereduaren ahalmen estatiko axial balioak.....	53
TAULA 10: Est_087 ereduaren ahalmen estatiko axial balioak.....	55
TAULA 11: Al_0943 ereduaren ahalmen estatiko axial balioak.	57
TAULA 12: Al_087 ereduaren ahalmen estatiko axial balioak.	60
TAULA 13: Barne-orduak.	64
TAULA 14: Amortizazioak.....	64
TAULA 15: Mantenua.	64
TAULA 16: Kontsumo elektrikoa.....	65
TAULA 17: Aurrekontua.	65
TAULA 18: Ahalmen estatikoen konparaketa-taula.....	67

LABURPENA

Proiektu honetan “wire-race bearing” edo pista alanbrikodun errodamenduak analizatu dira. Haien kalkuluetarako normarik ez dagoela eta, beste errodamendu batzuekin konparatu dira: lau kontaktu puntukoak, zeinak ISO norma batez araututa dauden. Lau kontaktu puntuko errodamenduen aukeraketaren zergatia bien kargak eusteko konfigurazioari dagokio: karga axial, erradial eta makurtzaileak jasateko gai dira.

Bi errodamendu mota hauen eredu parametrikoak garatu dira ANSYS WORKBENCH softwarean eta Bilboko Ingeniaritza Eskolako Ingeniaritza Saileko Kalkulu Zentroan, finkaturiko analisiak jorratu dira. Ondoren, analisi hauetatik informazioa bildu eta bi errodamenduak konparatzen dituzten zurruntasun diagramak irudikatu dira eta ahalmen estatiko axialak lortu dira, bola-pista kontaktuak aztertzeaz gain.

Hitz gakoak: errodamendu, ahalmen estatiko, wire-race, lau kontaktu puntu

RESUMEN

En este proyecto se han analizado los rodamientos llamados rodamientos de pistas alámbricas o “wire-race bearings”. Debido a que actualmente no existe ninguna norma que especifique como llevar a cabo cálculos para este tipo de rodamientos, éstos han sido comparados con otro tipo de rodamientos, los de cuatro puntos de contacto, los cuales sí tienen una norma ISO específica. La principal razón de la elección de los rodamientos de cuatro puntos de contacto como base, es que los dos mantienen una configuración similar en cuanto a la capacidad de soportar cargas. Ambos son capaces de soportar cargas axiales, radiales y de momentos flectores.

Utilizando el software ANSYS WORKBENCH, dos modelos paramétricos de dichos rodamientos han sido desarrollados y posteriormente varios análisis han sido llevados a cabo en el Centro de Cálculo del Departamento de Ingeniería Mecánica de la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Una vez concluidos dichos análisis, se ha procedido a obtener información de ellos y se han representado los diagramas de rigidez que comparan los dos tipos de rodamientos, además de analizar a fondo

las huellas de contacto bola-pista y obtener las capacidades estáticas axiales de cada uno.

Palabras clave: rodamiento, capacidad estática, wire-race, cuatro puntos de contacto

ABSTRACT

In this project the type of bearings known as wire-race bearings have been analyzed. Due to there is currently no standard that specifies how to carry out calculations for this type of bearings, these have been compared with other types of bearings, four-point contact bearings, which do have a specific ISO standard. The main reason for the choice of four-point contact bearings as a base is that the two maintain a similar configuration in terms of the capacity to withstand loads. Both are capable of supporting axial, radial and bending moment loads.

Using ANSYS WORKBENCH software, two parametric models of these bearings have been developed and subsequently several analysis have been carried out in the Calculation Center of the Mechanical Engineering Department of the School of Engineering of Bilbao. Once these analysis have been completed, information has been obtained from them and rigidity diagrams have been represented in order to compare the two types of bearings, as well as a thorough analysis of the ball-track contact traces and the obtaining of axial static capacities.

Keywords: bearing, static capacity, wire-race, four-point contact

1 SARRERA

Pista alanbrikodun errodamenduak merkatuan geroz eta eskari gehiago duten errodamendu mota bat dira, aplikazio konkretu batzuetan. Hauen ezaugarri nagusia beste errodamenduekin konparatuz, bolen eta eraztunen arteko kontaktua zuzena ez dela da; hau da, boleak errodaturako duten pistak ez dira eraztunak berak izango baizik eta eraztunetan bertan akoplatuta dauden alanbre zirkular batzuk. Horren ondorio zuzena errodamenduaren pisuaren galera nabaria da. Gainera, elementu mugikorraren inertzia txikiagotzen da, azelerazio handiagoak lortuz.

Errodamenduen kalkulurako erabili ohi den kontzeptu garrantzitsu bat ahalmen estatikoarena da: errodamenduaren puntu kritikoenean (bolaren eta pistaren arteko kontaktua) agertzen den presioa 4200 MPa-koa izatera iristeko errodamendua jasateko gai den karga. Ahalmen estatiko hau axiala bada, karga axiala izango da.

ISO normak errodamendu mota ezberdinetarako ahalmen estatikoak kalkulatzeko arauak zehazten ditu. Baina, pista alanbrikodun errodamenduen kasuan ez dago normarik. Horren ondorioz, lau kontaktu puntuko errodamenduekin konparatu nahi dira, zeinek ISO norma bat baduten.

Hau horrela, ANSYS WORKBENCH programaren bitartez, Elementu Finituetako Metodoa (EFM hemendik aurrera) erabiltzen duten bi eredu sortu nahi dira. Eredu hauen geometria sortzeko, aipaturiko programaren "Design Modeler" erreminta erabiliko da. Erreminta honen bidez, eredu bakoitza parametrizatzeko aukera dago, dimentsionamenduari dagokionez. Horren ondorio zuzena ondoren planteatuko diren analisien optimizazioa da, izan ere, errodamendu ereduen tamaina aldatu nahi izanez gero, aldeztatik inplementaturiko parametrizazioaren bidez era azkar eta eraginkor batean egin daiteke.

Eredua osatzeko, behin geometria definituta, saretzea eta ingurune baldintzak aplikatzea geratuko da. Ereduen geometriaren konplexutasunagatik eta Eskolako Ingeniaritza Mekanikoa Sailaren analizatuko diren errodamenduekiko berezko interesagatik, prozesu honetarako, Kalkulu Zentroko Iñigo Martin doktoregaiaren laguntza izango da. Bera arduratuko da gehienbat saretze

prozesuaz, emandako pausoen zergatiaren inguruko galderak egingo zaizkiolarik, dokumentazio prozesu bat bezala.

Ereduetatik abiatuta, ANSYS WORKBENCH programako "Mechanical" erremintaren bidez, EFM bidez, analisi batzuk burutu nahi dira eta aipaturiko bi errodamenduak konparatzeko beharrezko informazioa lortu nahi da.

2 TESTUINGURUA

Errodamenduen garapen historikoa definitzeko, K.A. 3500garren urtean kokatuko gara, Mesopotamiako gurpilaren asmakizunean, hain zuzen ere. Gurpil honek haren biraketa ardatzean kokatuta zegoen egurrezko ardatz batekin kontaktatzen zuen eta berehala ohartu ziren bi elementu hauen arteko marruskadurak gurpilaren biraketa zuzena oztopatzen zuela. Horren ondorioz, marruskaduraren eragin hau murrizteko asmoz, K.A. 3000garren urtean animaligantza gurpil-ardatz sistemaren lubrikatzaile bezala hasi ziren erabiltzen.

Errodamenduen lehen aztarna K.A. 40garren urtekoa da, non egurrez eginiko bolazko errodamendu baten arrastoa aurkitu zen Italiako Nemi lakuko ontzi erromatar batean. Data horretatik XV. menderarte ez da errodamenduen datu historikorik aurkitu. Mende honetan, Leonardo Da Vinci asmatzaileak bolazko errodamenduen lehenengo diseinua garatu zuen helikoptero batentzako, nahiz eta ezin izan zuen eraiki.

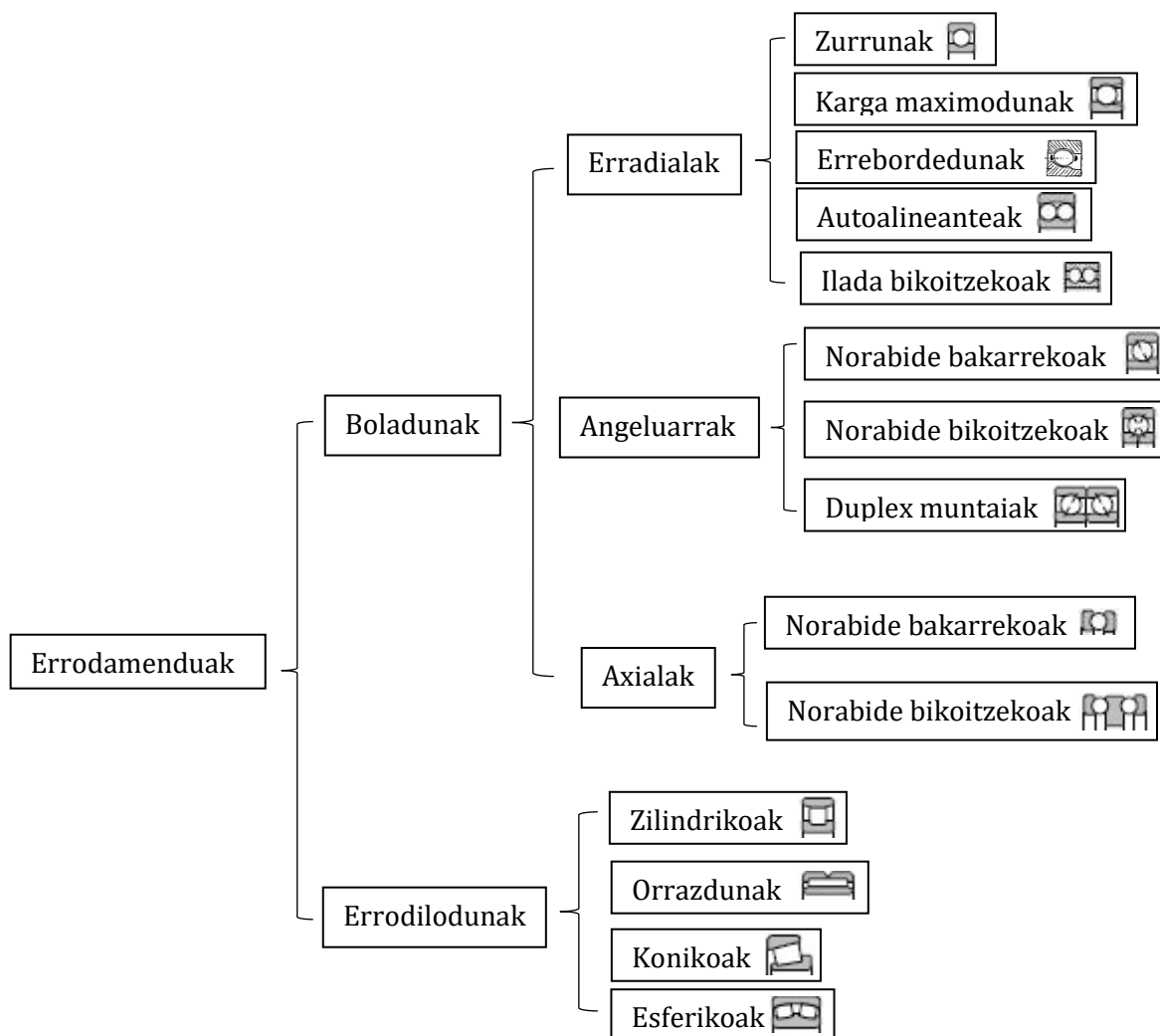
Aro Garaikidea hasi berririk, 1794. urtean bolazko errodamenduen lehenengo patentea sortu zen, Phillip Vaughan ingelesaren eskutik. Garai honetatik aurrera emango zen errodamenduen benetako garapena, izan ere, Industria Iraultzarekin batera, makineria berria sortu zenez, makinen osagaien garapena beharrezkoa zen, hauek ondo funtziona zezaten. 1869.urtean, Jules Suriray frantsesak bolazko errodamendu erradial baten lehenengo patentea sortu zuen, errodamendu hauek bizikletetan erabiliko zirelarik. Handik gutxira, 1882. urtean, Heinrich Hertz fisikari alemaniarrek gainazal kurboko bi solido elastikoren arteko kontaktu-portaera ebatzi zuen, aldi berean errodamenduen portaera azaltzen zuena.

1907. urtean, Sven Wingwuist ingeniariak behatu zuen nola hurak lan egiten zuen industriako makinen errodamenduek akats asko ematen zutela. Arazo hauentzako soluzio bat garatu zuen (boladun errodamendu autoalineanteak), eta, honekin batera, gaur egun mundu mailan oso famatua den SKF enpresa fundatu zuen. Aurrerago, 1917. urtean, ABMA (American Bearing Manufacturers Association) sortu zen, Lehen Mundu Gerran errodamenduen hornitzaile bezala lan

egiteko. Mende honetan zehar, errodamendu mota desberdin asko garatu ziren eta hauek fabrikatu eta hornitzen zituzten beste hainbat enpresa sortu ziren.

Normalizazioari dagokionez, Lundberg eta Palmgren ingeniariak, errodamenduen iraupenari buruzko aurreikuspena egiten zuen teoria bat garatu zuten 1924. urtean. Teoria hau hobetzen joan ziren urteak pasa ahala, 1947. urtean hari buruzko lan bat argitaratu zutelarik. Teoria honetan oinarrituta, 1950. urtean ABMA-k errodamenduen aukeraketarako lehenengo norma ezarri zuen, ondorengo urteetan ANSI eta ISO erakundeek onartu zutelarik.

Arestian aipatu den bezala, lehen errodamenduaren asmakizunetik hasi eta orain arte, errodamendu mota desberdin asko garatu dira. Mota hauetako asko sailkatzeko ondorengo giltza diagrama erabili da non errodamendu bakoitza bere sinbologiarekin adierazten den:



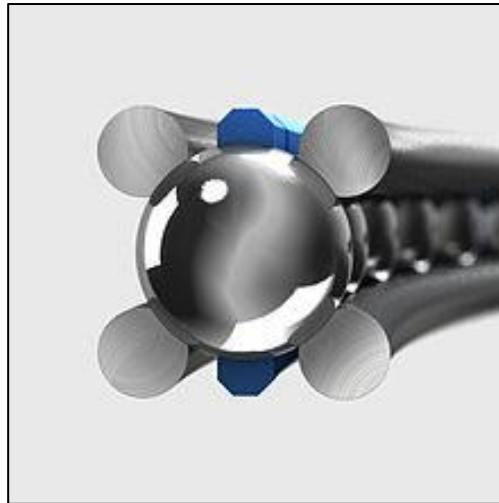
IRUDIA 1: Errodamenduen sailkapena.

Ikustenenez, errodamendu mota ugari dago, eta haien aukeraketa aplikazioaren arabera izango da. Adibidez, karga axial handiko egoera bat izanez gero, boladun errodamendu axial bat izango da egokiena, karga axialak jasateko gaitasun handiagoa duelako. Aukeraketa honen determinazioa kuantitatiboki adierazi nahi badugu, ziurtatu daiteke errodamenduaren kontaktu angelua (errodamenduaren ardatz erradialaren eta bola eta pistaren arteko kontaktuaren angelua) geroz eta handiagoa izan, orduan eta egokiagoa izango dela karga axial bat jasateko. Hala ere, honek ez du esan nahi errodamendu erradialek ez dutela karga axialik jasateko gaitasunik, izan ere, karga axialak jasotzeko moldatuak izan ahal dira.

Bilboko Ingeniaritza Eskolako Ingeniaritza Mekanikoa Saileko ADM (Análisis y Diseño Mecánico) taldeak errodamenduen inguruko analisi ugari egin ditu jadanik, azken urteetan lau kontaktu puntuko errodamenduetan zentratu direlarik. Adibidez, aerosorgailu eolikoetan erabiltzen diren errodamenduak analizatu dira, zeinetan iraultze momentu handiak agertzen diren. Errodamendu mota hau norabide bikoitzeko boladun errodamendu angeluar bat bezala sailka dezakegu, non kontaktu angelua 45° -koa den. Honen ondorioa karga erradial eta axialak jasateko aproposa dela da.

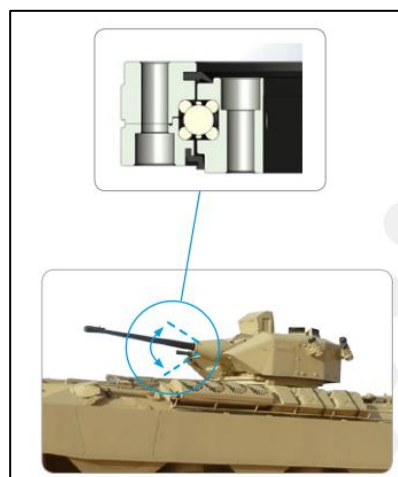
Hala ere, nahiz eta errodamenduen inguruko analisi asko egin den, badago errodamendu mota bat oraindik gutxi sakondu dena, errodamendu alanbrikoa, hain zuzen ere. Gradu Amaierako Lan honetan errodamendu mota hau lau kontaktu puntukoarekin konparatuko da, aldi berean modu paralelo batean Mekanika Departamentuko Kalkulu Zentroan errodamendu honen analisi sakonago bat egingo delarik.

Errodamendu hau 1934. urtean asmatu zuen Erich Franke-k. Haren helburua errodamendu estandarrek betetzen zituzten funtzioak betetzea zen, baina pisuaren aurrezte nabarmen bat lortuz. Horretarako, bolaren eta pistaren arteko kontaktua zuzena izan beharrean, aluminiozko barne- eta kanpo-eraztunetan kokaturiko altzairuzko alanbre zirkular batzuen bidez egingo zen. Geometriari erreparatuz, aurretik aipaturiko lau kontaktu puntuko errodamenduekin antzekotasun handi bat mantentzen dute, kontaktu-angelua 45° -koa baita.



IRUDIA 2: Wire-race bearing edo pista alanbrikodun motako errodamendua.

Errodamendu mota hauen pisu aurreztearen zergatia aplikazioan aurkitzen da. Gaur egun, teknologiaren etengabeko garapena dela eta, hainbat aplikaziotan zehaztasun oso handia bilatzen da makinen elementuetan, baina honek gehiegizko pisurik suposatu gabe. Horren adibide nabaria defentsa militarrean erabiltzen den makineria dugu: tankeak (3. Irudia), misil jaurtizaileak, LAV ibilgailua, gerrauntzietako kanoiak... Makina hauetan guztietan pisuak eragin handia du, industriako makina batekin alderatzen badugu, adibidez. Beste aplikazio adibide batzuk tomografia konputazatua edo X izpiko aparailuak izan daitezke.



IRUDIA 3: Tanke bateko kanoiaren errodamendu alanbrikoa.

3 HELBURUAK ETA IRISMENA

Proiektu honen helburu nagusiak hurrengoak dira:

1. Alanbredun motako errodamenduak lau kontaktu puntuko errodamenduekin konparatzea, zurruntasunari eta konformitateari dagokionez.
2. Alanbredun motako errodamenduen ahamen estatiko axiala normak zehazten dituen irizpideekin alderatzea.
3. Elementu Finituetako (EF, hemendik Aurrera) eredu bi eratzea, dimentsioen parametrizazioan zentratuz.

Proiektu honi EFM ereduaren sorkuntzarekin ematen zaio hasiera. Eredu hauek geometrikoki definituko dira ANSYS WORKBENCH programako “Design Modeler” erremintaren bidez, eta, ondoren, saretu, horretarako Ingeniaritza Mekanikoa Saileko Kalkulu Zentroko Iñigo Martín doktoregaiaren laguntza izango delarik.

Honen ondoren, analisiak burutzeko beharrezkoak diren baldintzak finkatuko dira, eta, behin hau eginda, Departamentuko Kalkulu Zentroko ordenagailuetan aipaturiko analisiak jorratuko dira. Ahalmen estatiko axiala landuko denez, suposatuko da errodamenduetan aplikatzen den indar bakarra axiala izango dela, eta analisi mota estatikoa izango da. Gainera, aipatu den bezala, errodamenduen ereduak sektore murriztuei dagozkenez, ingurune baldintzen aukeraketan kontutan hartu beharko da.

Analisiak bukatuta, bertan lorturiko emaitzak bilduko dira Excel orri batean, non, hauek sailkatuko diren eta analisisiei dagozkien ondorioak lortzeko beharrezko grafikoak irudikatuko diren (hala nola, zurruntasun diagramak,...). Horrez gain, EFM ereduaren portaera behatuko da denboran zehar (kontaktu azalerako tentsioak, indarrak, itsasketa guneak...) aplikatu diren indarren arabera.

4 PROIEKTUAREN ONURAK

Arestian aipatu den bezala, pista alanbrikodun motako errodamenduak 1934. urtean izan ziren asmatuak Erich Franke-rengatik. Berak sortutako FRANKE GMBH enpresa da mota hauetako errodamenduen hornitzaile nagusia (beste batzuk badaude, hala nola, ROTHE ERDE, SKF, KAYDON...), eta, haien xehetasunei buruzko konfidentzialtasun handia mantentzen du. Hori dela eta, mota honetako errodamenduak hornitzen dituzten enpresa txikiagoek, ez dute aukerarik hauen inguruan teknologiarik garatzeko. Beste era batera esanda, adibidez, enpresa batek LAV ibilgailu baterako errodamendu alanbriko hornitu nahi badizkio bezeroari, FRANKE GMBH izango da kasu honetarako egokienak diren errodamenduak hautatuko dituen, aipaturiko enpresa hornitzaileak bitartekariaren papera egingo duen.

Beraz, nahiz eta denbora asko daramatzaten erabiliak izaten industria munduan, beste errodamendu batzuekin konparatzen badira, haiei buruz jakina den informazioa eskasa da, errodamendu hauen analisi estatikoari buruzko bi artikulu izan direlarik argitaratuak bakarrik mundu mailan (gainazal nekea analizatzen duten beste hainbat aurki daitezke). Bi hauen artean, Gulnia eta Smolnickiren [16] argitalpena da baliagarriena, non errodamenduaren sekzioaren definizio geometrikorako erabiltzen diren parametroek bola eta pistaren arteko kontaktu tentsioetan duten eragina aztertzen den.

Testuinguru honetan, errodamenduen fabrikazioko bigarren mailako enpresek haien lehiakortasuna handitzea bilatzen duten arren, hori lortzea ez da erraza. Proiektu honek, aspektu horretan inplikazio handi bat mantentzen du, izan ere, aurrerago xehetasunez azalduko diren analisisetan lorturiko emaitzak eta informazioa enpresa hauentzako oso baliagarria izan liteke.

Horrez gain, aipatu den bezala, analisi hauek jorratzeko erabiliko diren ANSYS WORKBENCH programako EFM eredu bi sortuko dira. Eredu hauen malgutasuna dela eta (parametrizazio geometrikoak dimentsioen aldaketa erraza eta efizientea suposatzen baitu), analisi mota ezberdinetarako balio lezakete etorkizunean egingo diren proiektu ezberdinetan.

Onura ekonomikoei dagokienez, esan beharra dago analisi errealistak gauzatzea ahalbidetzen duten eredu informatikoak sortzea oso errentagarria suertatzen dela. Horren arrazoi nagusia, analisi esperimentalen ondoriozko kostuak deuseztatzean dago. Hala ere, kontutan hartu behar da analisi esperimentalen bidez lortzen diren emaitzak errealitateari hurbilagoak izango direla.

5 ARTEAREN EGOERA

5.1 LAU KONTAKTU PUNTUKO ERRODAMENDUAK

Errodamenduen portaera erresistentea behatzeko, abiadura erregimen baxuetako kasua denez, analisia estatikoa izango da eta, aipatu den bezala, ahalmen estatiko axiala hartuko da kontuan. Ahalmen estatiko axiala, ISO normaren arabera [1], errodamendu baten elementu arrotatzailearen (bola) eta pistaren (barne- eta kanpo-eraztunak) arteko kontaktuan bolan agertzen den presioa 4200 MPa-tara heltzeko aplikatu behar den indar axiala da. Kotsideratzen da presio horretara iristean bolak deformazio plastikoa jasaten duela, eta, ondorioz, hutsegitea ematen dela. Hala ere, ISO norma honetan kalkulatzen den ahalmen estatikoa, $s=0.925$ ko konformitate batentzako aplikatua da. Hau konpontzeko, 1991ko ISOren txosten teknikoan [2] konformitate ezberdinak erabiltzeko pausuak argitzen dira.

2008an Daidié [3] karga-banaketa eta kontaktu-angelua ebaluatu zituen boladun errodamenduentzako. Argitarapen honetan, EF eredu bat erabilia, karga egoera desberdinentzako (indar axiala, momentua), errodamendu osoko karga distribuzioa behatzen da. Horretaz gain, kontaktu-angeluaren eragina aztertzen da ere. Lan honen atal interesgarriena proiektu honentzako, bola eta pistaren arteko kontaktu azaleran agertzen den presio maximoa lortzeko adierazpena da:

$$P_{max} = 1.84 \times 10^3 (1 - s)^{0.2117} \left(1 \pm \frac{D_w \cos \beta}{D_{pw}} \right)^{-0.455} \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{D_w^{\frac{2}{3}}} \quad (1)$$

non,

P_{max} = kontaktu azalerako presio maximoa

s = bolaren eta errodamenduaren barneko kontaktu azaleraren kurbaduraren arteko konformitatea

D_w = bolaren diametroa

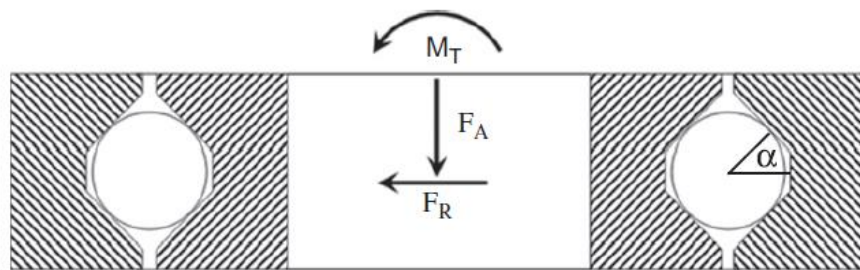
β = kontaktu-angelua

D_{pw} = bolen zentroen arteko distantzia diametrala

Q = aplikaturiko karga

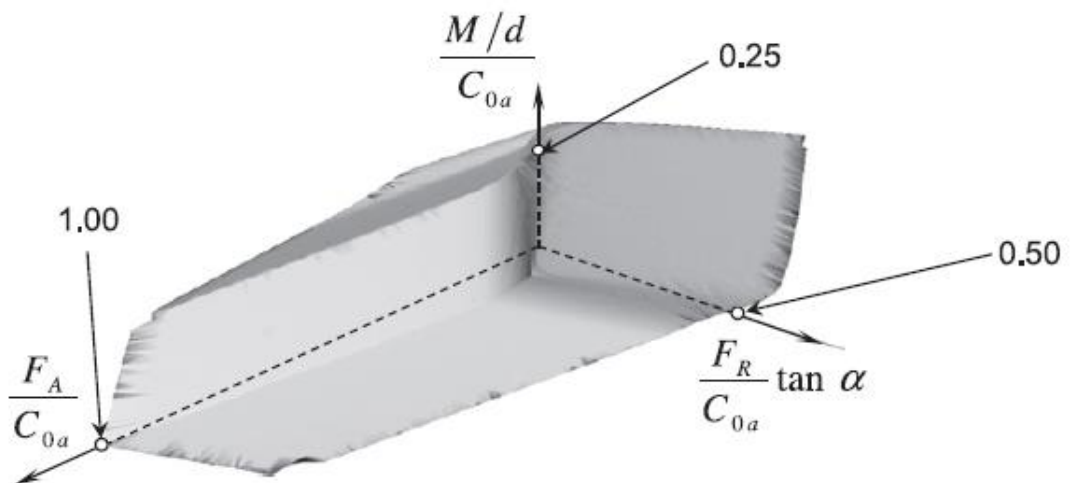
diren.

2010ean, Aguirrebeitia *et al.* [4] lau kontaktu puntuko errodamenduen ahalmen estatiko orokorra lortzeko planteamendu teorikoa garatu zuten. Bertan, errodamendu batetan aplika daitezkeen hiru karga motak kontsideratzen dira, hala nola, indar axiala (F_A), indar erradiala (F_R) eta momentu makurtzailea (M_T), eta, hau horrela, karga mota bakoitzarekin ahalmen estatikora heltzeko (4200 MPa kontaktuan) baldintzak zehazten dira.



IRUDIA 4: Lau kontaktu puntuko errodamendu batean aplikatu daitezkeen karga motak.

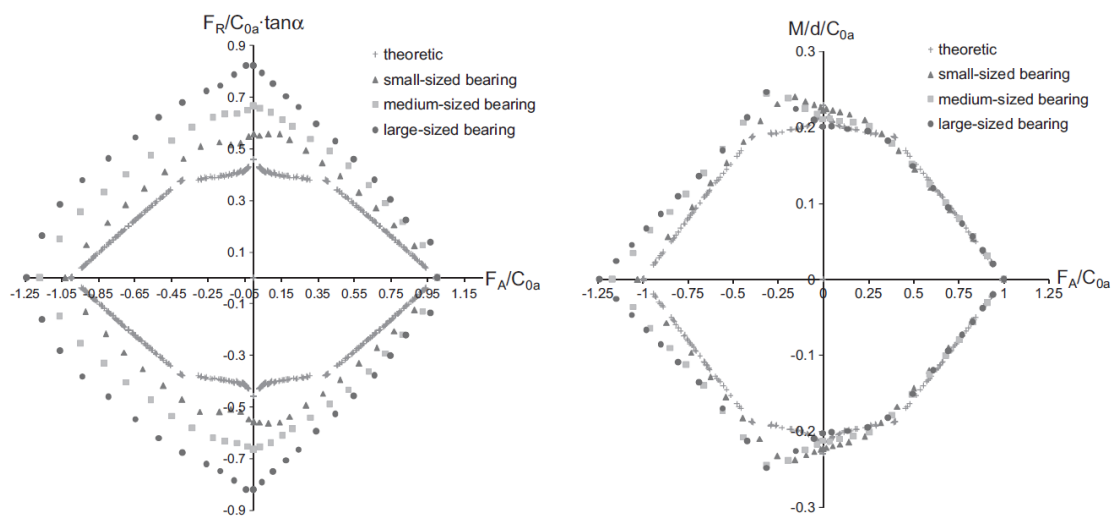
Lorturiko baldintzak errodamenduak lan egingo duen muga-egoera bezala ipinirik, honen aplikaturiko kargen onartze-gainazala irudikatzen da, hurrengo irudian ikus daitezkeen bezala:



IRUDIA 5: Aplikaturiko kargen onartze-gainazala.

Aurreko teoriaren planteamendua hedatzeko asmoz, 2011ean, Aguirrebeitia *et al.* [5] hiru errenkadako errodilodun errodamenduen ahalmen estatiko orokorra lortzeko garapen teorikoa jorratu zuten. Bertan, interferentzia geometrikoko modelo bat sortzen da, horrela, orekako ekuazioak lortuz. Ondoren, ekuazio hauek berridatzi eta kargen onartze-gainazala mugatzen duten inekuazioak lortzen dira (kasu honetan momentu makurtzailea eta indar axiala hartzen dira kontutan bakarrik).

2012an, Aguirrebeitia *et al.* [6] 2010ean garatutako lau kontaktu puntuko errodamenduen ahalmen estatikoaren kalkulu teorikoaren [4] balidazioa jorratu zuten. Horretarako, EFko eredu multiparametrikoko bat garatu zuten, zeinen bidez, mota honetako tamaina desberdineko hiru errodamendu komertzial aztertu ziren. Karga egoera desberdinak planteatu ziren eta soluzio bezala kargen onartze-azalera esperimentalak lortu ziren. Hurrengo irudian aurretik zehaztutako onartze-gainazal teorikoa lorturiko esperimentalekin konparatzen da, ardatz normalizatuetan adieraziz:

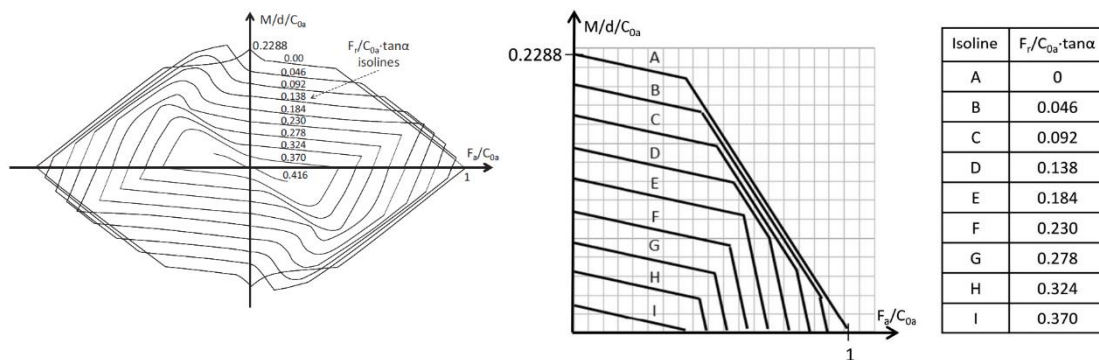


IRUDIA 6: Emaitzen konparaketa, ardatz normalizatuetan.

Irudi hauei erreparatuz, ondorioztatu zen egindako kalkulu teorikoak onargarriak zirela, izan ere, antzekotasun handia mantentzen zuten EFkoekin. Gainera, planteamendu teorikoa kontserbakorragoa zela ikusi zen.

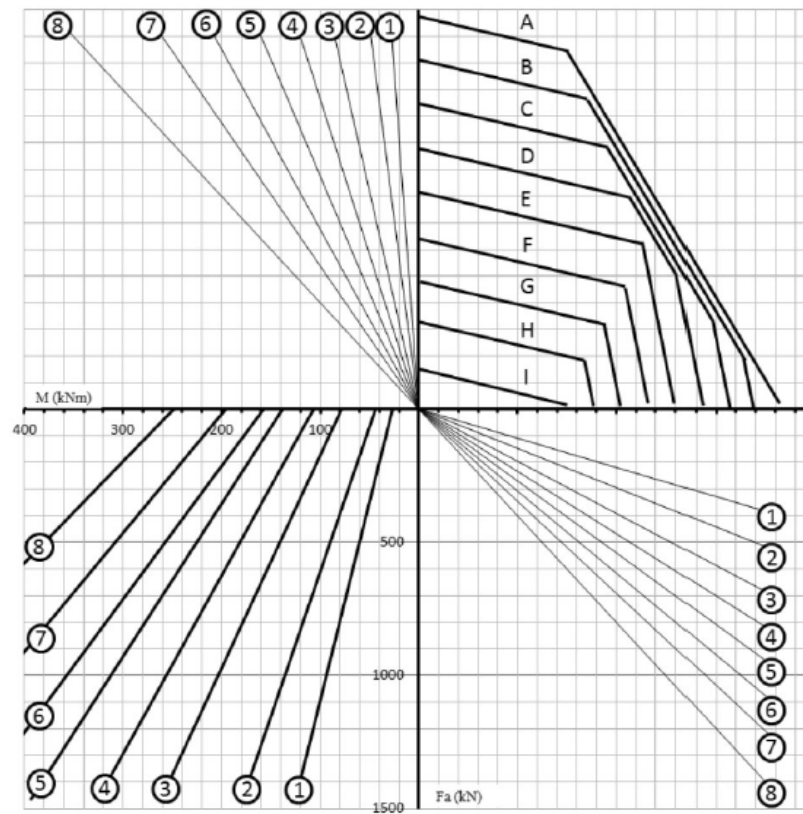
Ildo honekin jarraituz, 2013an Aguirrebeitia *et al.* [7] prekargaren efektua kontsideratu zuten lau kontaktu puntuko errodamenduen ahalmen estatiko orokorraren kalkulurako, emaitzen zehaztasuna handitzeko helburuarekin. Horretarako, interferentzia geometrikoko eredu analitiko berri bat sortu zen eta, horrekin konparatzeko asmoarekin, 2012an sortutako EF ereduak [6] moldatu zen, prekarga kontsideratuz. Soluzioei erreparatuz, ikusi zen prekarga zenbat eta handiagoa izan, ahalmen estatikoa txikiagoa zela. Hala ere, aldakuntza hau ez zen oso handia. Bigarren ondorio bezala, prekargak errodamenduaren zurruntasuna handitzen zuela behatu zen.

2016an Abasolo *et al.* [8] lau kontaktu puntuko errodamenduentzat baliagarriak diren aukeraketa-kurba berriak garatu zituzten. Kurba hauen bidez, muntaketa batean egokienak diren errodamenduak aukeratu daitezke. Horretarako, 2010ean sortutako onartze-gainazala erabili zen [4], hau bi dimentsiotan irudikatuz, ardatz normalizatuekin eta $Fr/C0a \cdot \tan\alpha$ isolerroak irudikatuz (gainazalaren plano batekiko paraleloki moztuta lortzen diren kurba ezberdinak)(7. Irudia).



IRUDIA 7: Lau kontaktu puntuko errodamenduen aukeraketa-kurbak.

Horretaz gain, ahalmen estatikora heltzeko bigarren modua ere hartu zen kontutan, hau da, lotura torlojatuaren hutsegitea. Kontsideratu zen honek hutsegitea jasango zuela kanpoko karga desberdinen ondoriozko tentsioa isurpen tentsiora iristen zenean. Hau horrela, bi hutsegite motak (kontaktuan 4200 MPa eta torloju-junturan isurpen tentsioa) batera irudikatu ziren, aukeraketa-kurba orokor batzuk sortzeko asmoz, IRAUNDI enpresaren POS214 errodamenduentzat (8. Irudia):



Fr max (kN)	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	0	18	37	55	74	92	110	129	147
2	0	25	50	74	99	124	149	173	198
3	0	33	65	98	131	164	196	229	262
4	0	39	78	117	156	196	235	274	313
5	0	45	90	135	180	226	271	316	361
6	0	51	103	154	206	257	309	360	412
7	0	58	116	174	231	289	347	405	463
8	0	67	134	201	268	335	402	469	536

IRUDIA 8: IRAUNDI enpresaren POS214 errodamenduaren aukeraketa-kurbak.

Modelizazioari dagokionez, 2015ean Aguirrebeitia *et al.* [9] lau kontaktu puntuko errodamendu baten EF ereduak garatu zuten, marruskadura momentuaren kalkulurako. Eredu honek errodamenduaren sektore bat hartzen du bakarrik kontutan, bola bati dagokiona hain zuzen ere. Gainera, guztiz parametrizatua dago dimentsioei dagokionez, tamaina ezberdineko errodamenduen analisiak egitea asko erraztuz.

2017an Heras *et al.* [10] 2015ean sorturiko EF ereduaz baliatuz [9], marruskadura momentuaren kalkularen konparaketa bat egin zuten, horretarako, fabrikazio akatsak eta eraztunen zurruntasuna kontutan hartzen zituen eredu analitiko bat garatuz. Urte horretan bertan, aipaturiko EF eredu honen eta 2007an Leblanc eta Neliasek sorturiko eredu analitikoaren [11] artean marruskadura momentuaren kalkulua konparatu zuten berriro ere [12]. Lorturiko emaitzak antzekoak izan zirela behatu zen. Hala ere, esan beharra dago eredu analitikoak errodamenduaren bola eta pistaren arteko kontaktuan itsasketa egon zitekeela ez zuela kontutan hartzen.

5.2 PISTA ALANBRIKODUN EDO “WIRE-RACE” ERRODAMENDUAK

Arestian aipatu den bezala, errodamendu mota hauei buruz egindako ikerketak oso eskasak dira. Ez da ISO normarik aurkitzen mota hauetako errodamenduen ahalmen estatikoa kalkulatzeko.

Egindako analisisiei dagokionez, 2006an Xhan *et al.* [13] errodamendu alanbrikoentzako prekarga kalkulatzeko prozedura garatu zuten. Horretarako, MATLAB programa erabiliz eta Hertz-en kontaktu elastikoaren teoria jarraituz [14], eredu matematiko bat sortu zuten, indar normala, kontaktuko presio maximoa eta beste hainbat parametro kalkulatzeko. Prekargen eragina ebaluatu zen, eta ikusi zen hau kontrolatuz errodamenduak jasan zitezkeen ondorio kaltegarriak ekidin zitezkeela (pikadura korrosioa, iraultze momentu handiak, etab.). Hala eta guztiz ere, esan beharra dago ereduaren geometria definitzerakoan pista alanbrikoak guztiz zirkularrak kontsideratu zirela. Hori dela eta, argitarapen honen balidazioa eztabaidagarria da.

2014ean Ruixia eta Xiangyangek [15] errodamendu alanbrikoentzako diseinuaren optimizazio bat bilatu zuten iSIGHT programaren bidez. Bertan, hainbat

parametroren arabera, oinarrizko karga ahalmen dinamikoaren aldakuntza aztertu zuten. Aipaturiko programa ANSYSen sortutako eredu batekin konbinatu zuten; hala ere, kasu honetan ere, alanbreak guztiz zirkularrak kontsideratu ziren.

2017an Gunia eta Smolnickik [16] karga-, presio- eta tentsio-banaketa analizatu zuten EFM eredu batean, hainbat parametro geometrikoren aldakuntzaren arabera. Puntu kritikoenak bola-pista kontaktua eta Bielajewren puntua (Von Mises tentsioaren balio altuena) direla behatu zuten.

6 ALTERNATIBEN ANALISIA

Behin proiektuaren planteamendua garatuta, hau aurrera eramateko erabiliko den soluzioa aukeratu beharra dago. Lortu nahi diren helburuen izaera dela eta, hiru soluzio desberdin planteatu daitezke:

- a. Eredu analitikoa.
- b. Elementu Finituzko eredu.
- c. Entsegu esperimentalak.

Eredu analitikoari dagokionez, mota honetako eredu bat garatzean, alde aurretik kalkulaturiko sarrera-parametroak edukitzen dira datu bezala, zein EFM bidez lortu diren. Adibidez, errodamendu baten karga distribuzioa lortu nahi bada, eredu analitikoaren bidez bola eta pistaren arteko interferentziak lortuko dira, beti ere errodamendu honen hainbat parametro aurretik kalkulatu direnean (zurruntasuna, etab.). Hori dela eta, ikusita proiektu honetan jorratutako errodamenduen zurruntasun diagramak lortu nahi direla, ez da aukera on bat izango.

Entsegu esperimentalei begira, hauek emaitza errealistenak emango dituzte. Hala ere, hurrengo aspektuak izan behar dira kontutan:

- Kostu ekonomiko handiagoa suposatzen dute.
- Entseguen prestakuntza-lanak iraunaldi luzekoak izan daitezke.
- Analisisien malgutasuna baxuagoa da.
- Ordenagailuen etengabeko hobekuntza ematen ari da, kalkulu potentzia eta eraginkortasun handiak lortuz.
- EFM softwareak geroz eta errealistagoak dira urteak pasa ahala.

Hori dela eta, Elementu Finituzko ereduak aukeratu da alternatiba bideragarriena bezala.

Metodo hau erabiltzen duten software ugari aurki daiteke merkatuan, hala nola, ANSYS, ABAQUS, LS-DYNA... Haien artean, Bilboko Ingeniaritza Eskolan urte askotan landua izan den programa da ANSYS. Gainera, egin nahi diren analisisietarako oso aproposa da, arlo mekaniko sakona duelako.

Eredui dagokionez, hainbat aukera daude geometria definitzerako orduan. Errodamendu osoaren eredu bat gara daiteke; baina, nahiz eta errealitatean entsegu experimental bat jorratzean errodamendu osoan egiten den, EFMaren kasuan ez du zentzu askorik. Horren arrazoi nagusia geometria osoaren beharrik ez dela da, honen sektore batekin eskakizunak asebetetzen direlako. Horren ondorioz, bola bat kontsideratzen duen sektore bat definitzen da, bertan lorturiko emaitzak errodamendu oso baten kasura erraz moldatzen direlarik.

Geometriaren beste aspektu bat kontutan izandako xehetasun-mailarena da. Kasu honetan, maila hau altua izan da, izan ere, FRANKE GMBH enpresak fabrikatzen dituen errodamenduak imitatu nahi izan dira errodamendu alanbrikoen kasuan.

Sareari dagokionez, inplementatzeko aukera ugari daude. Kasu honetan, Ingeniaritza Mekanikoko Saileko gai honekiko den interesa dela eta, maila altuko saretzeak aplikatu dira, gehienbat sail honetako Kalkulu Zentroan osatu direlarik (aurrerago azalduko da zehatz-mehatz).

Amaitzeko, aipatu beharra dago konputagailu bidezko edozein analisi gauzatzean ahalik eta optimizazio-maila handiena bilatzen dela, beti ere emaitzen zuzentasuna mantenduz. Hori dela eta, xehetasun handiko ereduak mantenduz, landutako bolaren sektorea erditik banatu da, horrela, sareak dituen nodo kopurua bi bider txikiagoa eginez eta analisiaren osatze-denbora murriztuz.

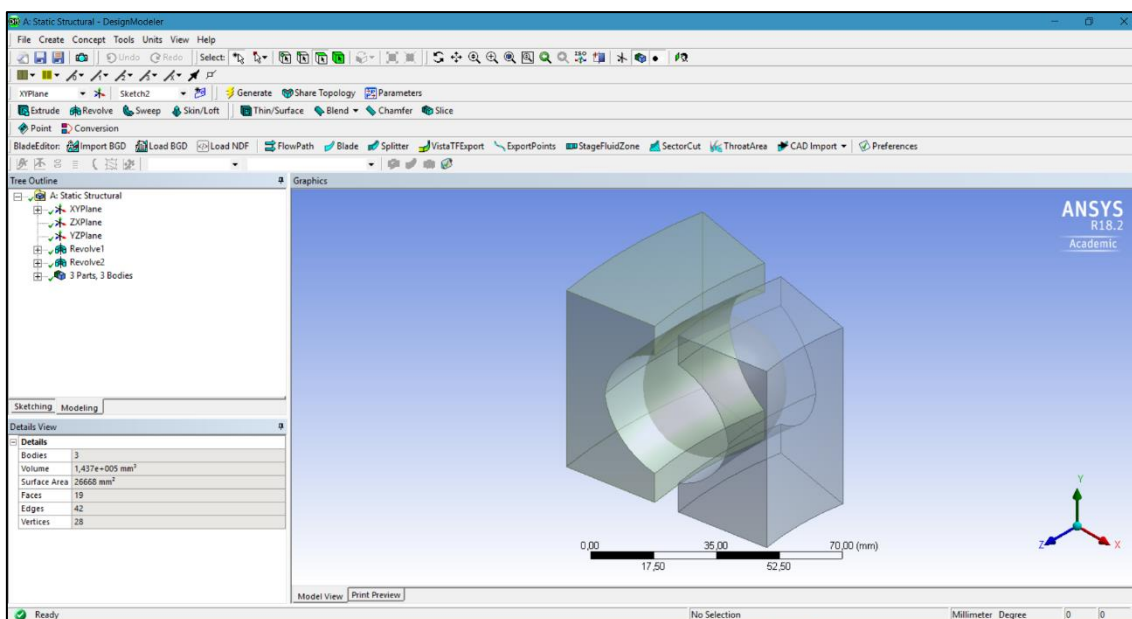
7 SOLUZIOAREN DESKRIBAPENA

Atal honetan errodamenduen ahalmen estatikoaren konparaketa egiteko erabili diren errodamenduen ereduen deskribapen zehatza egingo da. Ereduek Elementu Finitu bidezko Metodoa erabiliko duten ereduak dira. ANSYS WORKBENCH programa erabili da bi ereduak egiteko bere osotasunean, geometria “Design Modeler” erremintarekin definituz eta sarea eta ingurune baldintzak “Mechanical” izenekoarekin. Eredu bakoitza deskribatuko da ondorengo hiru ataletan: geometria, sarea eta ingurune baldintzak.

7.1 LAU KONTAKTU PUNTUKO ERRODAMENDUAREN EREDUA

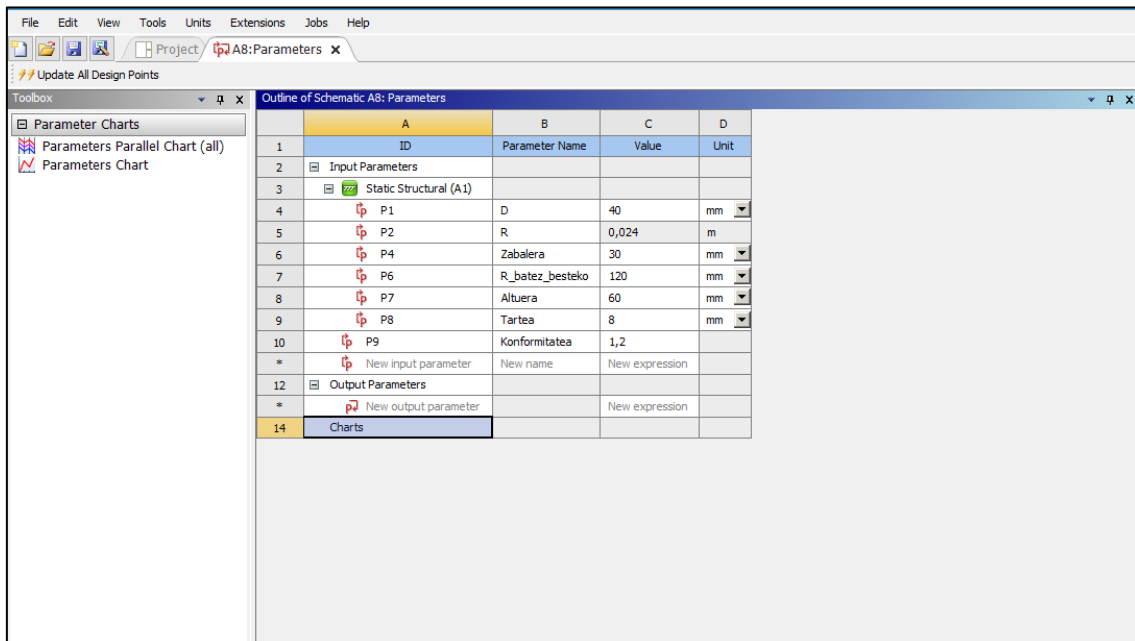
7.1.1 GEOMETRIA

Ereduek hau karga desberdinen pean jarriko dugunez geometria desberdinetarako, bere dimentsioak erraz aldatu ahal izatea komeni zaigu, eta ondorioz, parametrizazio bat egingo da. Ereduek honi 1 Eredua izena jarriko zaio. Ereduek geometria orokorrari dagokionez, ez da errodamendu osoa egingo, baizik eta bola bakarra kontutan hartzen duen geometria, lehen azaldu den bezala. Honen ondorio zuzena ingurune baldintza zehatz batzuk ezartzea izango da, aurrerago azalduko direnak. Ereduek honen solido guztiak ANSYS WORKBENCHen datorren egitura-altzairu isotropo linealekoak dira.



IRUDIA 9: 1 Ereduek geometria.

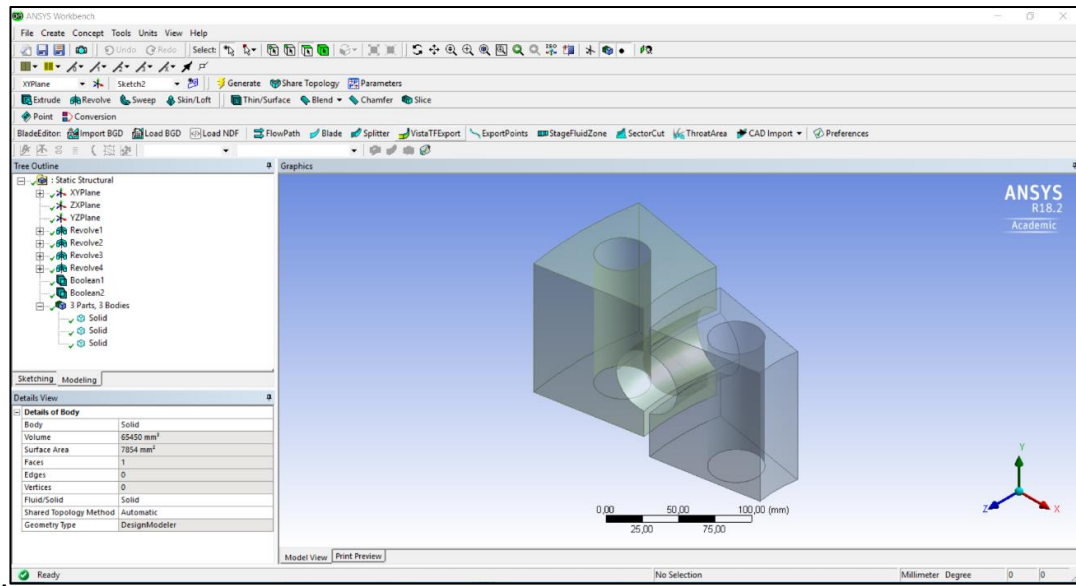
Lehenengo saiakeran, nahiz eta geometria ondo definituta zegoela iruditu, parametrizazioa zuzena ez zela ikusi zen proiektuaren zuzendariarekin izandako bilera batean. Horren kausa posible bat geometriari sartutako menpekotasunen erabilera okerra izan liteke. Arazo hau zuzentzeko, eredu berriz eraikitzea erabaki zen (2 Eredua).



	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	Input Parameters			
3	Static Structural (A1)			
4	P1	D	40	mm
5	P2	R	0,024	m
6	P4	Zabalera	30	mm
7	P6	R_batez_beste	120	mm
8	P7	Altuera	60	mm
9	P8	Tartea	8	mm
10	P9	Konformitatea	1,2	
*	New input parameter	New name	New expression	
12	Output Parameters			
*	New output parameter		New expression	
14	Charts			

IRUDIA 10: 2 Ereduaren parametrizazioa (Kontutan izan irudian agertzen diren parametroen izenak ez direla definitiboak).

Aurreko irudian ikus daitekeenez, 2 Ereduan inplementatzen den parametrizazioa xehetasun gutxikoa da, izan ere, nahiz eta geometriaren dimentsioak manipulatu ahal ditugun, interesatzen zaiguna zera da: dimentsio guztiak bolaren diametroaren menpe uztea (aurrerago Dpw deituko den dimentsioa izan ezik, zeinek errodamenduaren aurkako aldeetan dauden bolen arteko distantzia diametrala agertzen duen). Ondorioz, lau kontaktu puntuko azken eredu bat egitea proposatzen da. Eredu honek, parametrizazio finagoa izateaz gain, geometria zertxobait hobetuko du, errodamendu mota hauek izaten dituzten torlojuentzako zuloak inplementatuz eta kanpo- eta barne-eraztunen altuera desberdintasuna kontutan hartuz (3 Eredua).



IRUDIA 11: 3 Ereduaren geometria bat.

Outline of Schematic A8: Parameters				
	A	B	C	D
1	ID	Parameter Name	Value	Unit
2	Input Parameters			
3	Static Structural (A1)			
4	P1	D	50	mm
5	P2	R	0,026427	m
6	P10	Tartea	0,0047619	m
7	P11	#	0	m
8	P13	Dist_ardatz_zulo	0,055263	m
9	P15	Hg	15	mm
10	P16	D_zulo	0,039474	m
11	P17	Altuera	0,10789	m
12	P18	alfa	60	degree
13	P24	Dpw	400	mm
14	P25	Zabalera	0,094987	m
15	P9	Konformitatea	0,946	
16	P19	Rh	2,1579	
17	P20	Rdt	0,78947	
18	P21	Rl	1,9474	
19	P22	Rlt	1,1053	
20	P23	Rlg	0,095238	
*	New input parameter	New name	New expression	
22	Output Parameters			
*	New output parameter		New expression	
74	Charts			

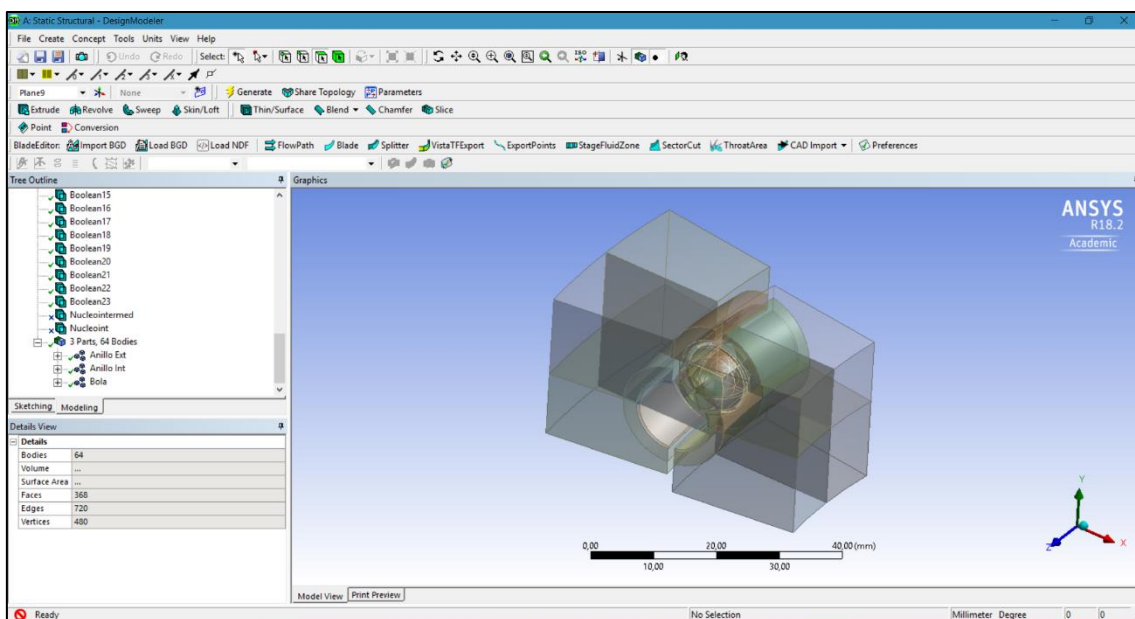
IRUDIA 12: 3 Ereduaren parametroak.

Mota honetako geometriak ditugunean, sarea egiterako orduan, ereduaren zonalde desberdinak tamaina eta elementu desberdinekin saretzea interesatzen da, beti ere kohesio bat mantenduz. Horren arrazoia zera da: zonalde batzuetan

sarearen xehetasuna handia izatea interesatuko da (kontaktu zonaldeetan, adibidez) bertan tentsio handienak emango direlako.

Hasiera batean, ANSYSekin sare orokor bat egitea eta ondoren zona batzuk errefinatzea ideia ona izan liteke. Hala ere, geometriaren konplexutasuna dela eta, ereduaren elementuak solido ezberdinetan banatzea eta bakoitza bere aldetik saretzea konponbide askoz ere hobea da. Horren arrazoia da elementu batetik besterako trantsizioa kaxkarragoa izango dela errefinamendu soil bat aplikatzen bada.

Ereduaren elementuak solido desberdinetan banatzeko ANSYSen “Design Modeler”-a erabiliko da berriro ere. Horretarako, arestian esan den bezala, Ingeniaritza Mekanikoko Departamentuko Kalkulu Zentzoko Iñigo Martín ingeniariaren laguntza edukiko da. Behin prozesu hau bukatuta, lau kontaktu puntuko errodamendu ereduaren geometria guztiz definituta geratzen da, non aurreko parametroei beste bost parametro gehitu zaizkien. Hurrengo irudian 3 Ereduaren geometria definitiboa ikus daiteke, zein, hemendik aurrera, Est. eredia izango den. Aipatu beharra dago torlojuentzako diren zuloak ezabatu direla, ondoren egingo den sarearentzako ez direlako lagungarriak eta analisisien emaitzetan alterazio handirik eragingo ez dutelako.



IRUDIA 13: Est. ereduaren geometria definitiboa.

Eredu honen parametrizazioari dagokionez, hurrengo taulan sailkatu dira parametroak:

Parametroa	Esanahia	Parametro mota	Balioa
Dw	Errodamenduko bolen diametroa	Independentea	Dw
R	Bolaren ukitzaile diren aurpegien erradioa	Menpekoa	$Dw/(2 \cdot s)$, non s =Konformitatea den
Tartea	Kanpo- eta barne-eraztunen arteko tartea	Menpekoa	$Dw \cdot Rlg$
Dist_ardatz_zulo	Bolaren ardatzetik eraztuneko zuloetako ardatzetara dagoen distantzia	Menpekoa	$Dw \cdot Rlt$
Hg	Kanpo- eta barne-eraztunen altuera desberdintasuna	Independentea	Hg
D_zulo	Torlojuen zuloen diametroa	Menpekoa	$Dw \cdot Rdt$
Altuera	Kanpo- eta barne-eraztunen altuera	Menpekoa	$Dw \cdot Rh$
alfa	Bolaren ukitzaile diren aurpegien ukitze-puntuaren posizioa bolaren ardatz horizontaletik harturik	Independentea	alfa
Dpw	Errodamenduaren aurkako aldeetan dauden bolen arteko distantzia diametrala	Independentea	Dpw
Zabalera	Kanpo- eta barne-eraztunen kanpoko diametroaren eta barneko diametroaren arteko kendura	Menpekoa	$Dw \cdot Rl - \text{Tartea}/2$

biraketa_angelua	Errodamendu osotik analizatuko den zona lokalaren angeluaren erdia	Menpekoa	180/N_bola
Diam_Ext_VolControl	Bola-eraztun trantsizio elementu txikiaren kanpo diametroa	Menpekoa	1,1·Dw
Diam_Int_VolControl	Bola-eraztun trantsizio elementu txikiaren barne diametroa	Menpekoa	0,9·Dw
Diam_Ext_VolControl_2	Bola-eraztun trantsizio elementu handiaren kanpo diametroa	Menpekoa	1,5·Dw
Diam_VolControl_Bola_1	Bolaren zatiketa egiteko erabili den elementu baten diametroa	Menpekoa	0,6·Dw
Diam_VolControl_Bola_2	Bolaren zatiketa egiteko erabili den elementu baten diametroa	Menpekoa	0,9·Dw

TAULA 1: Est. ereduaren parametroen sailkapena.

non Konformitatea, Rl, Rdt, Rh, Rlt eta Rlg aurretik definituriko konstante biderkatzaileak diren, Herasen arabera [17]:

Rh	Hg	Rl	Rlg	Rlt	Rdt
2.15	10	1.9	0.1	1.15	0.75

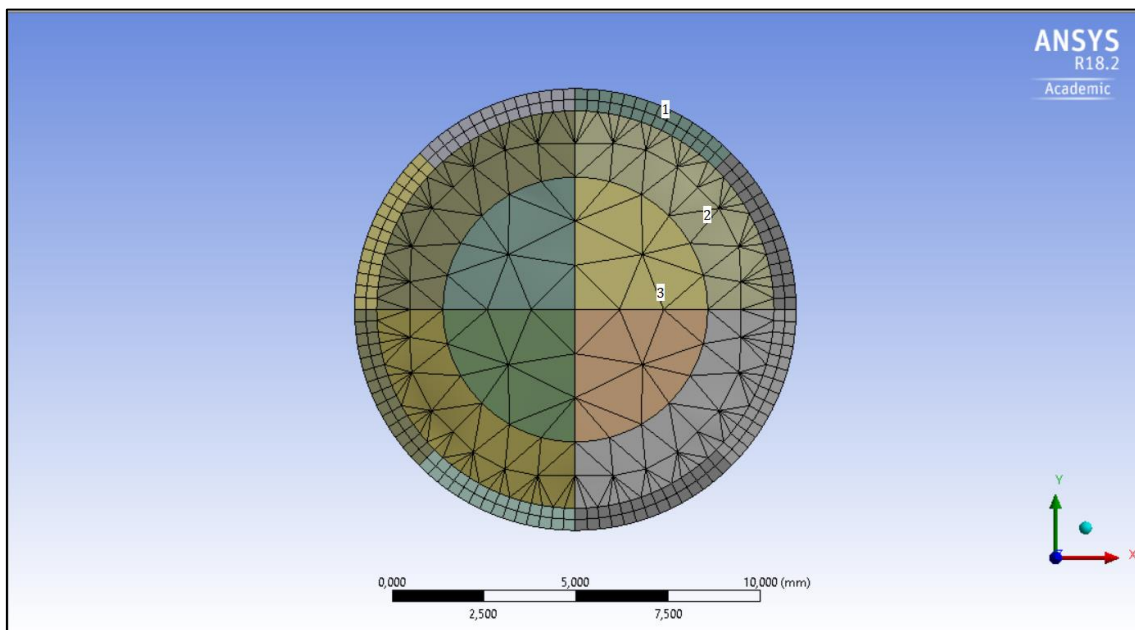
TAULA 2: Parametrizaziorako konstante biderkatzaileak.

7.1.2 SAREA

Behin ereduaren geometria guztiz definituta egonda, hurrengo pausua jorratu behar da: saretzea. Saretzea oso konplexua eta astuna izan daiteke lantzen ari den piezaren arabera. Geroz eta piezaren konplexutasuna handiagoa izan (sekzio aldaketa nabariak, tentsio kontzentrazio guneak, kurbadura guneak...), orduan eta zailagoa izango da saretzeko prozesua. Kasu honetan, lau kontaktu puntuko errodamendu baten ereduaz landuko dena, nabarmena da saretze prozesu hau ez dela sinplea izango.

Arestian azaldu den bezala, geometria osatzen duten solidoak hainbat zatitan banatu dira. Horren helburua solido baten zati desberdinak modu desberdinean saretzea da, gehiago interesatzen diren zonetan arreta gehiago ipiniz.

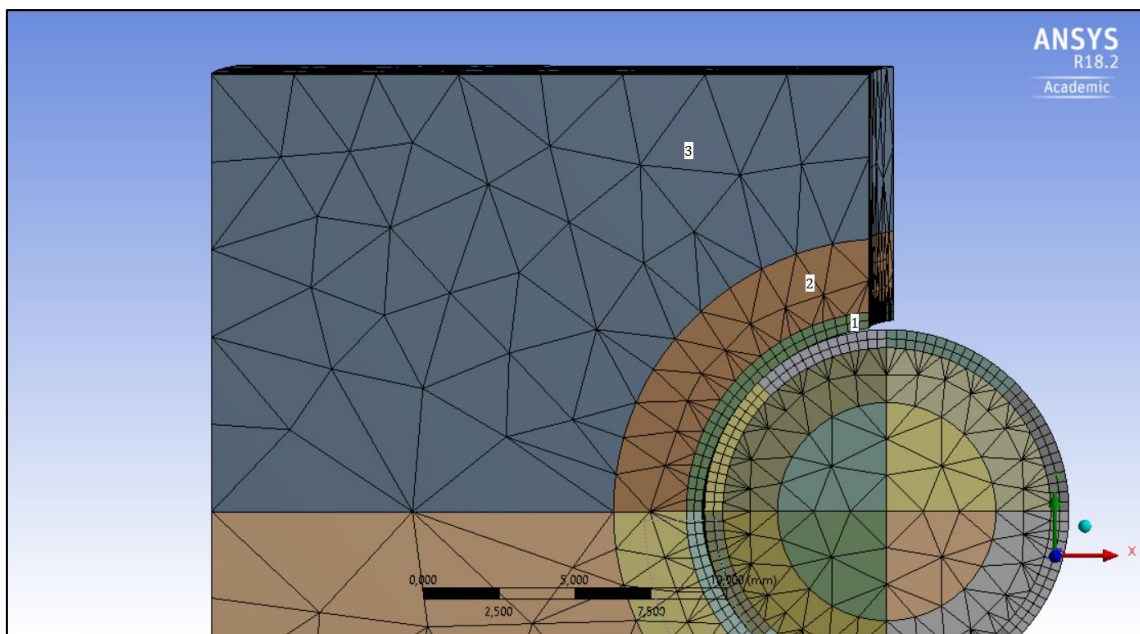
Erabilitako saretze metodologia Herasek [17] planteatutakoaren oso antzekoa da, bertako ereduaz erreferentziatuz hartu delarik. Jarraian ereduaren solido bakoitza bere aldetik analizatuko da sareari dagokionez:



IRUDIA 14: Est. ereduaz: bolaren sekzioa.

Seigarren irudiaren tituluak dioen bezala, Est. ereduaren bolaren sekzioa ikusten da bertan. Hiru zonalde desberdinak dira saretzearen arabera:

- 1. Zonaldea: Eraztunekin kontaktuan dagoen gainazalari dagokio; beraz, sarea doia izatea interesatzen da. Elementu hexaedrikoak erabili dira kontaktu zonako bi solido ezberdinen nodoek bat egitea errazagoa delako.
- 2. zonaldea: Bolaren nukleoaren eta kanpoaldearen trantsizio-gunea da. Sarearen trantsizio-elementu bezala portatzen da.
- 3. zonaldea: Bolaren interes gutxienerako zona da; ondorioz, elementuak handiagoak izatea interesatzen da, nodo kopurua murrizteko.



IRUDIA 15: Est. eredia: kanpo-eraztunaren eta bolaren sekzioa.

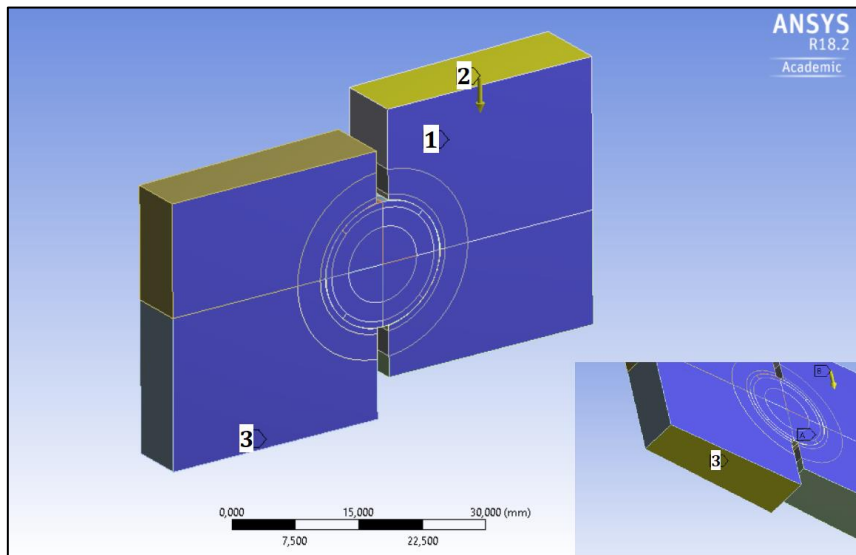
Kasu honetan ere, hiru zonalde desberdintzen dira kanpo-eraztuneari:

- 1. zonaldea: Bolarekin kontaktuan dagoen gainazalari dagokio. Bolako 1 zonaldeko sarete prozesu berdina erabili da.
- 2. zonaldea: Trantsizio-elementu bati dagokio, zeinek eraztunaren kanpoaldea eta barnealdea modu jarraian lotzen dituen.
- 3. zonaldea: Eraztunaren garrantzi gutxienerako zona denez, sareko elementuak handiak egitea komeni da.

Aipatu beharra dago barne-eraztunaren sarea kanpokoaren berdina dela; ondorioz, ez da aztertuko.

7.1.3 INGURUNE BALDINTZAK

Behin geometria eta sareak definituta, analisisien aurreko azken pausoa ingurune baldintzak zehaztea izango da. Nodoen kopurua erdira murrizteko, eta, horren ondorioz, soluzioaren lorpenaren denbora nabarmen murrizteko, ereduia erditik ebaki da eta zati bat bakarrik analizatuko da. Hurrengo irudian aztergai dugun ereduia ageri da, non ingurune baldintza bakoitza zenbakitu zaion:



IRUDIA 16: Est. ereduaren ingurune baldintzak.

- 1. Ingurune baldintza. Marruskadura gabeko euskarria. Honen helburua plano urdinaren norabide normaleko desplazamendua ekiditea da.
- 2. Ingurune baldintza. Modelizatzen den indar axialari dagokio. Desplazamendu bertikal bat aplikatzen da gainazalaren norabide normalean. Aipatu beharra dago desplazamenduak erabiltzen direla indarrek baino konbergentzia altuagoa dutelako.
- 3. Ingurune baldintza. Torlojuen burua finkatzen den gainazalari aplikatzen zaio torlojuaren funtzioa modelizatzeko. Gainazalean euskarri simple bat jartzen da, norabide normalean desplazamendua ezeztatzen delarik.

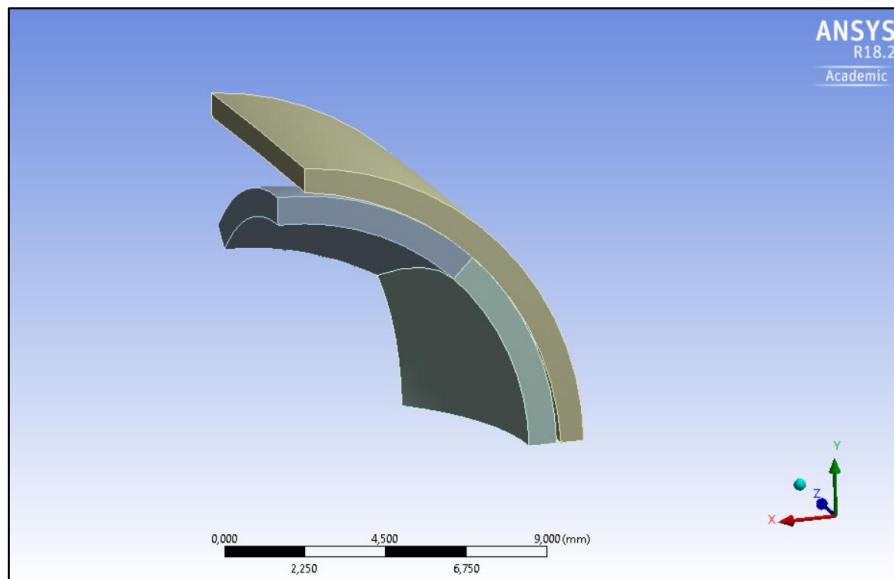
7.1.4 AZPIMODELOA

Zehaztasun handiko analisisetan komenigarria izan daiteke eredu globalean oinarrituriko azpimodelo bat sortzea. Horren ondorioa emaitzen zehaztasunaren handitzea da. Kasu honetan, bai A eta bai B ereduarentako azpimodelo bana eraiki dira. Bertan, eredu globalean lorturiko desplazamenduen soluzioak txertatuko dira

(gainazal zehatz batzuetan) eta analisiak berriro jorratuko dira. Jarraian Est. ereduaren azpimodeloaren atalak garatuko dira:

7.1.4.1 GEOMETRIA

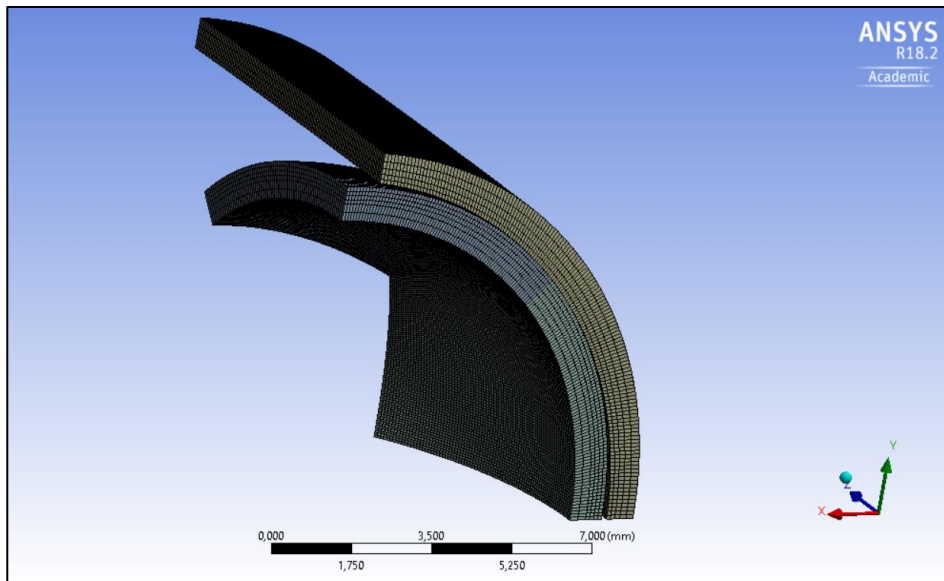
Hurrengo irudian azpimodelo honen geometria erakusten da, zein bolaren gainazalaz eta barne-eraztunaren 15. Irudiko 1 zonaldeaz osatuta dagoen:



IRUDIA 17: Est. ereduaren azpimodeloaren geometria.

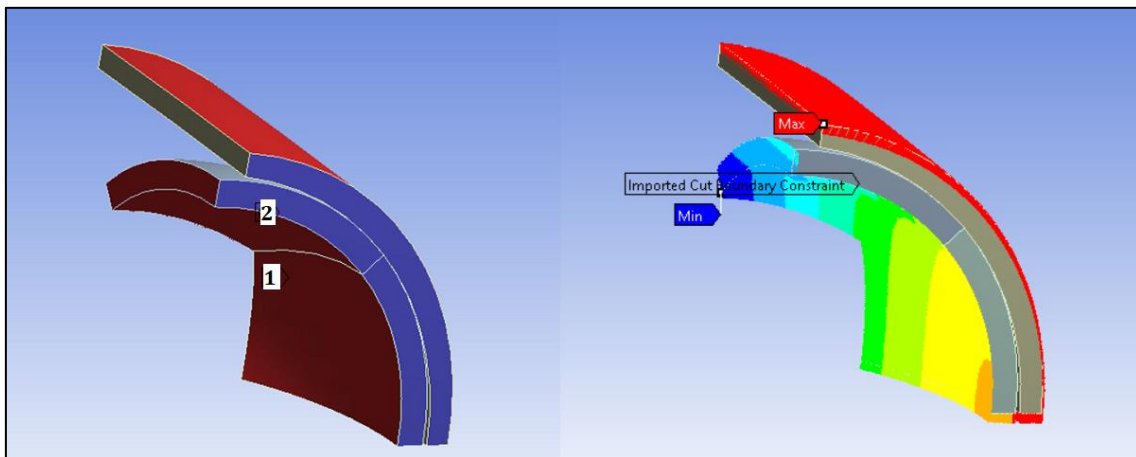
7.1.4.2 SAREA

Saretu beharreko geometria askoz murriztagoa denez, gainazaleko nodo kopurua handituko da eredu globalarekin konparatuz, saretze-patroia berdina mantenduz. Nodo kopuru handitze honek bolaren gainazalaren eta eraztuneko kontaktu azaleraren arteko interferentzia hobetuko du; izan ere, elementuak txikiagoak izango dira eta batzuek besteekin nodoetan bat egitea errazagoa izango da.



IRUDIA 18: Est. ereduaren azpimodeloaren sarea.

7.1.4.3 INGURUNE BALDINTZAK



IRUDIA 19: Est. ereduaren azpimodeloaren ingurune baldintzak.

Aurreko irudian bi ingurune baldintza ikus daitezke. 1 zenbakiak aurretik eredu globala analizatzerakoan lorturiko soluzioko desplazamenduei dagokie. 2 zenbakia azpimodeloaren berezko baldintza bat da, solidoa plano urdinaren norabide normalean mugitzea ekiditen duena.

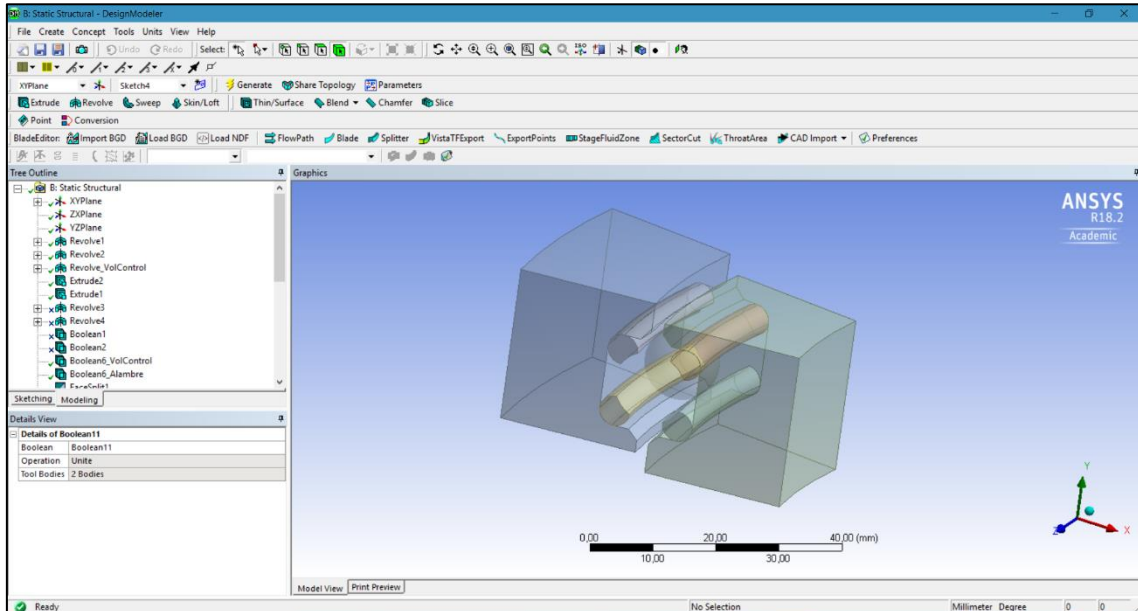
7.2 PISTA ALANBRIKODUN ERRODAMENDUAREN EREDUA

7.2.1 GEOMETRIA

Errodamendu alanbrikoaren ereduari dagokionez, lau kontaktu puntuko errodamenduaren eredua egiteko erabili den prozedura jarraitu da. Hala ere, kasu honetan, ezin izan da lortu mota hauetako errodamenduen plano zehatzik. Horren ondorioz, FRANKE GMBH alemaniar enpresaren webguneko errodamendu mota hauen katalogoak erabili dira geometria gehiengo definitzeko. Bertan, errodamendu desberdinak aurki daitezke alanbrearen itxuraren arabera, eta, haien artean, alanbre zirkularreko errodamenduak izan dira modelizatu direnak.

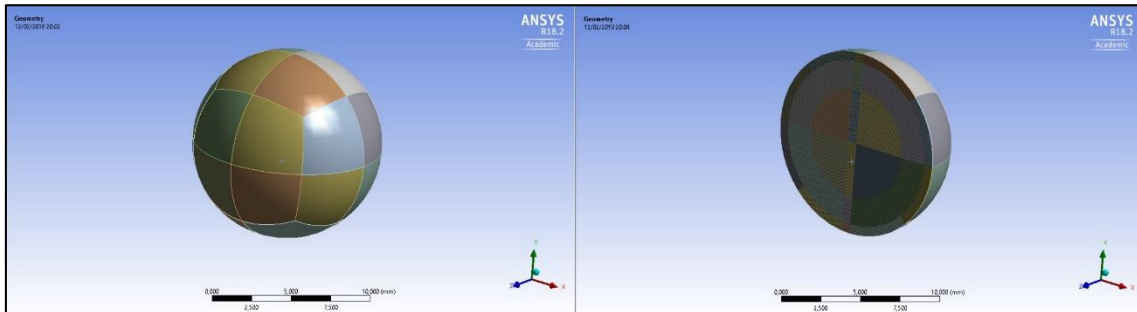
Materialari dagokionez, solido guztiak egitura-altzairu isotropo linealekoak izan dira bi izan ezik, zein ANSYSen aurredefinituriko aluminioaz eginak dauden: kanpo- eta barne-eraztunak, hain zuzen ere.

Berriz ere “Design Modeler”-a erabiliz hurrengo itxurako eredua lortzen da (Al. eredua):



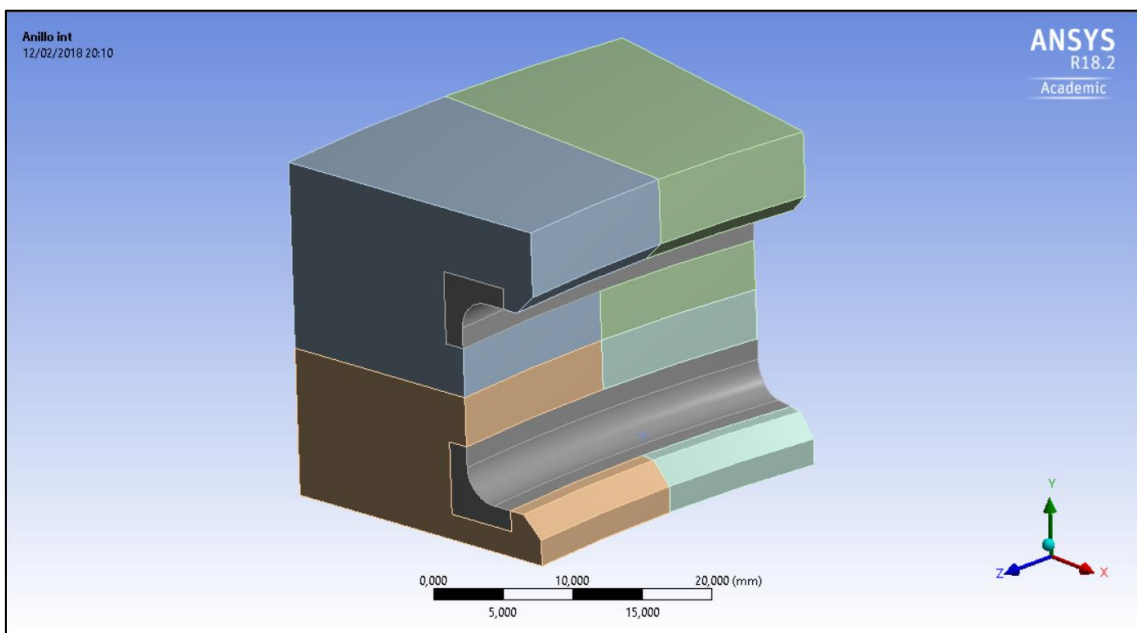
IRUDIA 20: Al. ereduen geometria bat.

Est. ereduaren bezala, B Eredu honetan solidoak zatitu egingo dira ondoren aplikatuko zaion sarea hobea izan dadin. Hurrengo irudietan solidoek hartutako itxura adierazten da:



IRUDIA 21: Al. ereduaren bola.

21. Irudian Al. ereduaren bolaren geometria ageri da, non erradialki eta perpendikularki plano ebakitzailak aplikatu zaizkion “slice” eragiketa eginez.



IRUDIA 22: Al. ereduaren kanpo-eraztuna.

22. Irudian kanpo-eraztuna erakusten da. Ikus daitekeenez, bi trantsizio-elementu ditu (gris kolorekoak).

Alanbreei dagokionez, ez dira zatituak izan ez delako beharrezkoa.

Aurreko kasuan bezala, parametrizazio bat egingo da. Honek dimentsioak erraz aldatu ahal izatea eta neurri desberdineko errodamenduen analisisien optimizatzea dakar. Hurrengo taulan eredu honen parametroak sailkatu dira:

Parametroa	Esanahia	Parametro mota	Balioa
Dw	Errodamenduko bolen diametroa	Independentea	Dw
Da	Alanbreen zentroen arteko distantzia diametrala	Menpekoa	Dw·Ra
Dda	Alanbreen diametroa	Menpekoa	Dw·Rda
Dt	Alanbreen hozkaren diametroa	Menpekoa	$Dw/(2 \cdot s')$, non s' =Konformitatea'
Tartea	Kanpo- eta barne-eraztunen arteko tartea	Menpekoa	Dw·Rlg'
Dist_ardatz_zulo	Bolaren ardatzetik eraztuneko zuloetako ardatzetara dagoen distantzia	Menpekoa	Dw·Rlt'
Hg	Kanpo- eta barne-eraztunen altuera desberdintasuna	Independentea	Hg
D_zulo	Torlojuen zuloen diametroa	Menpekoa	Dw·Rdt'
Altuera	Kanpo- eta barne-eraztunen altuera	Menpekoa	Dw·Rh'
alfa	Bolaren ukitzaile diren aurpegien ukitze-puntuaren posizioa bolaren ardatz horizontaletik harturik	Independentea	alfa
Dpw	Errodamenduaren aurkako aldeetan dauden bolen arteko distantzia diametrala	Independentea	Dpw

Zabalera	Kanpo- eta barne- eraztunen kanpoko diametroaren eta barneko diametroaren arteko kendura	Menpekoa	$Dw \cdot Rl' - Tarte/2$
biraketa_angelua	Errodamendu osotik analizatuko den zona lokalaren angeluaren erdia	Menpekoa	$180/N_{bola}$
rb	Eraztunen barnekaldeko biribilketa erradioa	Menpekoa	$Dw \cdot Rb$
chaflan	Eraztunen alaken katetoen neurria	Menpekoa	$Dw \cdot Rc$
Extrude_VolControl_ol1	Eraztuneko trantsizio elementuen neurria	Menpekoa	chaflan
Diam_VolControl_Bola_1	Bolaren zatiketa egiteko erabili den elementu baten diametroa	Menpekoa	$0,6 \cdot Dw$
Diam_VolControl_Bola_2	Bolaren zatiketa egiteko erabili den elementu baten diametroa	Menpekoa	$0,9 \cdot Dw$

TAULA 3: Al. ereduaren parametroen sailkapena.

non Konformitatea', Rl' , Rdt , Rh' , Rlt' , Rlg' , Ra , Rda , Rc , Rb aurretik definituriko konstante biderkatzaileak diren.

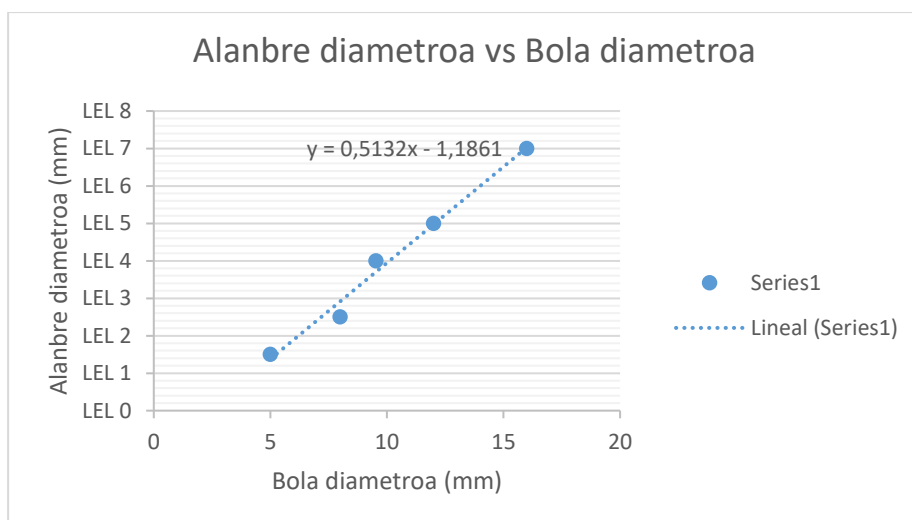
Kasu honetan, ez dugu konstante hauek lortzeko oinarririk; hala ere, FRANKE GMBHren webgunean topatu daitezkeen katalogoekin haietariko batzuk lor daitezke, batzuk zuzenean eta beste batzuk trigonometria aplikatuz.

Hurrengo taulan Ra , Rda , Rc , Rlg eta Rb parametroak batzen dira FRANKE GMBHk fabrikatzen dituen alanbre motako errodamendu desberdinentzako:

	LEL 1,5	LEL 2,5	LEL 4	LEL 5	LEL 7
Dw	5	8	9,525	12	16
Dpw_min	70	150	220	220	340
Dpw_max	150	300	1500	1500	2000
Ra	1,0341948	0,98424789	1,09317179	1,02831869	1,02097356
Rda	0,3	0,3125	0,41994751	0,41666667	0,4375
Rb	0,13	0,14375	0,19947507	0,2	0,2125
Rlg	0,52	0,175	0,20997375	0,16666667	0,125
Rc	-	0,1625	0,07874016	0,175	0,046875
Rl					
Rlt					
Rh					
Rdt					

TAULA 4: FRANKE GMBHren errodamendu alanbrikoen parametrizaziorako konstante biderkatzaileen sailkapena.

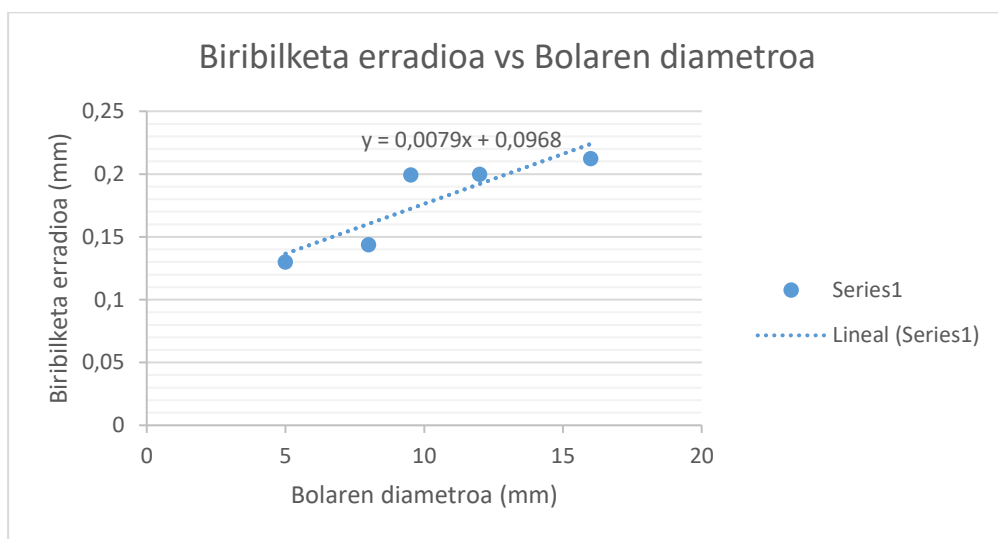
Ikus daiteke, logikoa den bezala, zenbat eta errodamenduko bolen diametroa txikiagoa izan, orduan eta errodamendu txikiagoak izango direla (eraztunen diametroa). Konstante biderkatzaileei dagokienez, Ra, Rc eta Rlg balioetan ez da joera nabaririk aurkitzen bolen diametroaren handipenarekin. Aitzitik, Rda balioetan handitzeko joera bat dagoela behatu daiteke. Hau da, geroz eta bolaren diametroa handiagoa, orduan eta alanbrearen diametroa handiagoa izango da. Hurrengo grafikoan argi eta garbi agertzen da:



IRUDIA 23: Alanbre diametroa vs Bola diametroa FRANKE GMBHren errodamendu alanbrikoetarako.

Irudi honetan ikus daitekeen bezala, arestian aipaturiko tendentzia positiboa betetzen da. Gainera, erregresio lineal bat eginez gero, puntuak asko urruntzen ez direla behatu daiteke. Are eta gehiago, LEL 1,5, LEL 5 eta LEL 7 errodamenduek erregresio lineal hau guztiz betetzen dute. Horren ondorioz, lorturiko ekuazio hau oso baliagarria izan daiteke, izan ere, edozein diametroko bola duen errodamendu alanbriko baten pisten diametroaren balio onargarri bat zehaztu daiteke.

Rb balioari dagokionez, kasu honetan ere, handitu egingo da bolaren diametroarekin batera. Hurrengo irudian biribilketa erradioa bolaren diametroaren arabera adierazten da:

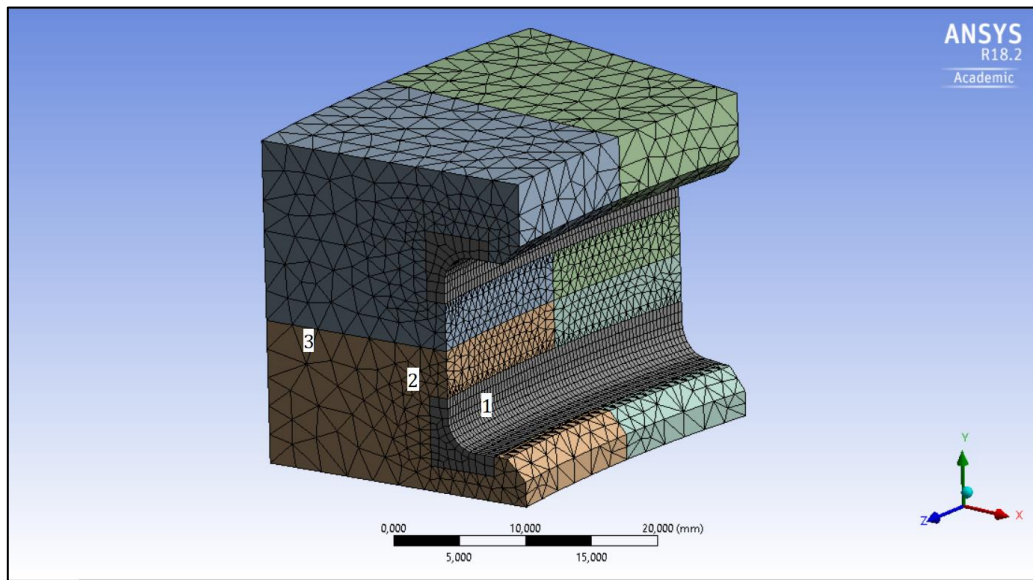


IRUDIA 24: Biribilketa erradioa vs Bolaren diametroa Franke GmbH-ren errodamendu alanbrikoetarako.

Aurreko irudiari erreparatuz, egindako hurbilpena oso zehatza ez dela ondorioztatu daiteke. Hala ere, biribilketa erradioaren garrantzia ez da oso handia izango analisisia egiterako orduan.

7.2.2 SAREA

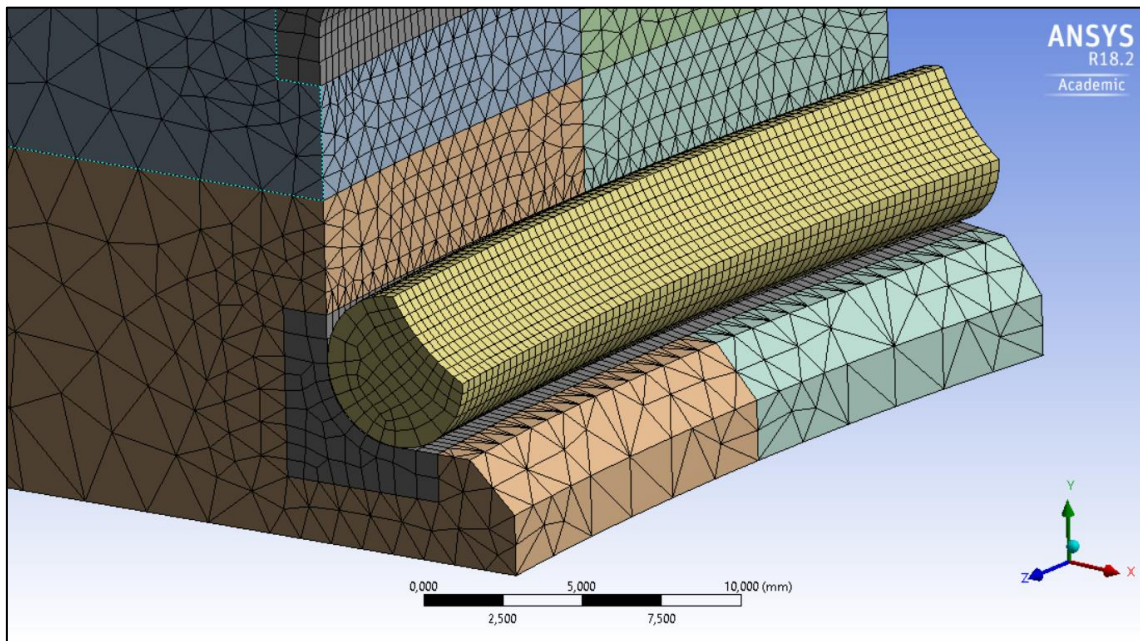
Eredu honetako sareari dagokionez, ez da beste sare baten oinarrikerik erabili erreferentzia bezala. Aurreko ereduko saretze prozesua jarraitu nahi izan da, solidoen zatien banakako saretzea, hain zuzen ere. Bolari dagokionez, A Ereduko sareari ez zaio aldaketarik egin, beraz, ez da erakutsiko. Hurrengo irudietan solido desberdinen sareak erakusten dira:



IRUDIA 25: Al. ereduaren kanpo-eraztuna.

Aurreko irudi honetan Al. ereduaren kanpo-eraztunaren sarea erakusten da, bertan hiru zonalde nagusi bereiz daitezkeelarik:

- 1. zonaldea: Bolarekin kontaktuan dauden alanbreekin kontaktatzen duen kontrol bolumenari dagokio. Hau saretzeko, sekzioaren elementuen neurriak zehaztu dira eta ondoren “sweep” bat aplikatu da.
- 2. zonaldea: Lehen eta hirugarren zonaldeen arteko trantsizioa adierazten du. Ikus daitekeenez, hirugarren zonaldea kokatzen den elementu berari dagokio (laranja) eta, ondorioz, sare-elementu tamaina bera eduki beharko luke; baina, influentzia-esferak erabili dira eta horrela trantsizio egoki bat sortu da.
- 3. zonaldea: Eraztunaren interes gutxienerako zonari dagokio. Elementuen tamaina handiagoa guztiz onargarria da.

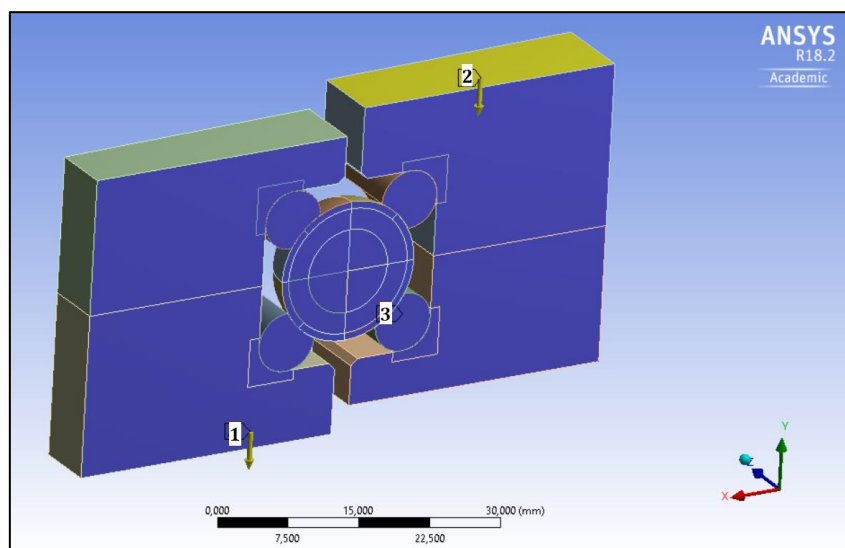


IRUDIA 26: Al. ereduaren pista.

Bolarekin kontaktuan dauden pistei buruz, erabilitako saretzea nahiko simplea dela esan daiteke. Ertzetan beharrezko elementu kopurua definitu eta ondoren “sweep” bat aplikatu da.

7.2.3 INGURUNE BALDINTZAK

Kasu honetan aplikaturiko ingurune baldintzak Est. ereduari aplikaturiko berdina dira, aldatzen den gauza bakarra geometria delarik:



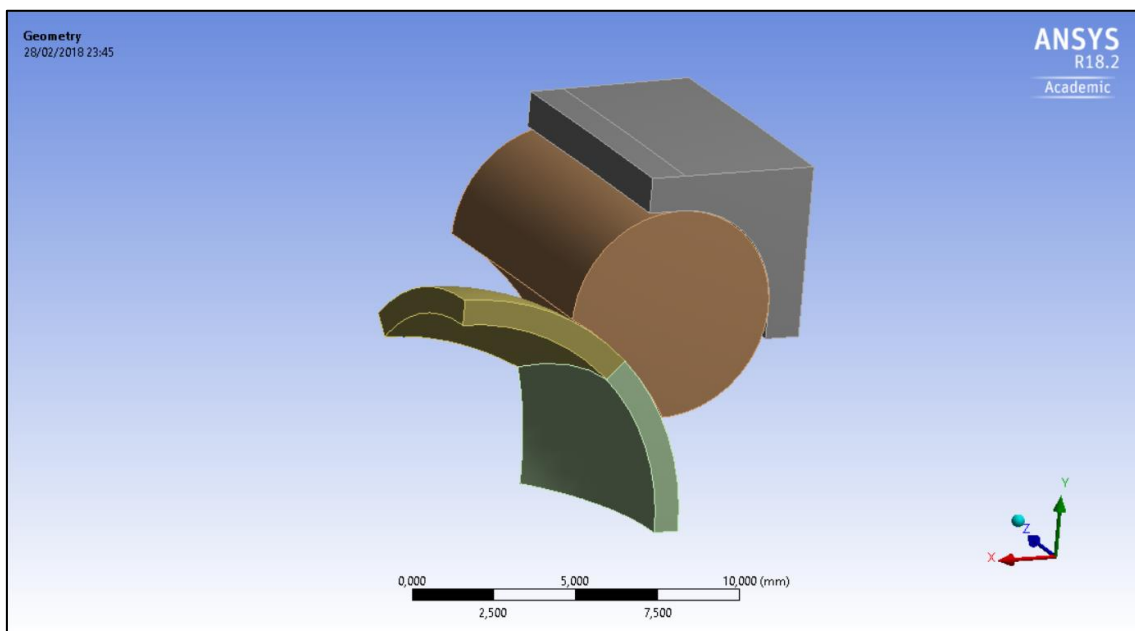
IRUDIA 27: Al. ereduaren ingurune baldintzak.

- 1. Ingurune baldintza. Torlojuen burua finkatzen den gainazalari aplikatzen zaio torlojuaren funtzioa modelizatzeko. Gainazalean euskarri simple bat jartzen da, norabide normalean desplazamendua ezeztatzen delarik.
- 2. Ingurune baldintza. Modelizatzen den indar axialari dagokio. Desplazamendu bertikal bat aplikatzen da gainazalaren norabide normalean. Aipatu beharra dago desplazamenduak erabiltzen direla indarrek baino konbergentzia altuagoa dutelako.
- 3. Ingurune baldintza. Marruskadura gabeko euskarria. Honen helburua plano urdinaren norabide normaleko desplazamendua ekiditea da.

7.2.4 AZPIMODELOA

7.2.4.1 GEOMETRIA

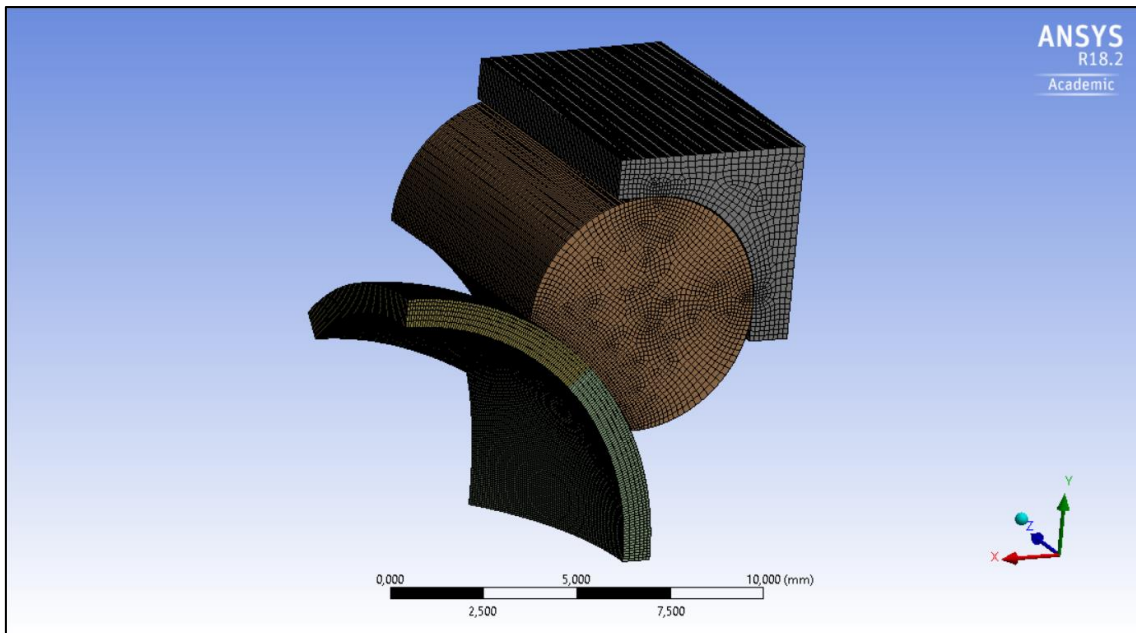
Hurrengo irudian azpimodeloaren geometria ikus daiteke, zein trantsizio-elementuaz, alanbreaz eta bolaren gainazalaz osatuta dagoen:



IRUDIA 28: Al. ereduaren azpimodeloaren geometria.

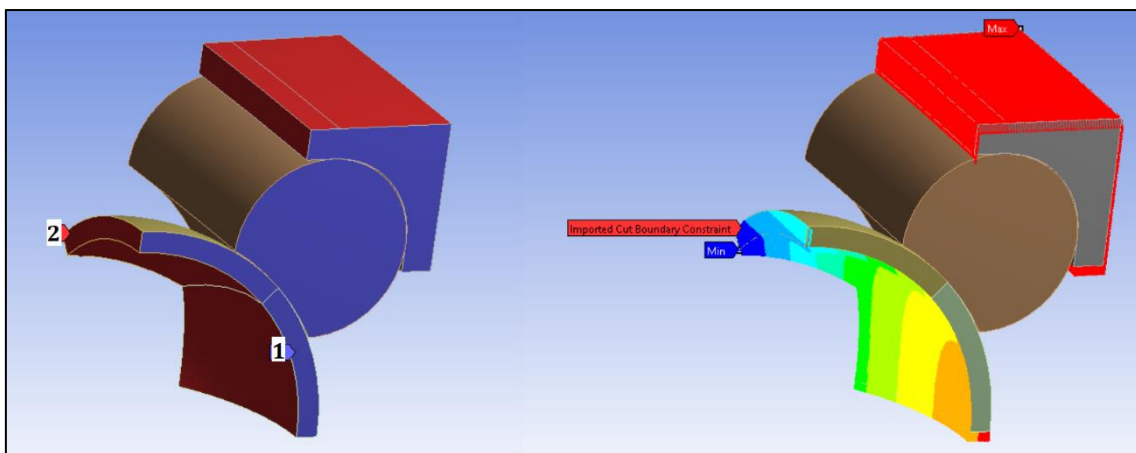
7.2.4.2 SAREA

Kasu honetan ere eredu globaleko sarea mantendu da, nodo kopurua handituz:



IRUDIA 29: Al. ereduaren azpimodeloaren sarea.

7.2.4.3 INGURUNE BALDINTZAK

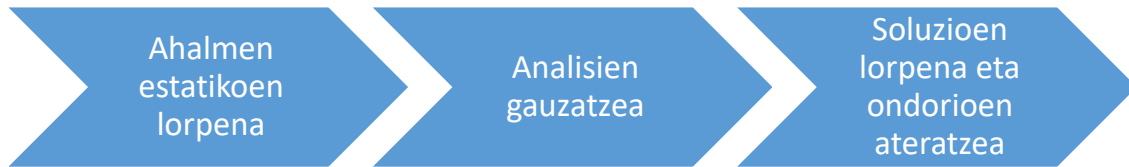


IRUDIA 30: Al. ereduaren azpimodeloaren ingurune baldintzak.

Aurreko irudian ikusten den bezala, 2 zonalde gorrian eredu globaletik lorturiko soluzioak txertatu dira ingurune baldintza bezala. Horrez gain, 1 ingurune baldintza azpimodeloaren berezko ingurune baldintza bati dagokio, plano urdinaren norabide normalean edozein desplazamendu ekiditen duenari, hain zuzen ere (bi aldeetatik).

8 METODOLOGIA

Proiektu honetan eraman den analisi-metodologia hurrengo eskeman agertzen dena da:



IRUDIA 31: Analisi-metodologia eskema.

8.1 AHALMEN ESTATIKOEN LORPENA

Bostgarren puntuan azaldu den bezala, ahalmen estatiko axiala, ISO normaren arabera, errodamendu bateko bolaren eta hark errodutzen duen pistaren arteko kontaktuan agertzen den presioa 4200 MPa-ko baliokoa izateko aplikatu beharreko kanpo-indar axiala da. Norma hau aplikatuta [1] hurrengo balioa lortzen da: $C_{0a}=882,38$ kN. Norma honetan konformitate jakin bat bakarrik (0.925) erabiltzen denez, analisisetan erabiliko diren konformitateetara moldatu behar da. Hala ere, norma honi buruzko txosten teknikoan [2] konformitate desberdinentzako nola aplikatu adierazten da. Arestian aipatu den bezala, Daidié [3] kontaktu azalerako presio maximoa eskuratzeko formula adierazi zuen:

$$P_{max} = 1.84 \times 10^3 (1 - s)^{0.2117} \left(1 \pm \frac{D_w \cos \beta}{D_{pw}} \right)^{-0.455} \frac{Q^{\frac{1}{3}}}{D_w^{\frac{2}{3}}} \quad (2)$$

Formula hau moldatu eta hurrengo adierazpena iritsi gaitezke:

$$C_{0a} = 0,001 \left(\frac{P_{max}}{1840} \right)^3 (1 - s)^{-0.6351} \left(1 - \frac{D_w \cos \beta}{D_{pw}} \right)^{1,365} D_w^2 Z \sin \beta \quad (2)$$

Beraz, aurreko adierazpena aplikatuta, $P_{max} = 4200$ MPa-rako partikularizatuz, ondorengo balioak lortzen dira:

Konformitatea (s)	Ahalmen estatikoa (C_{0a} , kN)
0.943	1054
0.87	621

TAULA 5: Ahalmen estatiko axial teorikoak.

Balio hauek analisisetan erabiliko diren bi konformitateentzako ahalmen estatiko axial teorikoak dira. Ahalmen estatiko erreala analisiak egitean jakingo da. Hala ere, 2013an Aguirrebeitia et al. [18] EFM ereduaren ahalmen estatikoaren eta ahalmen estatiko teorikoaren arteko erlazioa zenbatetsi zuten errodamenduaren tamainaren arabera. Hau jarraituta, EFM ereduaren ahalmen estatiko hurbilduak lortzen dira, zein analisisetan erabiliko diren balioak lortzeko erabiliko diren:

Konformitatea (s)	Ahalmen estatikoa (C_{0a} , kN)
0.943	1213.1
0.87	674.24

TAULA 6: Ahalmen estatiko axial teoriko moldatuak.

Behin hau lorturik, EFM erduei aplikatu beharreko kargak zehaztu behar dira. Ereduek 82 bola izango dituztela suposatuko denez, ahalmen estatiko axiala bola hauetan guztietan banatuko da; ondorioz, bola bakoitzeko ahalmen estatiko axiala $\frac{C_{0a}}{82}$ eginez lortuko da. Horrez gain, bolaren sekzio erdia analizatuko denez, lorturiko balioaren erdia izango da aplikatu beharrekoa. Hurrengo taulan adierazten dira amaierako balioak:

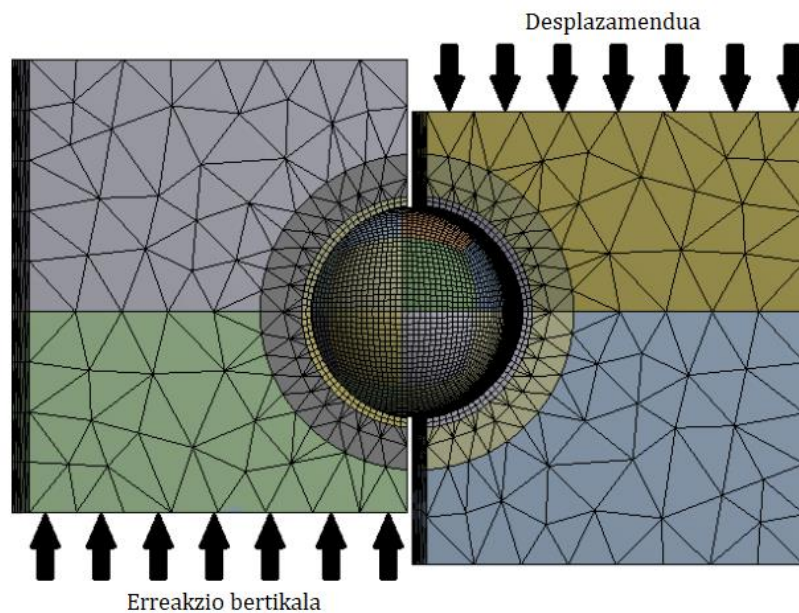
Konformitatea (s)	Ahalmen estatikoa (C_{0a} , kN)
0.943	7.39
0.87	4.11

TAULA 7: Ahalmen estatiko axial teoriko moldatuak, EFM ereduaren kasuan.

8.2 ANALISIEN GAUZATZEA

Analisi hauen helburua EFM erdua ahalmen estatiko axialeko egoerara eramatea da, ondoren zurruntasun kurbak eratzeko eta kontaktu azalerako joerak behatzeko.

Aurreko atalean, errodamenduen erduei finko ez dagoen eraztunean aplikatu beharreko karga bertikalak (hurbilduak, errealak ereduak emango ditu) kalkulatu dira. Hala ere, jakina da EFMak konbergentzia arazoak izaten dituela indarrak aplikatzerako orduan, elementu asko dituzten erduetan. Horren ondorioz, desplazamendu bertikal negatiboak aplikatuko dira eta haien ondorioz eraztun finkoan suertatzen diren erreakzio bertikalak aterako dira, hauen balioa aurreko atalean kalkulaturikoa izan arte.



IRUDIA 32: Akzio-erreakzio sistema EFM erduan.

Aipatu den bezala bi konformitate desberdin landuko dira. Bata, $s=0.943$ baliokoa, lau kontaktu puntuko errodamendu estandar baten konformitateari dagokio. Bestea, $s=0.87$ baliokoa, FRANKE GMBH enpresak erabiltzen duen pista alanbrikodun errodamendu bati dagokio. Hau horrela, errodamendu mota bakoitzerako EFM eredu bat edukita, analizatzeko lau konbinazio lortzen dira.

Bi errodamenduak tamaina berdinekoak izango dira; hau da, bolaren diametroa (D_w) 16 mm-koa izango da kasu guztietan, eta errodamenduaren batezbesteko diametroa (D_{pw}) 420 mm-koa. Aipatu den bezala 82 bola izango ditu.

Lau kasuetarako analisi ez-lineal bat egingo da, segundo batean aplikatzen den desplazamendua hainbat azpiurratsetan banatuz. Hurrengo taulan adierazten da:

Eredua	Est_0943*	Est_087*	Al_0943*	Al_087*
Konformitatea	0.943	0.87	0.943	0.87
Aplikaturiko desplazamendua (mm)	-0.32	-0.32	-1.9	-1
Karga-denbora (s)	1	1	1	1
Azpi-urrats kopurua	20	20	20	40

TAULA 8: Analisi-parametroak landutako kasuen arabera.

*Est_0943= Lau kontaktu puntuko errodamendu estandarra, $s=0.943$.

*Est_087= Lau kontaktu puntuko errodamendu estandarra, $s=0.87$.

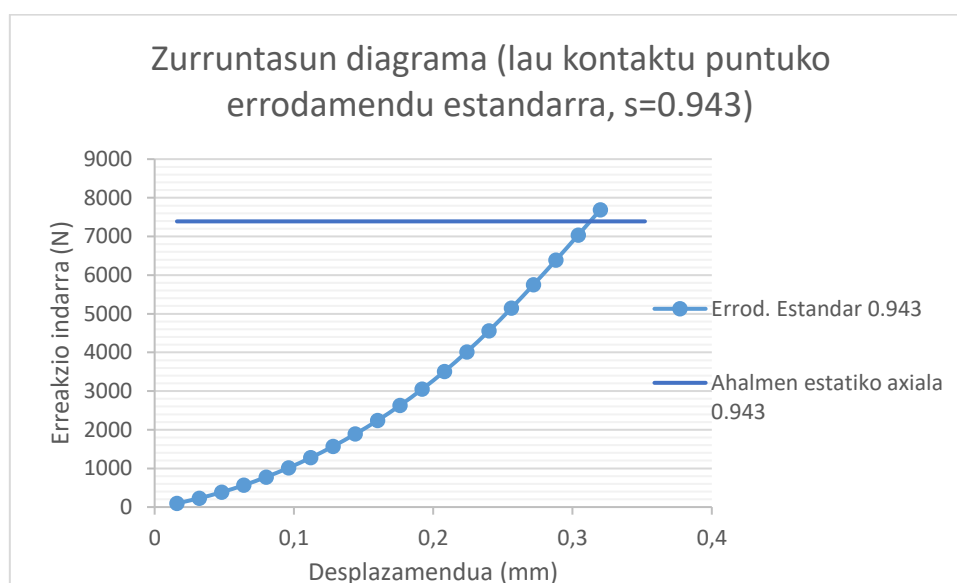
*Al_0943= Pista alanbrikodun errodamendua, $s=0.943$.

*Al_087= Pista alanbrikodun errodamendua, $s=0.87$.

8.3 SOLUZIOEN LORPENA ETA ONDORIOEN ATERATZEA

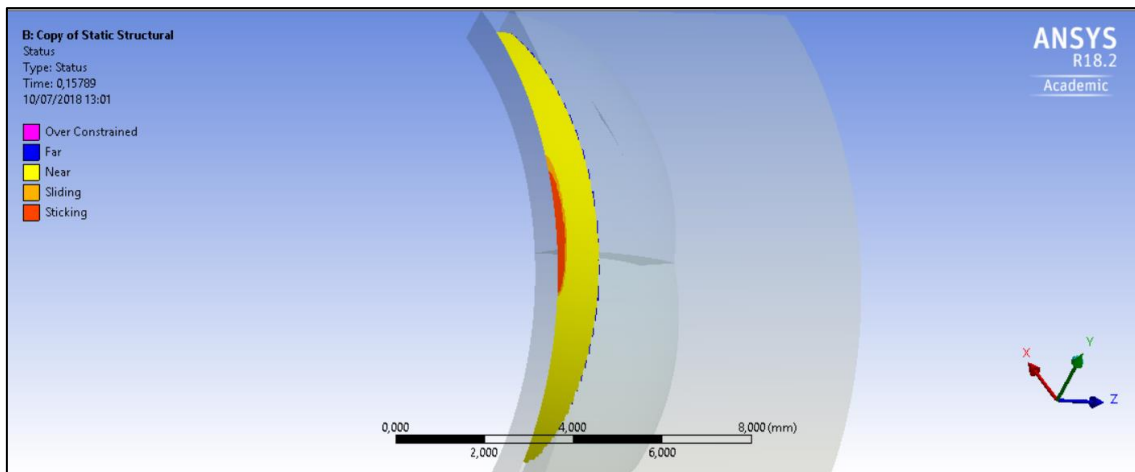
8.3.1 LAU KONTAKTU PUNTUKO ERRODAMENDU ESTANDARRA, $s=0.943$

Analisi ez-lineala jorratuko da, non segundo bat 20 azpi-urratsetan banatuko den eta ondorioz desplazamendu bertikala pixkanaka akzionatuko den. "Solution information" atalean lortzen diren erreakzio bertikalak aplikaturiko desplazamenduen arabera irudikatzen badira, errodamenduaren zurruntasuna lortzen da:



IRUDIA 33: Lau kontaktu puntuko errodamenduaren zurruntasun diagrama ($s=0.943$).

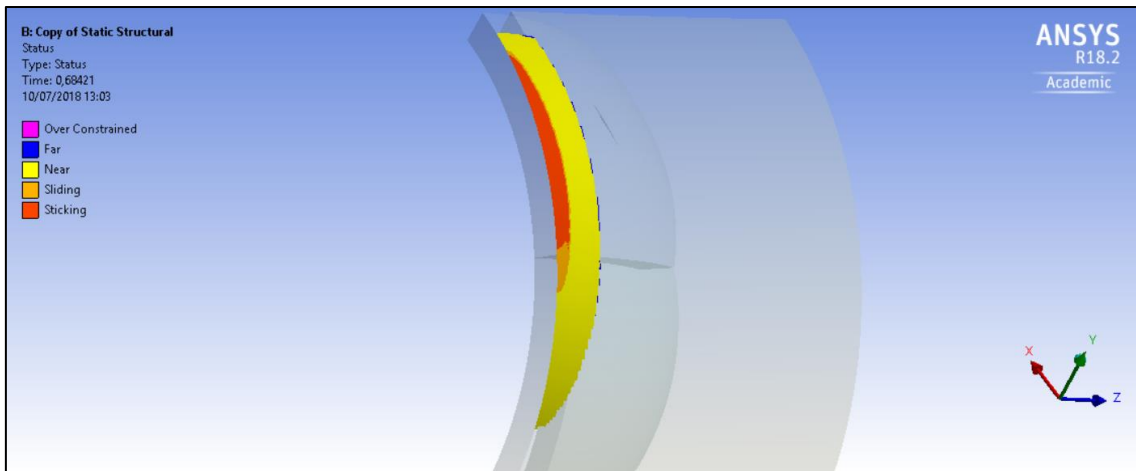
Bolaren eta pistaren arteko kontaktuari dagokionez, espero zen bezala, Hertzzen kontaktu elastikoaren teoria beteko da, non, kontaktu gainazalaren kurbadura jarraia denean kontaktu eremu teorikoaren inguruan kontaktu hertziaz bat izango dugun. Kasu honetan, bi esferaren kasua denez (esfera bat bola da eta bestea pistaren kurbadura), kontaktu azalera elipse itxurakoa da, hurrengo irudian ikus daitekeen moduan:



IRUDIA 34: Est_0943 ereduaren kontaktu-portaera, $t=0.15789$ segundo.

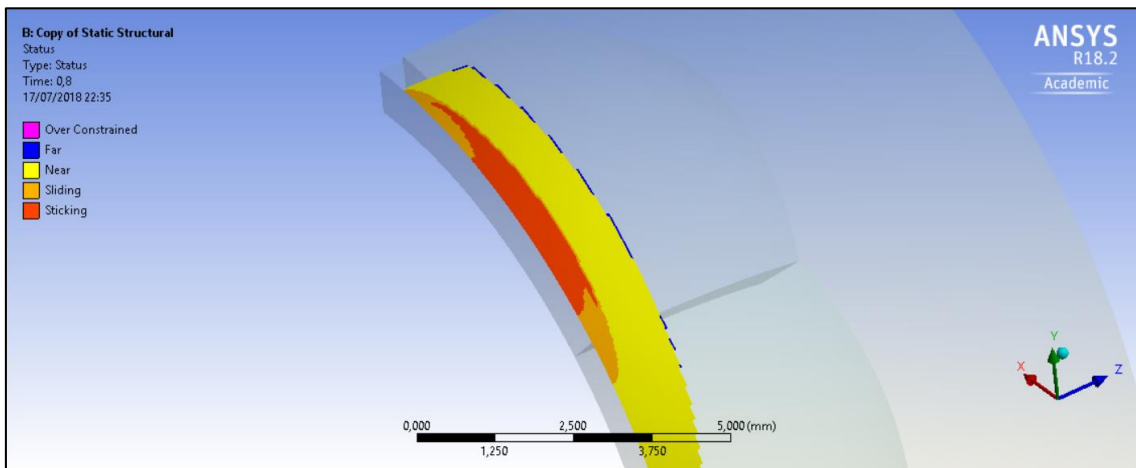
34. Irudian ikusten den bezala, bolaren eta pistaren arteko kontaktuan hainbat zonalde agertzen dira. Zonalde gorriak esan nahi du bertan bi gainazalak itsatsita daudela, mugimendua ekidinez. Zonalde laranja, nahiz eta irudi honetan ez den asko nabaritzen, labainketari dagokio, hau da, bi gainazalak gune horretan erlatiboki mugitu ahal dira.

Desplazamendua aplikatzen doan heinean, espero den bezala, kontaktu azalera handiagotzen da:



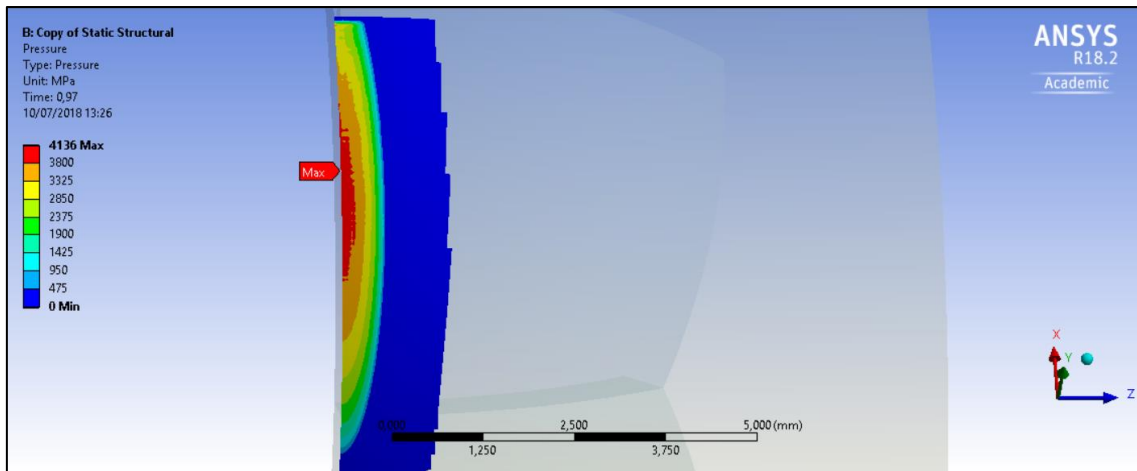
IRUDIA 35: Est_0943 ereduaren kontaktu-portaera, $t=0.68421$ segundo.

Hurrengo irudian ikusten den bezala, kontaktu azalerak elipse itxura galdu du, izan ere trunkaketa hasi da ematen ($t=0.8$ s):



IRUDIA 36: Est_0943 ereduaren kontaktu-portaera, $t=0.8$ segundo.

Kontaktuan sortzen den presioari dagokionez, maximoa (4136 MPa) amaieran emango da:



IRUDIA 37: Est_0943 ereduaren kontaktuko tentsioak, t=0.97 segundo.

Hurrengo taulan ahalmen estatiko axialerako balio teoriko eta praktikoak adierazten dira:

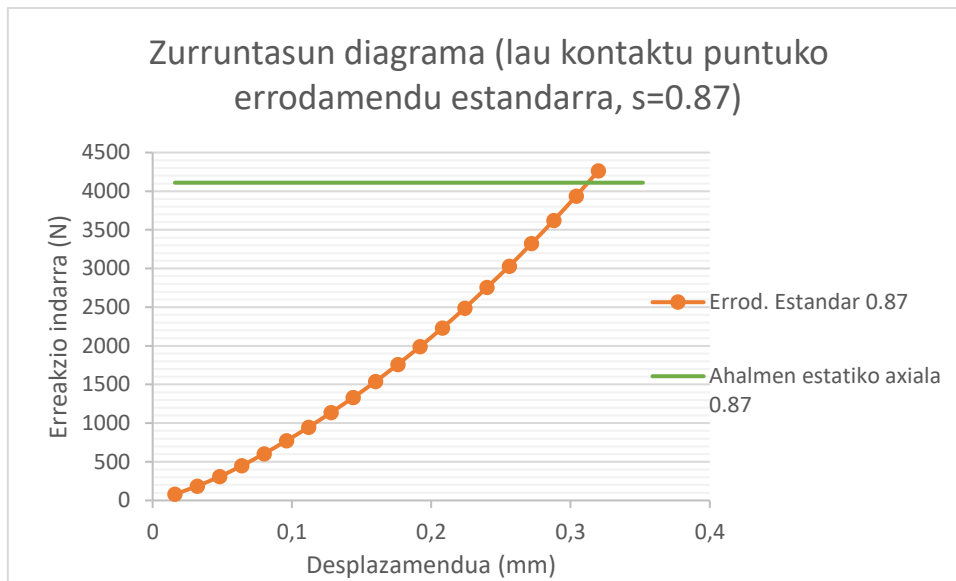
	Erreakzio bertikala (N)	Presio maximoa (MPa)
Teorikoa	6426.8	4200
Teoriko moldatua	7390	4200
EFM	7847.9	4136

TAULA 9: Est_0943 ereduaren ahalmen estatiko axial balioak.

Ikusten den bezala eta espero zen bezala, ahalmen estatiko axialaren balioak antzerakoak dira, batez ere lortutako balio teoriko moldatua eta EFMaz lortutakoa konparatzen baditugu.

8.3.2 LAU KONTAKTU PUNUKO ERRODAMENDU ESTANDARRA, s=0.87

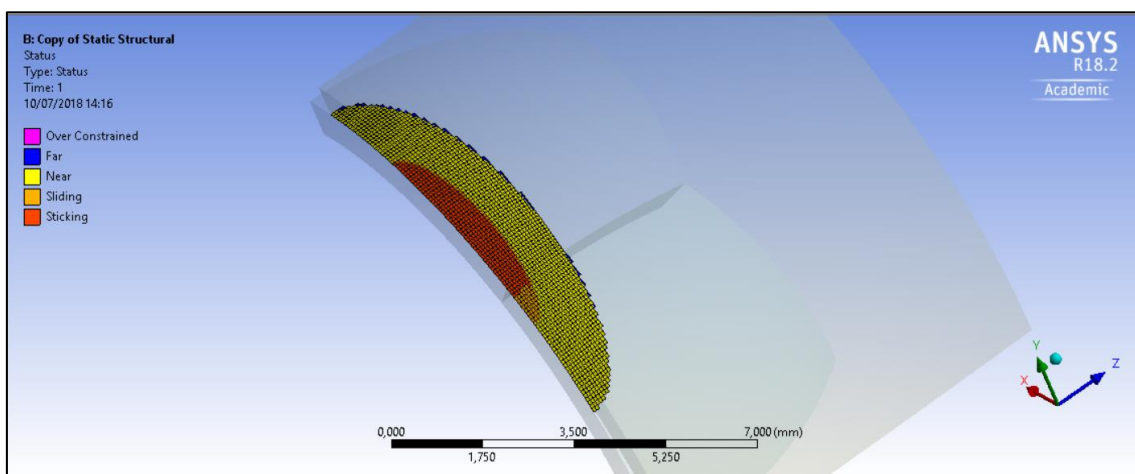
Aurreko atalean egindako berdina jarraituz, zurruntasun diagrama lortzen dugu:



IRUDIA 38: Est_087 ereduaren zurruntasun diagrama.

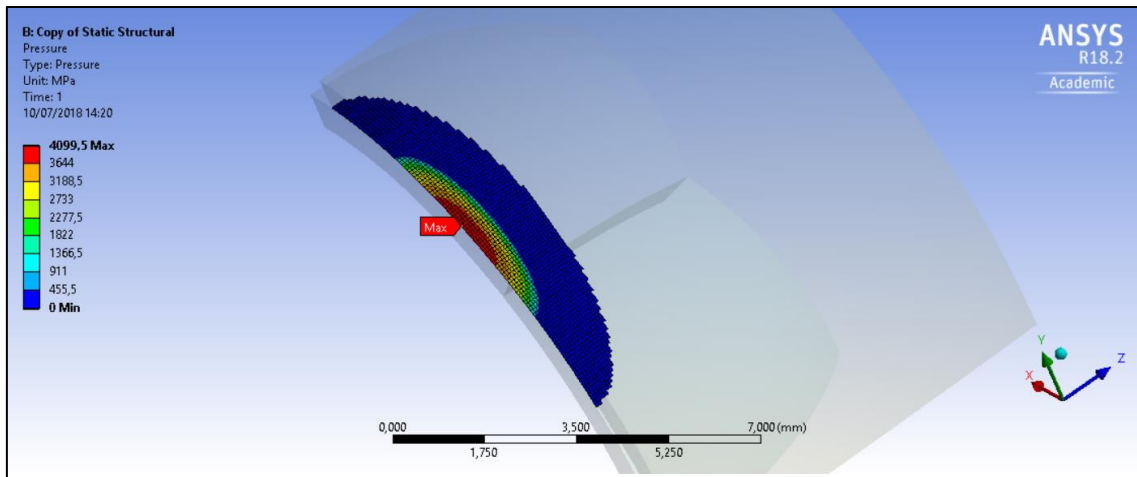
Aurreko kasuko zurruntasun diagramari erreparatuz, esan daiteke konformitatea txikituz gero, zurruntasuna txikituko dela, izan ere, desplazamendu berdina indar gutxiagorekin lortuko da.

Bolaren eta pistaren arteko kontaktuari dagokionez, kasu honetan ez da trunkaketarik emango, izan ere, konformitatea txikiagoa denez, kontaktu azalera txikiagoa izango da eta ez da trunkatzera iritsiko. Hurrengo irudian kontaktuaren amaierako egoera erakusten da:



IRUDIA 39: Est_087 ereduaren kontaktu-portaera, t=1 segundo.

Presio maximoa amaieran lortuko da, 4099,5 MPa-ko balioarekin:



IRUDIA 40: Est_087 ereduaren kontaktuko tentsioak, t=1 segundo.

Kalkulatutako balio teorikoekin konparatuz:

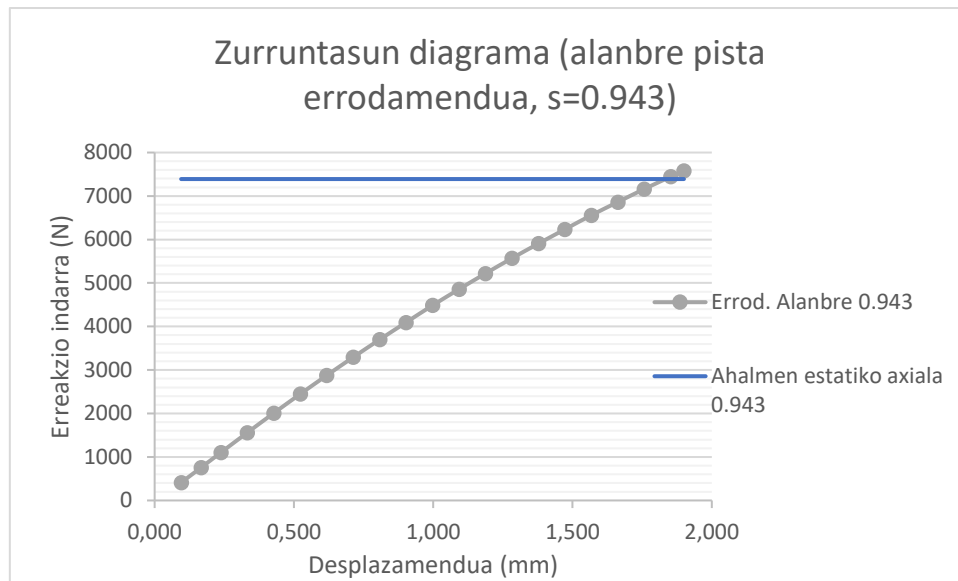
	Erreakzio bertikala (N)	Presio maximoa (MPa)
Teorikoa	3768.5	4200
Teoriko moldatua	4110	4200
EFM	4364.3	4099.5

TAULA 10: Est_087 ereduaren ahalmen estatiko axial balioak.

Kasu honetan ere ahalmen estatiko axial teoriko moldatua gehiago hurbiltzen da EFMaz lortutakora.

8.3.3 PISTA ALANBRIKODUN ERRODAMENDUA EDO WIRE-RACE BEARINGA, s=0.943

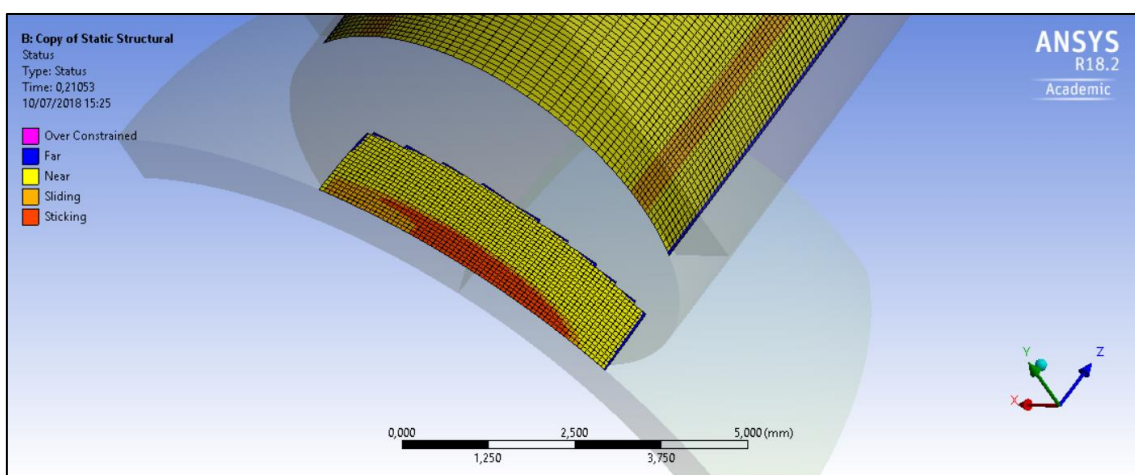
Erreakzio indarrak eta desplazamenduak bilduta, zurruntasun diagrama irudikatu da berriro ere:



IRUDIA 41: Al_0943 ereduaren zurruntasun diagrama.

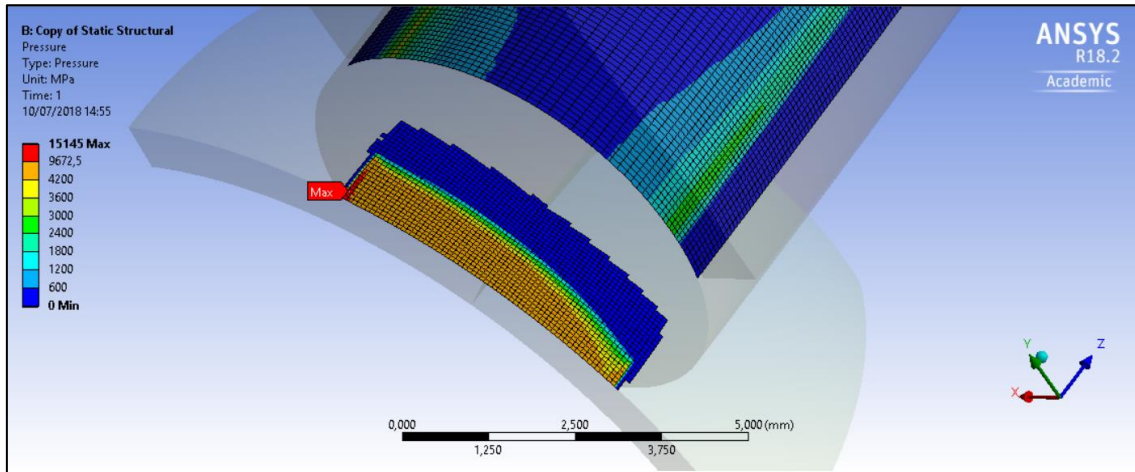
Ikusten den bezala, errodamendu honen zurruntasuna aurreko kasuena baino askoz baxuagoa da, ahalmen estatiko axialera iristeko desplazamendu oso handia aplikatu behar delako.

Kontaktu azaleraren portaerari dagokionez, esan beharra dago trunkaketa oso azkar ematen dela. Hori errodamendu mota hauek konformitate honekin lan egiteko prestatuta ez daudelako gertatzen da. Hurrengo irudian trunkaketa ematen hasten den unea erakusten da ($t=0.21053$ s):



IRUDIA 42: Al_0943 ereduaren kontaktu-portaera, $t=0.21053$ segundo.

Aurrekoa kontutan hartuta, 4200 MPa-ko presio kritikoa indar txikiago batekin agertzea esperoko da, eta hala konprobatzen da. Presio maximoa desplazamenduaren amaieran emango da eta 15145 MPa-koa da:



IRUDIA 43: Al_0943 ereduaren kontaktuko tentsioak, $t=1$ segundo.

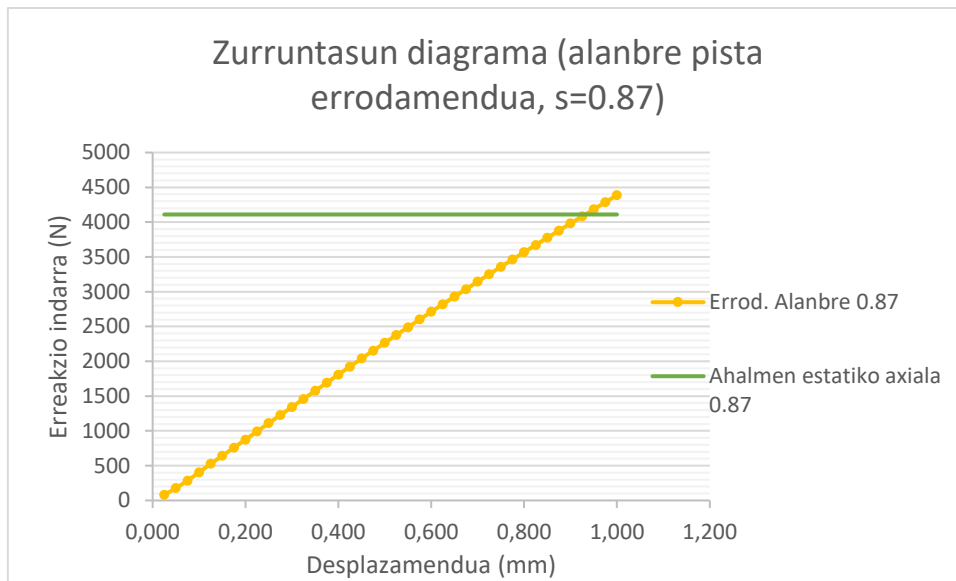
Esan den dezala, errodamendu honen ahalmen estatiko axiala balio baxukoa da. Hurrengo taulan balio teorikoekin konparatzen da:

	Erreakzio bertikala (N)	Presio maximoa (MPa)
Teorikoa	6426.8	4200
Teoriko moldatua	7390	4200
EFM	2874	4194.6

TAULA 11: Al_0943 ereduaren ahalmen estatiko axial balioak.

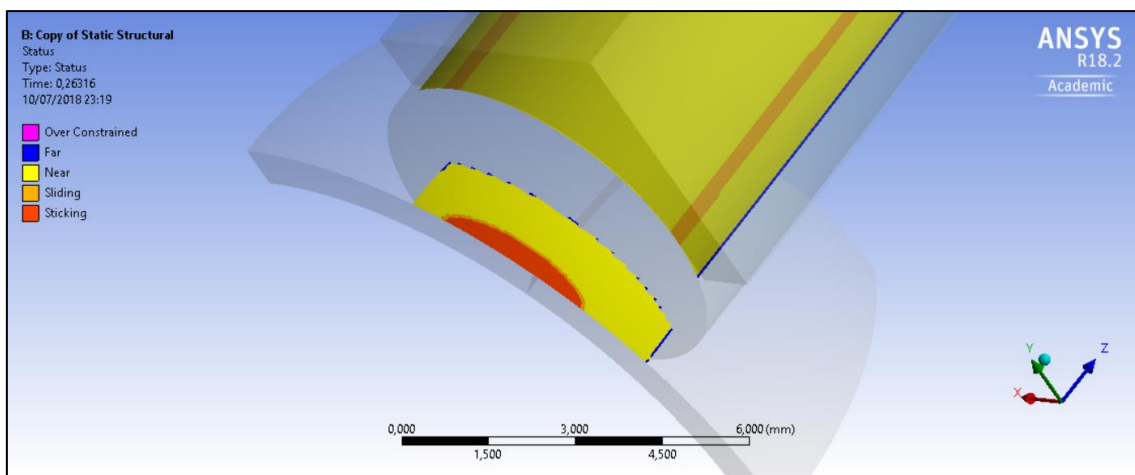
8.3.4 PISTA ALANBRIKODUN ERRODAMENDUA EDO WIRE-RACE BEARINGA, $s=0.87$

Azken kasu honetan FRANKE GMBH enpresak maneiatzen duen konformitate bat erabili da errodamendu alanbrikoen EFM analisirako. Aipatu beharra dago 40 azpi-urrats erabili direla analisia gauzatzeko, geometriaren konplexutasuna dela eta, programak era eraginkorrean soluzioa lor dezan. Gainera, horrela, zehaztasuna handitzen da analisisian, interesatzen den aspektu bat, alegia. Hurrengo irudian errodamendu honen zurruntasun diagrama irudikatzen da:



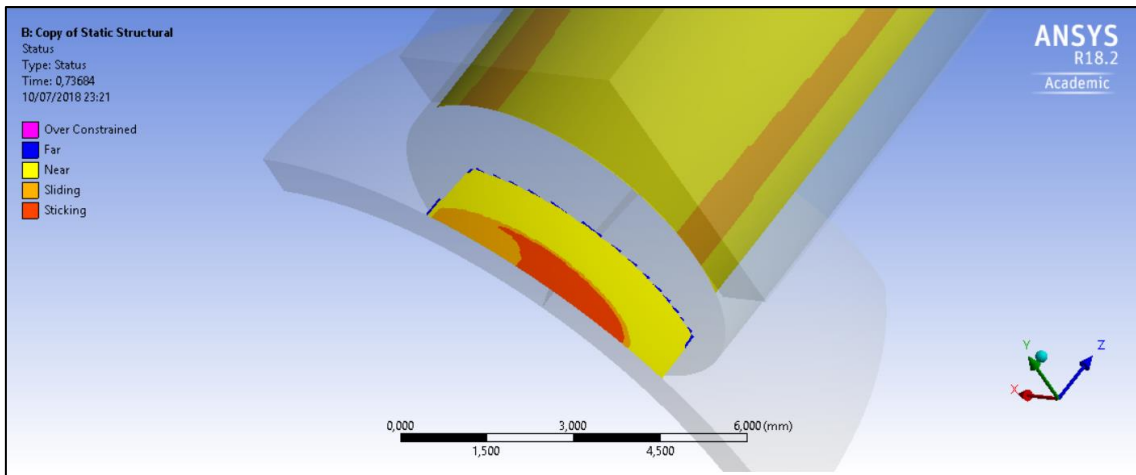
IRUDIA 44: Al_087 ereduaren zurruntasun diagrama.

Bolaren eta pistaren (kasu honetan, alanbrea) kontaktuaren izaerari dagokionez, trunkaketa emango da; baina, kasu honetan, aurrekoarekin konparatuz, ez da kargaren aplikazio-tartearen hasieran emango. Hurrengo irudian $t=0.26$ s-ko uneko egoera erakusten da:



IRUDIA 45: Al_087 ereduaren kontaktu-portaera, $t=0.26316$ segundo.

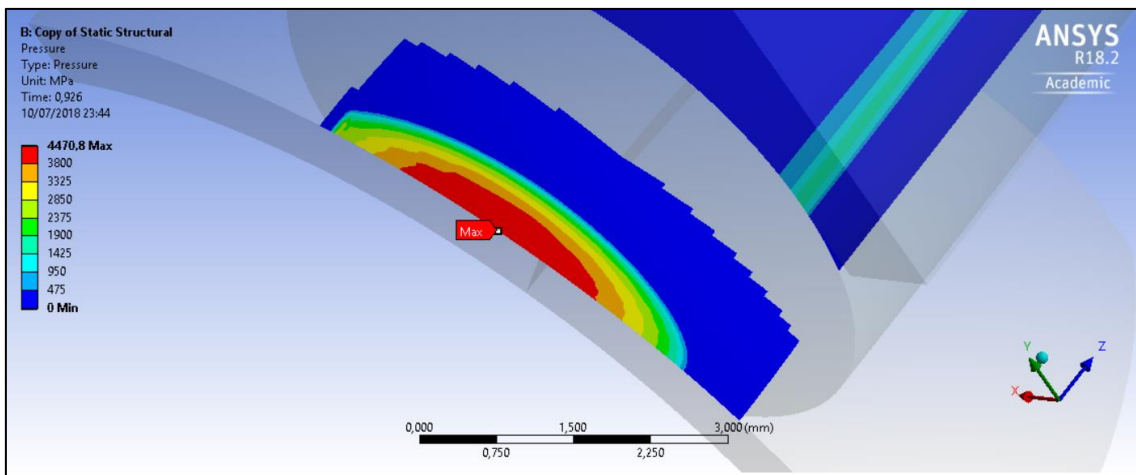
Ikusten den bezala, kontaktu azalerak itxura eliptikoa mantentzen du, haren gehiengoa itsaspen egoeran dagoelarik.



IRUDIA 46: Al_087 ereduaren kontaktu-portaera, $t=0.73684$ segundo.

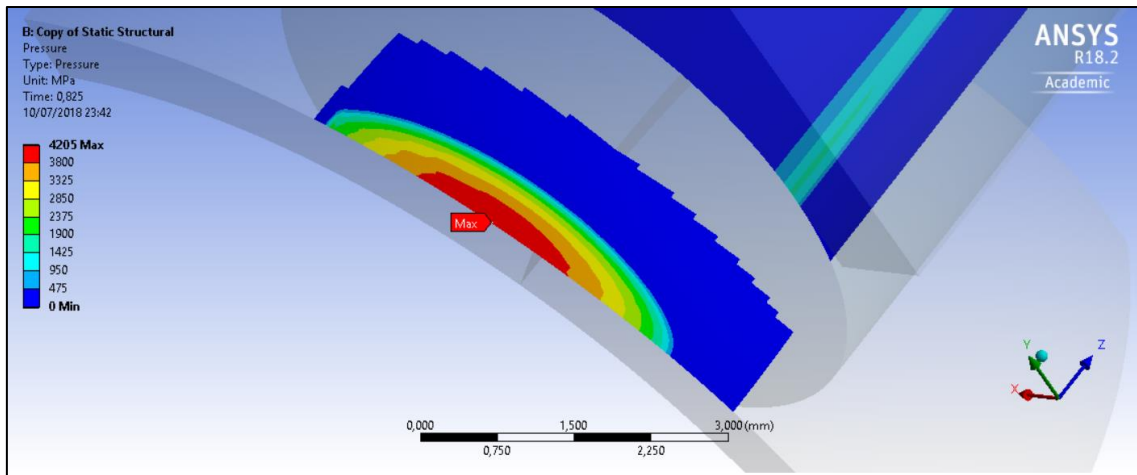
45. Irudian $t=0.73684$ s unea erakusten da, non kontaktuko elipsearen trunkaketa ematen den.

Presioari dagokionez, ahalmen estatiko axial teorikoari dagokion erreakzio indarra agertzen den unean, presioa kontaktuan 4470.8 MPa-koa da ($t=0.926$ s):



IRUDIA 47: Al_087 ereduaren kontaktuko tentsioak, $t=0.926$ segundo.

Hutsegite plastikoko presioa (4200 MPa) $t=0.825$ s unean ematen da, erreakzio indarra 3672.1 N denean:



IRUDIA 48: Al_087 ereduaren kontaktuko tentsioak, t=0.825 segundo.

Aurreko datuak hurrengo taulan biltzen dira, teorikoekin batera:

	Erreakzio bertikala (N)	Presio maximoa (MPa)
Teorikoa	3768.5	4200
Teoriko moldatua	4110	4200
EFM	3672.1	4205

TAULA 12: Al_087 ereduaren ahalmen estatiko axial balioak.

Ikusten den bezala, kasu honetan, ISO normaren aldaerak [2], (2) ekuazioaren arabera ematen duen lau kontaktu puntuko errodamenduen ahalmen estatiko axialaren balioa (teorikoa) gehiago hurbiltzen da EFM ereduari [18]-ren arabera lortutako balio teoriko moldatuari baino.

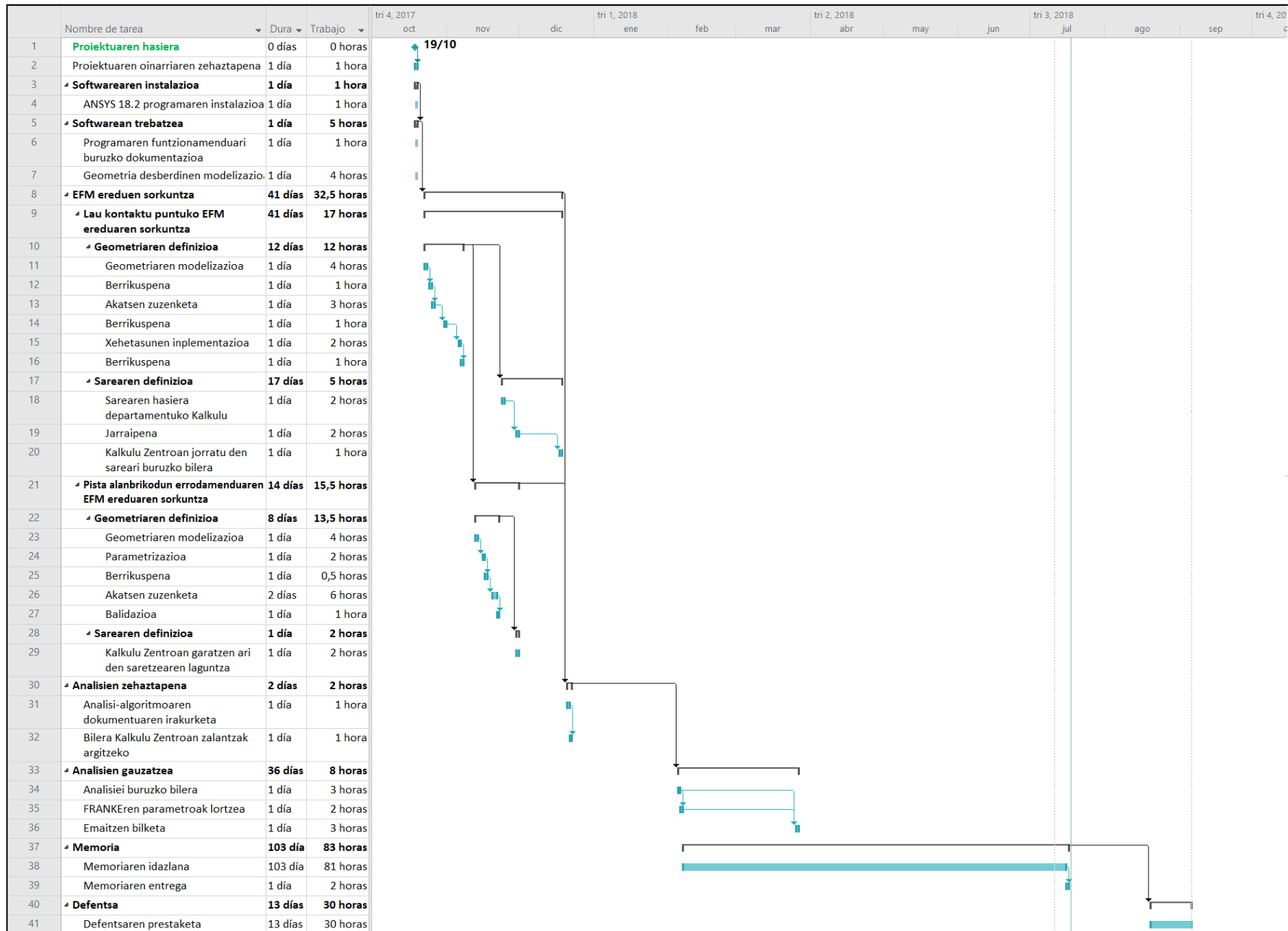
9 GANTT DIAGRAMA

Atal honetan proiektua garatzeko eraman den planifikazioa definitzen da. Horretarako, MICROSOFT PROJECT 2016 programaz baliatuz, Gantt diagrama bat eratu da. Bertan, planifikazioaren barneko ataza desberdinak definitzen dira, eta haien iraupena zehazten da. Gainera, atazen arteko menpekotasunak ipintzen dira, izan ere, ataza baten ondoren doan beste ataza bat aurrera eramateko, aurrekoa amaituta egon behar da lehenik.

Egutegiari dagokionez, urtarrileko eta maiatzeko azterketen egunak kendu dira, izan ere, egun haietan proiektua geldirik egongo da.

Hau horrela, proiektua 2017ko urriaren 19an hasten da eta 2018ko irailaren 5an bukatu, iraupen totala 204 egunekoa izanez. Egun hauetan zehar egindako lan ordu totala 162,5 ordukoa izango da.

Hurrengo orrialdean Gantt diagrama erakusten da:



IRUDIA 49: Gantt diagrama.

10 AURREKONTUA

Atal honetan, proiektuan eman diren gastu guztiak hartuko dira kontutan. Lau gastu mota desberdin adieraziko dira; hala nola, barne-orduei dagozkienak (proiektuan parte hartu duten pertsonen orduak), amortizazioei dagozkienak (proiektua garatzeko erabilitako baliabide materialei dagozkienak), mantenuari dagozkienak eta kontsumo elektrikoari dagozkienak.

Barne-orduak:

LANGILEAK	ORDUKO KOSTUA (€/h)	ORDUAK	KOSTUA (€)
Goi ingeniaria	35	15,5	542,5
Ingeniari teknikoa	20	162,5	3250
			3792,5

TAULA 13: Barne-orduak.

Goi ingeniariaren orduen kasuan, bertan proiektuko zuzendaria eta Kalkulu Zentroko laguntza jarri dira batera.

Amortizazioak:

AKTIBO FINKOA	HASIERAKO KOSTUA (€)	BIZITZA ERABILGARRIA	ERABILTZE DENBORA	AMORTIZAZIOA (€)
Ordenagailu pertsonala	949	6 urte	1 urte	158,17
Kalkulu Zentroko ordenagailua	3000	10 urte	4 hilabete	100
Office 365	99	1 urte	1 urte	99
				357,17

TAULA 14: Amortizazioak.

Mantenua:

AKTIBOA	MANTENU KOSTU TOTALA	LIZENTZIA KOPURUA	ERABILITAKO LIZENTZIA KOPURUA	MANTENU KOSTUA	ERABILTZE DENBORA	KOSTU ERREALA
ANSYS 18.2 Academic Teaching Introductory	2000 €/urte	100	1	20 €/urte	1 urte	20 €
ANSYS 18.2 Research	4000 €/urte	10	1	400 €/urte	4 hilabete	133,33 €
						153,33

TAULA 15: Mantenua.

Ikusten denez, aurreko taulan ANSYS softwarearen bi lizentzia ezberdin hartzen dira kontutan. Hauek mantenuaren kostuan bakarrik kontutan hartzearen arrazoia software hau Bilboko Ingeniaritza Eskolan guztiz amortizatuta dagoela da, izan ere, lizentzien hasierako erosketen prezioak urteetan zehar egindako softwarearen erabilerarekin konpentsatu dira.

Kontsumo elektrikoa:

APARAILUA	POTENTZIA	ORDUAK	PREZIOA	KOSTUA
Ordenagailu pertsonala	200 W	162,5	0,13 €/kWh	4,225 €
Kalkulu Zentroko Ordenagailua	600 W	290	0,13 €/kWh	22,62 €
				26,845 €

TAULA 16: Kontsumo elektrikoa.

Aurrekontua:

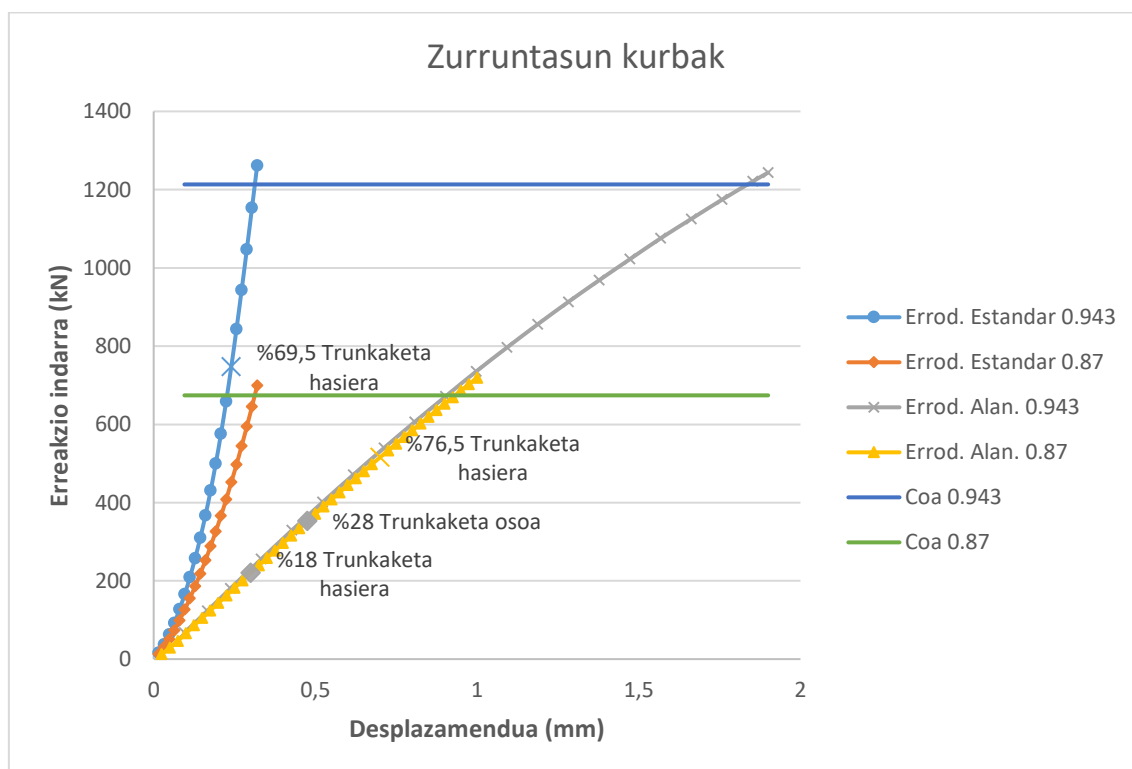
AURREKONTUA	KOSTUA
BARNE-ORDUAK	3792,5 €
AMORTIZAZIOAK	357,17 €
MANTENIMENDUA	153,33 €
KONTSUMO ELEKTRIKOA	26,845 €
	4329,85 €

TAULA 17: Aurrekontua.

Proiektu honekin erlazionaturiko gastu guztiek egiten duten zenbateko totala 4329,85 €-koa da, hauei loturiko gehiengoa barne-orduei dagozkielarik (%87,5).

11 ONDORIOAK

Gradu Amaierako Lan honetan ANSYS WORKBENCH programan bi errodamendu mota desberdinen ereduak sortu dira: lau kontaktu puntukoak eta pista alanbrikodunak. Hau horrela, ereduaren ahalmen estatiko axialak kalkulatzeko analisiak egin dira, hau da, bola eta pistaren arteko kontaktuan 4200 MPa agertzeko behar den indar aplikatua. Analisisien emaitzak bildu dira eta zurruntasun diagramak irudikatu dira, kontaktuak aztertzeaz gain. Hurrengo irudian landutako lau ereduaren zurruntasun diagramak irudikatzen dira batera:



IRUDIA 50: Zurruntasun kurbak.

Alde batetik, analisisietatik atera dezakegun lehenengo ondorioa lau kontaktu puntuko errodamendu estandarrek pista alanbrikodun errodamenduek baino zurruntasun handiagoa dutela da.

Beste alde batetik, konformitateari dagokionez, lau kontaktu puntuko errodamendu estandarretan behatzen da nola konformitatea txikituz gero, haren zurruntasuna txikiagotuko den. Errodamendu alanbrikoetan zurruntasuna antzerakoa da bi konformitateentzat; hala ere, arestian ikusi da nola $s=0.943$ konformitatearekin diseinatutako ereduaren berehalako trunkaketa bat ematen dela

(ahalmen estatikoaren %28rako trunkaketa osoa ematen da) eta ondorioz lorturiko emaitzen balioa eztabaidagarria dela. Beraz, ondorio nagusia konformitateari dagokionez lau kontaktu puntukoek balio handiagoekin jarduten dutela da.

Aurreko puntutik lortzen den beste ondorio bat hurrengoa da: pista alanbrikodun errodamenduek konformitate baxuak behar dituzte funtzionamendu zuzena ziurtatzeko. Horren arrazoia da, bola eta alanbreak oso konformeak badira, indar bertikal bat aplikatzean kontaktua alanbreko ertzetara erraz hedatuko dela, trunkaketa emanez.

Ahalmen estatiko axialen balioei dagokionez, hurrengo taulan lortutako emaitzak biltzen dira:

Errodamendu mota	Konformitatea	Balio teorikoa (kN) (1)	Balio teoriko moldatua (kN) (2)	Lortutako balioa (sektoriala, N)	Lortutako balioa (totala, kN)	Errorea (1)	Errorea (2)
Lau kontaktu puntu	0.943	1054	1213,1	7847,9	1287,06	22,11%	6,10%
Lau kontaktu puntu	0.87	621	674,24	4364,3	715,75	15,26%	6,16%
Alanbrikoa	0.943	1054	1213,1	2874	471,34	55,28%	61,15%
Alanbrikoa	0.87	621	674,24	3672,1	602,22	3,02%	10,68%

TAULA 18: Ahalmen estatikoen konparaketa-taula.

Alde batetik, ikus daiteke ISO normaren txosten teknikoa [2] eta Daidiéren formulazioaren [3] arabera lorturiko balio teorikoak gehiago aldentzen direla soluziotik Aguirrebeitia *et al.* [18] arabera lortutako balio teoriko moldatuak baino, lau kontaktu puntuko errodamenduen kasuan (%22,11 eta %15,26 erroreak). Errodamendu alanbrikoen kasuan, ordea, balio teoriko hauek gehiago hurbiltzen dira soluzioetara balio teoriko moldatuak baino. Are eta gehiago, 0.87 konformitateko kasuan errorea %3 ingurukoa da (guztietan baxuena). Beraz, [2] eta [3]ren arabera lortutako ahalmen estatiko axialak errodamendu alanbrikoen kasuan aplikagarriak dira, beti ere diseinuko konformitatea erabiliz gero.

Bestetik, ikusten den bezala, 0.943 konformitateko errodamendu alanbrikoan errore altuak ematen dira. Horren arrazoia, lehen aipatu den bezala, trunkaketa azkar ematearena da, zeinek presio oso altuak eragiten dituen.

12 ERREFERENTZIAK

- [1] International Organization for Standardization, ISO 76:2006. Roller Bearings -- Static Load Ratings, Geneva, 2006.
- [2] International Organization for Standardization, ISO Technical Report 10657:1991. Explanatory notes on ISO 76, Geneva, 1991.
- [3] A. Daidié, Z. Chaib y A. Ghosn, «3D simplified Finite Elements Analysis of Load and Contact Angle in a Slewing Ball Bearing,» *Journal of Mechanical Design*, vol. 130, 2008.
- [4] J. Aguirrebeitia, R. Avilés, I. Fernández de Bustos y M. Abasolo, «Calculation of the general static load-carrying capacity for the design of four contact point slewing bearings,» *Journal of Mechanical Design*, nº 132, 2010.
- [5] J. Aguirrebeitia, R. Avilés, I. Fernández de Bustos y M. Abasolo, «Theoretical calculation of general static load-carrying capacity for the design and selection of three row roller slewing bearings,» *Mechanism and Machine Theory*, vol. 48, 2011.
- [6] J. Aguirrebeitia, R. Avilés, I. Fernández de Bustos y M. Abasolo, «General static load-carrying capacity for the design and selection of four contact point slewing bearings: Finite element calculations and theoretical model validation,» *Finite Elements in Analysis and Design*, vol. 55, 2012.
- [7] J. Aguirrebeitia, J. Plaza, M. Abasolo y J. Vallejo, «Effect of the preload in the general static load-carrying capacity of four-contact-point slewing bearings for wind turbine generators: theoretical model and finite element calculations,» *Wind Energy*, vol. 17, 2013.
- [8] M. Abasolo, I. Coria, J. Aguirrebeitia y J. Plaza, «New selection curves for four contact point slewing bearings,» *Journal of Mechanical Design*, vol. 230, 2016.
- [9] J. Aguirrebeitia, M. Abasolo, J. Plaza y I. Heras, «FEM model for friction moment calculations in ball-raceway contacts for applications in four contact point slewing bearings,» 2015.
- [10] J. Aguirrebeitia, M. Abasolo y I. Heras, «Friction torque in four contact point slewing bearings: Effect of manufacturing errors and ring stiffness,» *Mechanism and Machine Theory*, vol. 112, 2017.
- [11] A. Leblanc y D. Nelias , «Ball motion and sliding friction in a four-contact-point ball bearing,» *Journal of Tribology*, vol. 129, 2007.
- [12] J. Aguirrebeitia, M. Abasolo y I. Heras, «Friction torque in four-point contact slewing bearings: Applicability and limitations of current analytical formulations,» *Tribology International*, vol. 115, 2017.
- [13] X. Shan, T. Xie y W. Chen, «A new method for determining the preload in a wire race ball bearing,» *Tribology International*, vol. 40, 2006.

-
- [14] H. R. Hertz, «Über die berührung fester elastischer Körper,» *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, vol. 92, 1881.
- [15] Y. Ruixia y Z. Xiangyang, «Optimization Design of a Wire Race Ball Bearing for Rotating Platform Based on MDO,» 2014.
- [16] D. Gunia y T. Smolnicki, «The Influence of the Geometrical Parameters for Stress Distribution in Wire Raceway Slewing Bearing,» *Archive of Mechanical Engineering*, vol. 64, 2017.
- [17] I. Heras, Four-point contact slewing bearings for wind turbines: advances in structural modelling and friction torque calculation, Bilbao: Universidad del País Vasco, 2018.
- [18] J. Aguirrebeitia, J. Plaza, M. Abasolo y J. Vallejo, «General static load-carrying capacity of four-contact-point slewing bearings for wind turbine generator actuation systems,» *Wind Energy*, vol. 16, 2013.
- [19] «Franke GmbH,» [En línea]. Available: franke-gmbh.com.