

INDUSTRIA TEKNOLOGIAREN
INGENIARITZAKO GRADUA
GRADU AMAIERAKO LANA

***DISKO BATEN ANALISI MODALA
ANSYS ETA BK CONNECT-EN ARTEKO
KONEXIOAREN BIDEZ***

Ikaslea: Jimeno Muñoz, Ibai

Zuzendaria: Albizuri Irigoyen, Joseba

Ikasturtea: 2018-2019

Data: Bilbon, 2019ko ekainaren 27an.

LABURPENA

Dokumentu honetan balazta baten diskoaren analisi modal teorikoa eta esperimentalak konparatzen dira. Analisi teorikoa elementu finituen metodoa erabiliz egin da ANSYS softwareari esker. Korrelazioa egiteko, berriz, BK Connect programa baliatu da, zeinetan aurretiaz egindako analisi esperimentaleko emaitzak dauden. Hortaz, ANSYS eta BK Connect-en arteko konexio hori ahalbidetzeko datu teoriko guztiak formatu unibertsalean idazten dituen programa bat garatu zen Fortran programazio lengoaiari. Honi esker, emaitza teorikoak BK Connect-ek ireki dezakeen zenbait fitxategi sortu dira analisi esperimentalarekin lortutakoekin konparatu direnak. Izan ere, analisi esperimentaleko emaitzak zuzenak diren balioztatzeko Modal Assurance Criterion (MAC) deritzon korrelazio metodoa erabili da eta emaitzak grafikoki ere adierazi dira.

HITZ GAKOAK

Forma modala, maiztasun naturala, korrelazioa, EFM, motelgarritasuna, dezimatzea.

RESUMEN

En este documento se ha llevado a cabo la comparación teórica y experimental del análisis modal del disco de un freno. Para ello, haciendo uso del software ANSYS se ha hecho el análisis teórico utilizando el método de elementos finitos. Dicha correlación se ha llevado a cabo mediante el programa BK Connect, en el cual está guardado el análisis experimental previamente realizado. Por consiguiente, para posibilitar la conexión entre ambos, se ha desarrollado un programa mediante el lenguaje Fortran, el cual transforma los datos teóricos en formato universal. Así, se han creado varios archivos que pueden ser abiertos por BK Connect y que se han comparado con los datos experimentales. De hecho, para la validación de los datos experimentales se han comparado los datos mediante el llamado Modal Assurance Criterion (MAC).

PALABRAS CLAVE

Forma modal, frecuencia natural, correlación, MEF, amortiguamiento, decimar.

ABSTRAKT

In this document a comparison between the experimental and theoretical modal analysis of a disc of a brake is carried out. In order to do the theoretical analysis, the Finite Element Method have been used thanks to the software ANSYS. On the other hand, the program BK Connect has been used to make the correlation where the results obtained from experimental modal analysis are saved. Therefore, to make the connection between those two programs possible, a new program has been developed with Fortran, which creates some files with universal format. These files can be opened by BK Connect, so that the comparison with the experimental analysis can be done. In fact, using the Modal Assurance Criterion (MAC) the correlation has been made and the results have been represented in a graphic.

KEYWORDS

Mode shape, Natural frequency, correlation, FEM, damping, decimate.

AURKIBIDE OROKORRA

AURKIBIDE OROKORRA.....	3
I- TAULEN ZERRENDA.....	5
II- IRUDIEN ZERRENDA.....	6
III- AKRONIMOEN ZERRENDA.....	8
1. MEMORIA.....	9
1.1. Sarrera.....	9
1.2. Testuingurua.....	9
1.3. Lanaren helburuak eta irismena.....	12
1.4. Lanak dakartzan onurak.....	13
1.5. Artearen egoera.....	14
1.5.1. Analisi esperimentalak.....	15
1.5.2. Analisi teorikoa.....	17
1.5.3. Universal File Format (UFF).....	18
1.6. Aukeren analisia eta irtenbidearen aukeraketa.....	19
2. METODOLOGIA.....	22
2.1. Analisi teorikoa ANSYS erabiliz.....	22
2.1.1. Preprozesatzailea.....	22
2.1.2. Prozesatzailea.....	25
2.1.3. Postprozesatzailea.....	30
2.2. Datuen esportazioa.....	31
2.2.1. Maiztasun naturalak.....	31
2.2.2. Nodoen desplazamenduak.....	32
2.2.3. Sarearen informazioa.....	34
2.3. Formatu unibertsaleko fitxategien lorpena.....	36

2.3.1.	<i>Fortran</i> programazio lengoia	36
2.3.2.	UFF lortzeko kodigoa.....	36
2.3.3.	Programaren exekuzioa eta funtzionamendua.....	39
2.3.4.	<i>Decimation</i> -a.....	41
2.4	Analisi esperimentalta	44
2.5	Korrelazioa.....	46
2.5.1	Oinarri teorikoak: Modal Assurance Criterion	46
2.5.2	AutoMAC-a.....	49
2.5.3	MAC-a.....	49
2.6	Emaitzen deskribapena.....	49
2.6.1	AutoMAC-aren emaitzak.....	50
2.6.2	MAC-aren emaitzak	54
2.7	Planifikazioa.....	56
	A1- Hasierako prestakuntzak	57
	A2- Analisi teorikoa	57
	A3- Programa idaztea.....	57
	A4- Analisi esperimentaleko datuen prestaketa.....	57
	A5- Korrelazioa	58
	A6- Proiektua idaztea.....	58
3.	ALDERDI EKONOMIKOAK.....	60
4.	ONDORIOAK.....	62
5.	BIBLIOGRAFIA.....	64
I.	ERANSKINA: programaren kodea.....	65
II.	ERANSKINA: bibrazio moduak.....	80
III.	ERANSKINA: planifikazioa.....	88

I- TAULEN ZERRENDA

1. Taula - Alternatiben aukeraketa matrizea	20
2. Taula - Maiztasun naturalak	32
3. Taula - Desplazamendu direkzionalak esportatzeko era	34
4. Taula - Maiztasun teorikoak eta esperimentalen konparazioa	55
5. Taula – Barne-orduak	60
6. Taula - Amortizazioak	61
7. Taula - Gastuak	61
8. Taula – Aurrekontuaren laburpena	61
9. Taula - Planifikazioa, atazen ezaugarriak	88

II- IRUDIEN ZERRENDA

1. Irudia - Disko-balazta baten funtzionamenduaren eskema [2].....	10
2. Irudia - Diseinu prozesuaren fluxu diagrama [5] (irudi moldatua).....	13
3. Irudia – Alternatiben analisirako jarraibidea	19
4. Irudia - Jarraitutako metodologia.....	22
5. Irudia - Analisi motaren aukeraketa.....	23
6. Irudia - Geometriaren sarea.....	25
7. Irudia - Maiztasunen esportazioa.....	31
8. Irudia - Desplazamendu direkzionalen aukeraketa.....	33
9. Irudia - Desplazamenduak gordetzeko modua.....	33
10. Irudia - Finite Element Modeleren aukeraketa	35
11. Irudia - FEModeleren sarearen informazioa esportatzeko modua.....	35
12. Irudia - 15 dataset-aren adibidea	37
13. Irudia - 82 dataset-aren adibidea	37
14. Irudia - 55 dataset-aren adibidea	38
15. Irudia - Errore mezuaren adibidea	40
16. Irudia - BK Connect bidezko dezimatzea	42
17. Irudia - Dezimatzea egiteko idatzi beharreko fitxategiaren adibidea	43
18. Irudia - Dezimatutako nodoen kokapen hurbildua.....	44
19. Irudia - Analisi esperimentalaren entsegua.....	45
20. Irudia - Diskoaren kitzikatze puntuak	45
21. Irudia - AutoMAC-aren emaitzak eredu osoarentzat (2D).....	50
22. Irudia - AutoMAC-aren emaitzak eredu osoarentzat (3D).....	51
23. Irudia – Eredu sinplifikatuaren AutoMAC-a (2D).....	52
24. Irudia - Eredu sinplifikatuaren AutoMAC-a (3D)	52
25. Irudia – Eredu esperimentalaren AutoMAC-a (2D).....	53

26. Irudia - Eredu esperimentalaren AutoMAC-a (3D).....	53
27. Irudia – MAC-aren emaitzak (2D).....	54
28. Irudia - MAC-aren emaitzak (3D).....	54
29. Irudia – Bibrazio moduen baliokidetzeta	56
30. Irudia - Gantt diagrama.....	59
31. Irudia – Diskoaren forma modala 351,09 Hz-etan.....	80
32. Irudia - Diskoaren forma modala 351,31 Hz-etan.....	81
33. Irudia - Diskoaren forma modala 536,25 Hz-etan.....	81
34. Irudia - Diskoaren forma modala 869,96 Hz-etan.....	82
35. Irudia - Diskoaren forma modala 870,04 Hz-etan.....	82
36. Irudia - Diskoaren forma modala 1206,5 Hz-etan.....	83
37. Irudia - Diskoaren forma modala 1206,6 Hz-etan.....	83
38. Irudia - Diskoaren forma modala 1592,6 Hz-etan.....	84
39. Irudia - Diskoaren forma modala 1592,8 Hz-etan.....	84
40. Irudia - Diskoaren forma modala 2236,7 Hz-etan.....	85
41. Irudia - Diskoaren forma modala 2307,8 Hz-etan.....	85
42. Irudia - Diskoaren forma modala 2307,9 Hz-etan.....	86
43. Irudia - Diskoaren forma modala 2488,8 Hz-etan.....	86
44. Irudia - Diskoaren forma modala 2535,6 Hz-etan.....	87
45. Irudia - Diskoaren forma modala 2869,7 Hz-etan.....	87

III- AKRONIMOEN ZERRENDA

AME	Analisi Modal Esperimentalak
AMO	Analisi Modal Operazionalak
CAD	Computer Aided Design
CAE	Computer Aided Engineering
CAT	Computer Aided Test
CFD	Computational Fluid Dynamics
EFM	Elementu Finituetako Metodo
EF	Elementu Finituak
FRF	Frequency Response Function
FFT	Fast Fourier Transform
GrAL	Gradu Amaierako Lana
MAC	Modal Assurance Criterion
MSF	Modal Scale Factor
UFF	Universal File Format

1. MEMORIA

1.1. Sarrera

Dokumentu honetan Euskal Herriko Unibertsitateko Gradu Amaierako Lan gisa egindako disko- balazta baten analisi modal teorikoaren eta analisi modal experimentalaren arteko korrelazioa egin da. Gaur egun, bi analisiak egiteko baliabideak ugariak diren arren, euren arteko konparazioa egiteko metodo bat garatu da formatu unibertsaleko fitxategien erabileran oinarritua.

Lehenik eta behin, lana testuinguruan kokatzeko, balazta mota hauen ezaugarriak azaldu egingo dira, analisi modala egitearen beharra azaltzeko erabiliko direnak. Ondoren, proiektu honen helburuak eta irismena definituko dira eta, horrekin batera, gaur egungo egoeraren azterketa egingo da, artearen egoera deritzona.

Lanean erabilitako metodologiari dagokionez, hainbat ataletan egituratu egin da. Atal horietako bakoitzean, proiektuaren fase anitzetan egin beharrekoen deskribapena eta erabilitako ekipoak edo prozedurak azaldu dira. Esan bezala, bertan diskoaren bibrazio moduak eta maiztasun naturalak lortu eta esperimentalki lortutakoekin konparatu dira. Era berean, lortutako emaitzen deskribapena ere egin da.

Metodologiarekin batera, proiektuaren planifikazioa azaldu egingo da, zeinetan fase bakoitzaren epeak, ezaugarriak eta iraupena zehaztuko diren. Hau osatzeko, Gantt-en diagrama ere erabili da.

Bestalde, proiektuaren balantze ekonomikoa ere garatu da. Bertan, proiektuaren gastu eta amortizazioak kontuan izanik, lan honen aurrekontua egin da.

Azkenik, berriz, Gradu Amaierako Lan honetatik ateratako ondorioak azalduko dira.

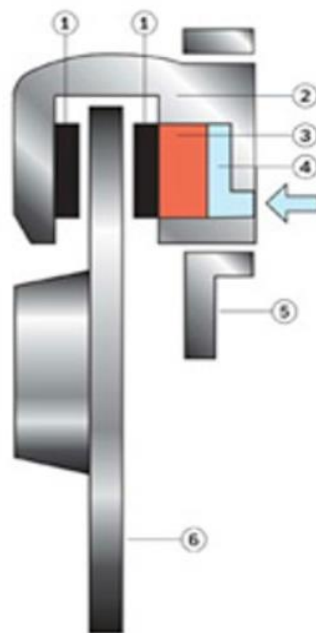
1.2 Testuingurua

Ibilgailu guztiek dute balaztatzeko sistema baten beharra. Hortaz, ibilgailuak garatu ahala, eta batez ere, hauen abiadura handitzen joan den heinean, galgatzeko metodoak hobetu behar izan dira. Automobilgintza, esate baterako, XIX. mendearen amaieran sortu zen eta erabilitako lehen balaztak palanka bat baino ez ziren gurpilen kontra egurrezko bloke bat bultzatzen zituztenak. 1900. urtearen hasieran, berriz, danbor- eta disko- balaztak asmatu zuten Louis Renaultek eta Frederick Lanchesterrek, hurrenez

hurren. Hauek oso erabiliak dira gaur egun, baina elektrikoak eta hagin- balaztak ere maiz erabiltzen dira.

Disko- balaztek frenatze distantziak hobetu egiten dituzte eta hezetasun baldintzetan danbor- balaztak baino egokiagoak dira. Hauek dira, hain zuzen, lan honetan ikertuko direnak.

Disko- balazten funtzionamendua [1] disko eta pastillen arteko marruskaduran oinarritzen da. Eragite sistema (pastillak diskoaren kontra bultzarazten duena) hidraulikoa izan ohi da. Hau da, 1.irudian ikus daitekeen moduan, galgari eragiten zaionean likido hidrauliko bat (4) arduratzen da pastillen (1) gainean presioa eragiteaz diskoaren kontra (6) marruskadura indar bat sor dadin. Indar hau pistoi baten bitartez (3) transmititu egiten da. Horrela, marruskadura hori dela eta, diskoaren energia zinetikoa bero gisa disipatu egiten da diskoaren errotazioa murriztuz.



1. Irudia - Disko-balazta baten funtzionamenduaren eskema [2]

Hauen hutsegitearen arrazoiak ugariak izan daitezke eta hori saihesteko diseinu egokia egin beharra dago. Kontuan hartu beharra dago balaztatze prozesuan zehar energia handia sortu egiten dela eta, ondorioz, diskoa eta danborra berotu egiten dira. Tenperatura igoera honen ondorioz balaztetan zenbait fenomeno termiko agertzen dira maiz:

- Marruskadura koefizientea aldatu dezakeen kristalen berregituraketa.
- Higidura desegokia.
- Urradurak.
- Difusioa pastillen eta diskoaren materialen artean, geometria ez uniformeak sortu dezaketenak.

Bestalde, akats hauen ondorio zuzenak dira balaztetan agertzen diren bibrazioak. Hiru bibrazio mota nagusi bereiz daitezke:

- Stick-Slip: koefiziente estatiko eta dinamikoaren arteko diferentziak sortutako fenomenoak. [3]
- Judder: diskoak dituen akatsen ondorioz (lodiera aldaketak, adibidez) ematen diren bibrazioak. [4]
- Squeal: maiztasun handitan ematen da eta soinua sortzen du balaztatze prozesuan.

Lan honetan, hain zuzen, diskoetan ematen diren bibrazio hauek aztertu egingo dira. Esan bezala, arazoak ugariak izan daitezke: alde batetik, diskoa edo abatzaren okertzeak sortu dezakete; bestalde, tenperatura altuek diskoan deformazioak eragin dezakete eta, ondorioz, diskoaren eta pastillaren arteko kontaktuan sor daitezke kontaktuen irregulartasunak direla eta.

Hortaz, marruskadura ere bibrazio iturri bat izan daiteke. Kasu hau da, hain zuzen ere, balazta sistemetan gertatzen dena. Diskoaren eta balazta-pastillen arteko marruskadurak sortzen dituen bibrazioak ibilgailuaren esekiduran anplifika daitezke eta autoetan, esate baterako, oso ohikoa da bolantean edota pedaletan antzematea.

Esandako guztia kontuan hartuta, berebiziko garrantzia du diskoaren diseinuan analisi dinamikoa egitea. Izan ere, bibrazioen ondorioz sor daitezkeen tentsio eta deformazioen aldaketek diskoren funtzionamenduan zelan eragingo duten aztertu behar da. Horretarako, gaur egun EFM (Elementu Finituen Metodoa) erabiltzen da diskoaren portaera aurreikusteko eta sistemaren maiztasun naturalak eta bibrazio moduak kalkulatzeko.

Metodo honek, orokorrean, hurbilpen ona egiten duen arren, askotan analisi esperimentalen beharra ere egoten da. Gainera, bi emaitzen arteko korrelazioa egitea

ahalbidetzen duten zenbait metodo existitzen dira, analisi esperimentalak balioztatzeko erabil daitezkeenak.

1.3 Lanaren helburuak eta irismena

GrAL honen helburua analisi modal esperimentalaren eta teorikoaren arteko korrelazioa egitea da formatu unibertsaleko fitxategiak erabiliz.

Helburu hau lortzeko, proiektua hiru fasetan egituratuko da:

Alde batetik, diskoaren analisi teorikoa egingo da EFM-a erabiliz. Atal honetan, diskoaren maiztasun naturalak eta bibrazio moduak atera beharko dira aurretiaz egindako diskoaren CAD (Computer Aided Design) eredu bat erabiliz. Beraz, CAD honen diseinua ez da GrAL-aren barne egongo. Geometria honen diskretizazioa eta dezimatzea egitea, ordea, proiektu honen atal garrantzitsua izango da.

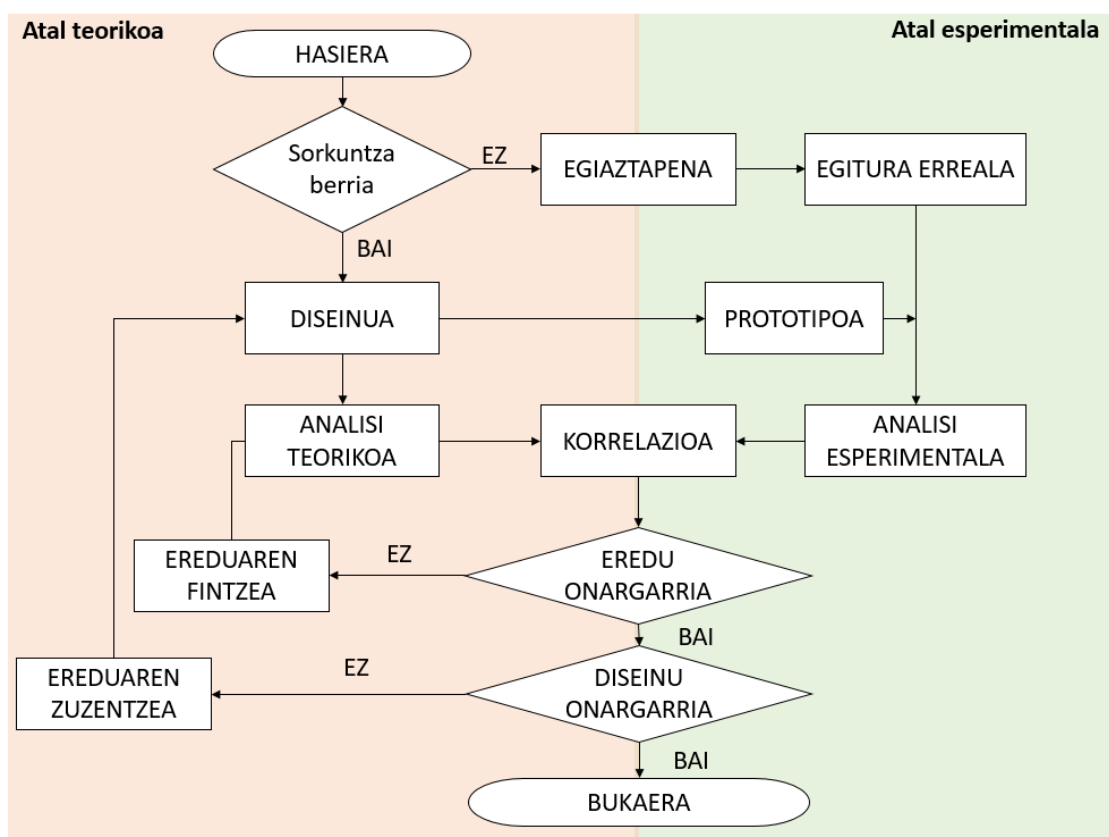
Beste alde batetik, aurreko ataleko analisia Fortran programazio lengoaiari programa bat sortuko da esportatutako datu teorikoak Formatu Unibertsalera eraldatuko dituenak. Beraz, programa honen kodigoa idaztea eta konpilatzea izango da bigarren fase honetan burutu beharrekoa. Programa honek, formatu aldaketa egiteaz gain, geometria automatikoki dezimatzeko aukera ahalbidetu beharko du.

Azkenik, korrelazioa eta emaitzen analisia egin beharko da. Korrelazioa egiteko analisi esperimentaleko datuak dituzten fitxategiak jasoko dira BK Connect programarekin zuzenean ireki daitezkeenak. Hau da, nahiz eta proiektu honek ez duen bere barnean analisi esperimentalaren prozesua hartuko, datu horiek irakurri eta interpretatu egin beharko dira aipatutako softwarea erabiliz. Lortutako emaitzei dagokionez, MAC (Modal Assurance Criterion) irizpidearen arabera egindako korrelazioari esker, analisi esperimentalaren balioztatzea egingo da. Horrela, bi analisiak bat datozen egiaztatuko da eta euren arteko ezberdintasunen arrazoiak adieraziko dira.

1.4 Lanak dakartzan onurak

Lan honetan garatuko den jakintza eremua diseinu mekanikoaren barruan kokatuko beharko litzateke. Halaber, lanak arlo honetan ekar ditzakeen onurak aztertzen hasi aurretik diseinu mekanikoa zer den ezagutu beharra dago.

Pieza mekaniko baten diseinuan arazo bati irtenbidea bilatu behar zaio ahalik eta erarik eraginkorrenean. Hori lortzeko, orokorrean, 2. Irudian agertzen den prozesu iteratiboa burutu egiten da.



2. Irudia - Diseinu prozesuaren fluxu diagrama [5] (irudi moldatua).

Ikus daitezkeen moduan, analisi prozesu honetan bi bide bereiz daitezke: atal teorikoa eta atal esperimentalak. Kontuan hartu beharra dago, eredu matematiko eta errealaren artean ezberdintasunik egotekotan, analisi esperimentaleko emaitzak izango direla aintzat hartuko direnak, neurriak ondo hartuta baldin badaude. Hori dela eta, beharbada, analisi matematikoaren beharra zalantzan jar liteke: zergatik egin analisi teorikoa esperimentalen bidez balioztatu egin behar bada?

Alde batetik, arrazoi ekonomikoak egongo dira: analisi matematikoa merkeagoa da. Izan ere, prozesu hau prototipoaren eraikuntzaren aurretik burutzen den prozesua da eta egin beharreko aldaketak era erraz eta merkean aplikatu dakizkioke. Honen bidez, eredu erreala eta matematikoa bat egin dezaten bilatu behar da. Behin hori lortuta analisi guztiak era teorikoan ebatzen dira prototipoen beharrik gabe. Prototipoez gain, analisi esperimentalek saiakuntza-bankuen, langile gehiagoren eta bestelako tresneriaren (neurketa- tresnak esaterako) beharra eska lezakete, kostuen handipena dakartzatenak.

Hala ere, analisi esperimentala beharrezkoa deneko kasuak ere badaude: helburua analisi dinamikoaren zenbait magnitude lortzea bada edota motelgarritasuna kalkulatzeko, esate baterako.

Arestian aipatu den bezala, proiektu honek analisi teoriko eta esperimentalaren arteko korrelazioa aurrera eramateko bide bat garatzea du helburu. Honi esker, analisi teorikoaren balioztatzea egin daiteke, hau da, analisi teorikoaren fidagarritasun maila aztertu daiteke. Horrela, analisi esperimentalen kopurua minimizatu daiteke, kostuen murrizpena ekarriko duelarik.

Bestalde, geroago sakonago azalduko den moduan, lan honetan sortutako programak etorkizunean beste edozein geometriarekin berrerabili ahal izango da, edozein sistema mekanikoaren korrelazioa ahalbidetuz. Honi esker, ANSYS eta BK Connect-en arteko konexioa epe luzerako bermatuta geratzen da, nahi bezain beste korrelazio egiteko aukera ezarri.

Bestalde, alderdi teknikoari dagokionez, proiektu hau egiteari esker BK Connect eta ANSYS erabiltzeko gaitasunak garatzeaz gain, analisi modalaren inguruko jakintza zabaldu egin da.

1.5 Artearen egoera

Ezaguna da Tacoma Narrows zubiaren kasua. 1940.urtean eraitsi zen diseinatuta zegoen karga egoera baino askoz txikiagoren pean. Ezbeharra erresonantzia fenomenoaren ondorioz gertatu zen. Hori dela eta, zubiak gai zena baino karga egoera latzago bat pairatu zuen, zeinak hutsegitea sortu zuen. Hain oihartzun handia izan zuen non, geroztik, ingeniariak bibrazioak aintzat hartzen hasi baitziren euren diseinuen kalkuluetan.

1970. urte inguruan bibrazioen ondoriozko kalteak aztertzen hasi ziren arlo aeroespazialean, baina gainerako esparruetara berehala hedatu egin zen. Azken 30 urteotan Bibrazioen Teoriari dagozkion ikerketak izugarri handitu egin dira. Honek ingeniarietza mekanikoko eremu ugarietan izan du eragina: makinaren diseinuetan, turbinetan, egituretan...

Gaur egun, Bibrazioen Analisi Esperimentalak eta Elementu Finituetako Metodoak (EFM) oso erabiliak dira sistema mekanikoen garapenerako. Horiek dira, hain zuzen, lan honetan erabili eta konparatuko direnak.

Analisi modala, propietate dinamikoak (motelgarritasuna, maiztasun naturalak, bibrazio moduak, besteak beste) aztertzeko erabilitako teknika bat da. Sistema mekaniko bat kitzikatze baten aurrean sortzen duen erantzuna bibrazio moduen konbinazio lineal gisa adierazi daiteke eta fenomeno honetan oinarritzen da analisi hau.

Sistema kitzikatu egiten denean, sistema mekanikoa modu zehatz batean bibratu egingo du maiztasun natural deritzon maiztasun jakin batean. Modu bakoitzak forma edo itxura bat izango du. Errealitatean, sistema guztiak bibrazio modu ugari dituzte eta analisi honen helburua modu horien forma zehaztea izango da.

Kontuan hartu beharra dago, batzuetan ezinezkoa izaten dela kitzikatzea neurtzea eta ondorioz parametro hauek kitzikatze ezezagun baten aurrean sortutako erantzuna neurtuz lortzen dira. Kasu hauetan, sarrera aldagaia prozesu estokastikoa deritzonarekin ordezkatu egiten da. Metodo hauek Analisi Modal Operazionala (AMO) izena hartzen dute [6]. Gaur egun software ugari existitzen dira analisi hauek errazten dituztenak, hala nola, ME'scopeVES, Brüel&Kjaer eta LMS Test.Lab.

1.5.1 Analisi esperimentalak

Analisi modal esperimentalak aldaketa iraultzaile bat jasan izan zuen 1970eko hamarkadan, Fourierren Transformatu Azkarra ("Fast Fourier Transform") ordenagailuetan implementatzen hasi zenean. Gaur egun, analisi esperimentalerako erabiltzen diren tresna gehienetan kalkulu metodo hau darabilte erantzunaren lorpenerako.

Analisi modal esperimentalak FRF-aren (Frequency Response Function) neurketan oinarritzen da, zeinak sarrera eta irteera aldagaien arteko erlazioak zehazten duen. Analisi esperimentalak gauzatzeko arrazoiak ugariak izan daitezke:

- Mantentze prediktiboa: makinaren zarata edo bibrazio maiztasuna antzematean makina horretan hutsegitea sortuko duen elementua aurkitu daiteke, hutsegitea gertatu aurretik.
- Emaizten korrelazioa: emaitza matematiko eta enpirikoak konparatzeko.
- Bibrazioen isolamendua eta kontrola.
- Parametroen eskuraketa: sistemaren parametro mekanikoak eskuratzeko erabili daiteke (masa, zurruntasuna eta motelgarritasuna).
- Kargen erregistroa: bibrazio aleatorioak ebazteko kargen erregistroa egin beharko da aurretiaz.

Geroago azalduko den moduan, analisi mota honetan, beharrezkoa da aztertuko den sistema mekanikoa kitzikatzea erantzuna neurtu ahal izateko. Lortutako maiztasun espektroaren gailurrak sistemaren askatasun graduak bezain beste izango dira. Gailur horiek, beraz, maiztasun naturalen adierazleak dira. Bestalde, motelgarritasunaren kalkulua oraindik ziurgabetasun handiz egindako kalkulua da. Hala ere, analisi honen kontzeptu teorikoak aurrerago sakonki azaldu egingo dira.

Gaur egun, entsegu mota hauek egiteko modu ugari daude. Kitzikatze moduei dagokienez, bi talde nagusitan banatu ditzakegu: egiturarekin kontaktua mantentzen dutenak eta kontaktua entsegu osoan zehar mantentzen ez dutenak. Lehengo motakoei esker, kitzikatze jarraia (sinusoidala...) edo iragankorra (pultsua) sor daiteke. Azkenekoek, berriz, kontaktua denbora tarte batez mantentzen dutenez inpaktua eta kitzikatze estatikoa bezalako sarrerak sortu dezakete soilik. Hona hemen hiru nagusienak:

- Inpaktu-kitzikatzea: kontrolatu ezin diren maiztasunak sortzen dira indar bat denbora tarte minimoan aplikatuz. Kitzikatze mailua zenbat eta bigunagoa izan orduan eta maiztasun- tarte txikiagoa kitzikatuko dira. Hala ere, kitzikatze honek hainbat bibrazio modu eszitzatu dezake, makurdura zein bihurdurazkoak.
- Kitzikatze sinusoidala: kitzikatzea maiztasuna kontrolatu egiten da egiten da.
- Ausazko kitzikatzea: indarra banaketa Gaussiarradun ausazko sinalea izan ohi da.

Kitzikatze sistemak, berriz, hiru taldeetan sailkatu ditzakegu: mekanikoak, elektromagnetikoak eta elektrohidraulikoak.

Eszizatzaile mekanikoen orekatu gabeko masa biratzaileak erabiltzen dituzte maiztasun aldakorren indarrak sortzeko.

Elektromagnetikoen, ordea, kontakturik gabeko kitzikatzeak ahalbidetzen dute. Hala ere, indarren kontrolean sortzen duten arazoak direla eta ez dira oso erabiliak. Aitzitik, ohikoagoa izaten da eremu magnetiko aldakor batean kokatutako harilen erabilera egiturari lotuta, zeinetan maiztasun eta anplitudea independenteki kontrolatzen diren.

Kitzikatze sistema elektrohidraulikoei dagokienez, aurrekoek baino funtzionamendu konplexuagoa eta garestiagoa daukate. Hauen abantaila nagusia karga estatikoak eta dinamikoak aldi berean aplikatu daitezkeela da. Dena dela, ahalbidetzen duten maiztasun tartea mugatua izaten da.

1.5.2 Analisi teorikoa

Gaur egun, analisi modal teorikoa egiteko, aurretik xedatutako urrats batzuk jarraitu ohi dira. Lehendabizi, *Eredu Espaziala* deritzona definitu behar da, zeinetan, sistemaren ezaugarri fisikoak adierazten diren. Ondoren, eredu horren analisi modala egiten da bibrazio parametroak (moduak, motelgarritasuna eta maiztasun naturalak) ezagutzeko. Pausu honetan, *Eredu Modala* lortu egiten da. Azkenik, ordea, kanpo eragileen aurreko erantzuna aztertu egiten da *Erantzun Eredua* lortuz. [7]

1.5.2.1 EFM Softwareak

Askotan sistema mekaniko baten portaera aztertzeke eredu sinplifikatu baten beharra egoten da. Elementu finituen metodoa interpolazioaz baliatuz sistema jarraiak ebazten dituen teknika bat da. Metodo honen oinarria sistema mekaniko baten diskretizazioa da elementu txikiagoz osatutako eredu bat lortzeko. Argi dago eredu hori errealitateari zenbat eta gehiago hurbildu, lortutako emaitzak orduan eta zehatzagoak izango direla, baina analisi kostua handiagoa izango da. Hala ere, azken urteotan kalkulu tresnak garatuz joan dira eta ordenagailuen agerpena, esaterako, aurrerapauso handia suposatzen duen, aldagai kopuru handiagoak denbora txikiagoan errorerik gabe kalkulatzeko ahalbidetu baitzuen.

EFM-a egituren analisi prozedura baten ondorioz sortu zen USA-n 50.hamarkadan. Hasiera batean abiazio egituretarako garatu zen arren, berehala hedatu egin zen ingeniartzako beste sektoreetara. Izenari dagokionez, EFM-a ez zen 1960.urtera arte erabili, eta geroztik egindako aurrerapenek teknologia fidagarria bihurtu izan dute. [8]

Gaur egun, EFM-aren aplikazio eremua oso handia da eta besteak beste, jariakinen mekanika, solidoen mekanika, eremu magnetiko eta elektrikoak bezalako esparruetan erabiltzen da.

Ugariak dira gaur egun erabiltzen diren EFM softwareak: ANSYS, Abaqus, Nastran, Cosmos... Programa horiek guztiak antzekoak diren arren, aplikazio eremuaren arabera batzuk erabilgarriagoak izan ohi dira beste batzuk baino.

Proiektu honetan ANSYS izan da erabilitako EFM programa. ANSYS 1970. urtean sortu zen eta bere baitan arlo ugari buruzko simulazioak egiteko aukera izateaz gain, diseinu erremintak ere garatu izan ditu. Egindako analisi modala Workbench deritzon plataforman burutu izan da.

1.5.3 Universal File Format (UFF)

Formatu Unibertsaleko fitxategiak *Structural Dynamics Research Corporation*-ek (SDRC) sortu zuten 1970. hamarkadaren hasieran. Hauen arabera, [9] fitxategi hauen helburua datuen transferentzia erraztea da CAD (Computer Aided Design) programa eta CAT (Computer Aided Test) programen artean, CAE-a (Computer Aided Engineering) errazteko asmoz.

UFF-ren erabilera oso baliagarria da dinamika esperimenterako (bibrazioak eta akustika) eta bereziki analisi modalaren esparruan.

Formatu hauen funtsa beharrezko datuak dagokion moduan ordenatzean datza. Informazio motaren arabera hainbat datasetetan egituratu beharra dago. Datasetak informazio blokeak baino ez dira -1 zenbakiarekin hasi eta bukatzen direnak. Mota bakoitzaren edukiaren arabera datasetak zenbaki ezberdinekin izendatu egiten dira. Lan honetan 15. eta 82. datasetak erabiliko dira geometria gordetzeko eta 55. dataseta, berriz, bibrazio moduei dagokion informazioa gordetzeko. Dataset hauek aurrerago sakonki azaldu egingo dira.

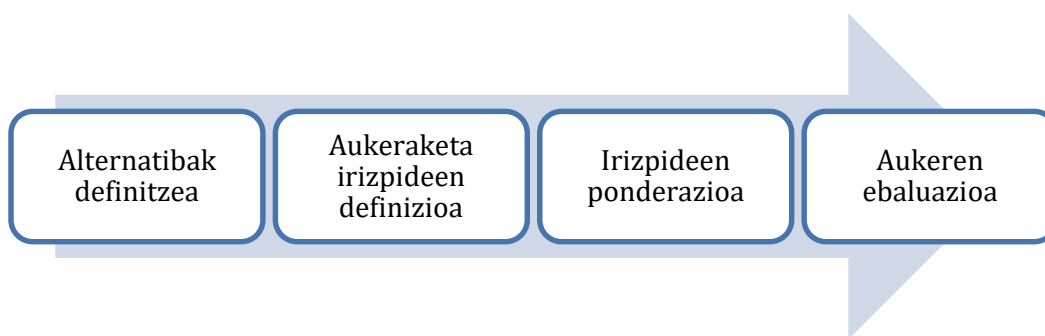
1.6 Aukeren analisisa eta irtenbidearen aukeraketa

Proiektu honekin hasi aurretik zenbait erabaki hartu behar izan dira. Lan honen irismena definitu denean ikusi izan den moduan, hiru bloke nagusitan egituratu da lana, horietariko bakoitzean dagozkion erabakiak hartu behar izan direnak.

Alde batetik, Elementu Finituetako software bat aukeratu behar izan da, kalkulu teorikoak egitea ahalbidetzen duena. Nahiz eta aukerak ugariak diren, erabaki honetarako ez da inolako alternatibaren analisiarik burutu behar izan, lizentzia kontua izan baita aukeraketa mugatutako irizpide bakarra.

Formatu unibertsaleko fitxategiak sortzeko erabili beharreko programazio lengoiaia aukeratzekoan, berriz, aukerak anitzak izateaz gain, bideragarritasuna ere handia zen. Gainera, proiektuaren zatirik garrantzitsuenetarako batean, eta beharbada, luzeena, egindako aukeraketa honek eragina izango du: programaren kodea idaztea. Hori dela eta, programazio lengoiaiarik egokiena aukeratzeko xedearekin, hurrengo alternatibaren analisisa egin da.

Analisi honetan, lehendabiziko zeregina aukera guztiak definitzea da. Ondoren, aukeraketa irizpide horiek ponderatu eta ebaluatu dira bakoitzaren garrantziaren arabera. Horrela, alternatibarik onena aukeratu izan da. (3. Irudia4. Irudia)



3. Irudia – Alternatibaren analisisirako jarraibidea

Programa sortzeko erabili daitezkeen proposatutako programazio lengoiaiak Matlab, C++ eta Fortran izan dira. Hauek ebaluatzeko erabili diren irizpideak eta irizpide bakoitzak proiektuan duen garrantzia zehazten duen koefizientea 1. Taulan adierazi egin dira.

IRIZPIDEAK	LEHENTASUN KOEFIZIENTE A	AUKERAK		
		MATLAB	C++	FORTRAN
Lizentzia	%50	5	0	10
Egokitasun maila	%25	8	8	10
Kalkulu gaitasuna	%15	10	10	10
Aurretiazko ezagutza	%5	7	5	0
Interfazea	%5	10	10	3
TOTALA	%100	6,85	4,25	9,15

1. Taula - Alternatiben aukeraketa matrizea

Garrantzi handieneko irizpidea programa erabiltzeko gaitasuna izango litzateke. Esate baterako, Fortran lengoia (Matlab eta C++ lengoaiak ez bezala) software librea den heinean, ez du inolako arazorik suposatzen. Matlab, ordea, EHU-ko instalazioetan erabilgarria denez, erdiko ponderazio bat jaso izan du erabilera mugatua baita.

Bestalde, UFF fitxategiak sortu ahal izateko erabili beharreko formatuak Fortran lengoian zehaztuta daudenez, gainerakoak baino egokiagoa bihurtzen du erabilera erraztu egiten du eta.

Kalkulu gaitasunari dagokionez, baliteke erabilera zehatz honetarako hiruretako bat gainerakoak baino egokiagoa izatea. Hala ere, kalkulu gaitasunean ezberdintasun handiak egon arren, programak erabiliko duen denboran ez da ezberdintasun handirik sumatuko, programak erabiliko dituen datu guztiak prozesatzeko denbora segundo batzuetakoa baino ez baita izango.

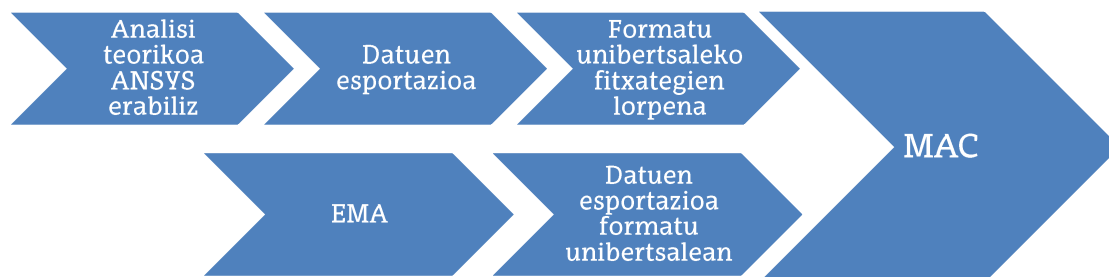
Ikertu diren azken bi irizpideak, proiektuan eragin gutxienekoak, alegia, aurretiazko ezagutza eta softwarearen interfazea izango dira. Alde batetik, programazio lengoaiaren aurretiazko ezagutzak denbora aurrezpen handia suposa dezake. Hala ere, programazioaren oinarrizko printzipioak ezagututa, lengoia berria izateak ez du proiektua garatzeko beharrezko denboran eragin nabarmenik izango eta horregatik koefiziente txikia esleitu zaio. Bestalde, interfazeari dagokionez, Fortranek konpiladore propioa ez duen aldetik, interfazea ere eskasagoa dirudi eta hasiera batean zailtasunak sor ditzakeena. Hori dela eta, atal honetan ere, puntuaziorik baxuena jaso izan du.

Ponderazio hauek guztiak kontuan harturik, ondorioztatu daiteke aztertutako programazio lengoaien artean Fortran dela egokiena.

Gainera, Fortranen sorreratik aplikazio zientifiko eta ingeniari-tza-arloko programazioan oso erabilia izan da. Hori dela eta, elementu finituen analisisian, jariakinen dinamika konputazionalan (“Computational Fluid Dynamics”) eta fisika eta kimika konputazionalan erabiltzen dira.

2. METODOLOGIA

Proiektu hau burutzeko jarraitu den metodologia 4. Irudian laburbiltzen da. Ikus daitekeen moduan, bi bide nagusi bereiz daitezke, analisi teorikoari dagokiona eta analisi esperimentalari dagokiona, alegia. Biak aldi berean burutu daitezke eta bukatutakoan, korrelazioa egin.



4. Irudia - Jarraitutako metodologia

Hurrengo puntuetan fase bakoitza banan-banan azaldu egingo da.

2.1 Analisi teorikoa ANSYS erabiliz

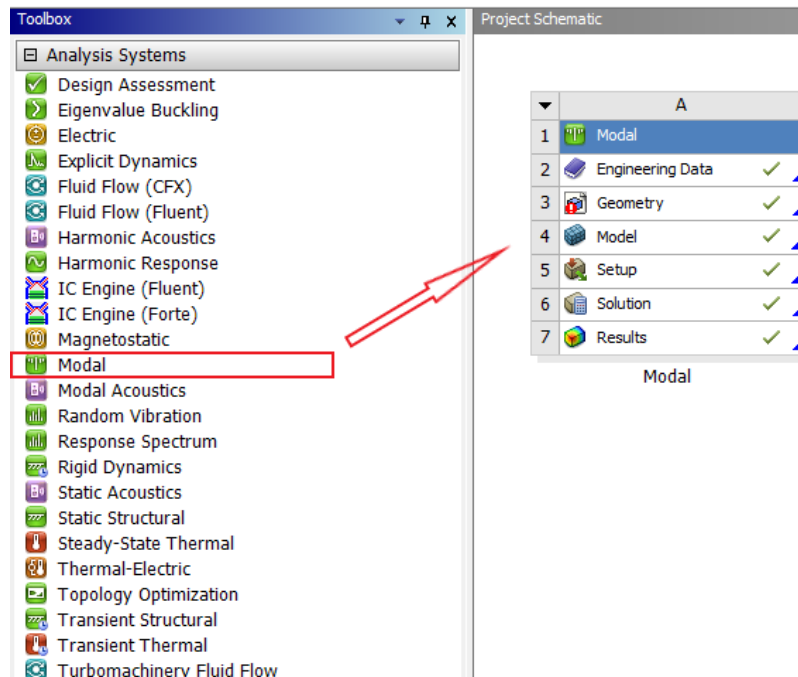
Analisi modal teorikoa aurrera eramateko ANSYS WorkBench-a erabili da. Software honek, Elementu Finituetako software guztien antzera, oinarritzko hiru ataletan egituratzen da: preprozesatzailea, prozesatzailea eta postprozesatzailea.

2.1.1 Preprozesatzailea

Atal honi dagokio, besteak beste, analisi motaren aukeraketa, geometria eta mugalde baldintzen zehaztapena. Hurrengo puntuetan azalduko dira diskoaren analisia egiteko jarraitutako urratsak.

- **Analisi mota:**

5. Irudian agertzen den moduan "Modal" analisi mota aukeratu eta eskumako "Project Schematic" deritzon pantailara eraman da.



5. Irudia - Analisi motaren aukeraketa

Hori egitean proiektuaren eskeman bloke bat agertu da zelula deritzen zenbait lerroez osatuta. Zelula horiek banan-banan betetzeko beharra dago analisia burutu ahal izateko.

- **Materialaren aukeraketa:**

Ibilgailua balaztatzeko, diskoa eta pastillen arteko marruskadurak energia zinetikoa beroan bihurtzen du, abiaduraren murrizketa bat sortuz. Disko horiek beraz, beroa atmosferara ahalik eta azkarren transmititzea lortu behar dute sistemaren tenperatura altuegia bihurtu ez dadin. Hori dela eta, normalean burdinurtu gris nodularrez eta altzairuz fabrikatu ohi dira. Hala ere, karbono matrize batez egindakoak (aeronautikan) edota aluminiozkoak ere egiten dira. Azken hauek, ordea, arinagoak izan arren, beroaren disipazio gaitasuna txikiagoa dute eta gaindimentsionatu egin behar izaten dira.

Ereduaren materiala zehazteko "Engineering Data" delakoan sartu beharra dago. Besterik adierazi ezean, Structural Steel izeneko altzairua dator aukeratuta. Proiektu honetan, lehenetsitako material hau erabili da nahikoa baita diskoaren portaera dinamikoa aztertzeko.

- **Geometriaren zehaztapena**

Geometria zehazteko "Geometry" gainean eskumako botoiarekin klikatuz "Import geometry" aukeratu da. Horrela, aurretiaz egindako diskoaren CAD diseinua ANSYS programarekin irekitzea ahalbidetzen da. Kasu honetan .igs formatuan gordetako geometria erabili izan da.

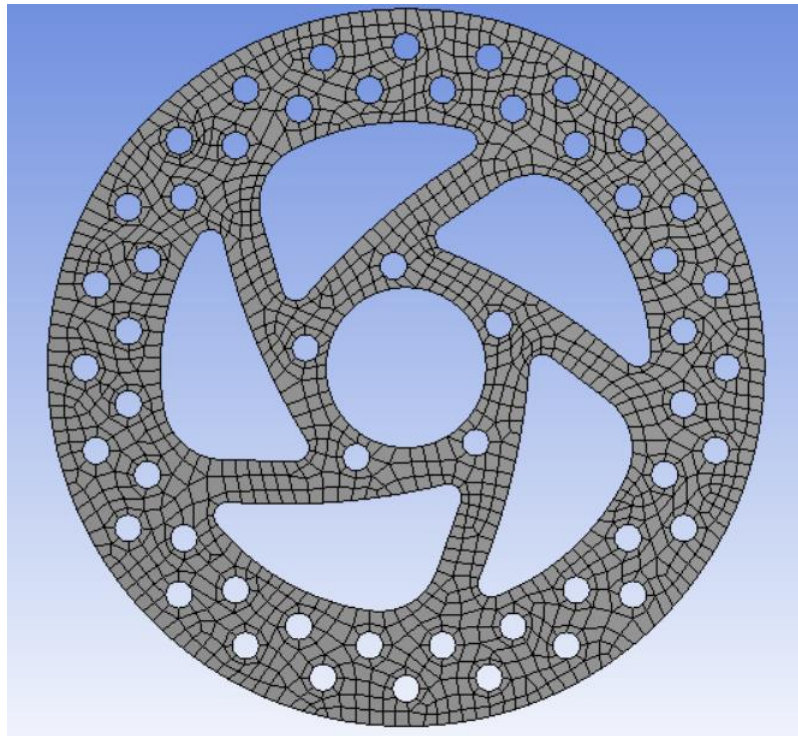
Hala ere, berebiziko garrantzia du diskoa xy planoan kokatuta egotea datu esperimentalen eta teorikoen korrelazioa egokia izan dadin. Izan ere, eredu esperimentaletik lortutako datuak eta matematikoki lortutakoak bat egin behar dute elkarrekin konparatu ahal izateko. Hori dela eta, ANSYS-eko geometria- editorea erabiliz CAD-a plano egokian kokatu da.

- **Mugalde baldintzak**

Mugalde baldintzei dagokienez, kontuan hartu beharra dago zein den analisi honen helburua: analisi esperimentalaren arteko korrelazioa egitea, alegia. Hortaz, analisi biak mugalde baldintza berberak izan beharko lukete. Geroago azalduko den moduan, analisi esperimentala diskoan inolako finkapenik egin gabe egiten da, hau da, ANSYS-en ez da mugalde baldintzarik jarri behar, geometria libreki mugitu dadin ahalbidetzeko.

- **Sarea**

Geometriaren saretzea edo mailatzea (*meshing* ingelesez) Model atalaren barruan egin beharra dago. Mailatzea era egokian egiteko, lehen ordenako elementu triangeluarren (tetraedroen) kopurua ahalik eta gehien murriztea bilatu da. Izan ere, elementu hauen ezaugarri garrantzitsuenetako bat da tentsio konstantedun elementuak direla eta horregatik, baliteke ikerketaren baterako zehaztasun nahikoa ez ematea. Hori lortzeko, "Automatic Method" eta 4 mm-tako elementuetara murriztu egin dira "Body Sizing" baten bidez. Honen ostean hurrengo irudiko sarea geratu egin da:



6. Irudia - Geometriaren sarea

Hala ere, proiektu honetan, batetik, deformazioei so egingo zaie batik bat eta bestetik, aurrerago geometria dezimatu egingo denez sarearen itxura ez du garrantzi handiegirik izango esportatuko diren datuak, bibrazio moduak lortzeko erabiliko baitira.

2.1.2 Prozesatzailea

Prozesatzailea da EF programak diskretizatutako eredutik abiatuz dagozkion ekuazioak ebazten dituen atala. Kasu honetan, egin beharreko analisia analisi dinamikoa izan denez, atal honetan honen oinarriak teorikoak azaldu egingo dira.

2.1.2.1 Analisi dinamikoaren oinarri teorikoak

Sistema mekaniko erreal gehienak jarraiak izan ohi dira, hau da, bere konfigurazioa infinitu askatasun graduek definitzen dituzte. Elementu Finituen Metodoa sistema jarraien diskretizazioan oinarritzen da. Horri esker, sistema mekanikoa bigarren ordenako N ekuazio diferentzial linealeko sistemarekin irudikatu daiteke (N , askatasun gradu kopurua izanik).

N askatasun graduko sistema dinamikoa matrizialki adieraz daiteke. Kasurik orokorra hurrengo ekuazioak definitzen du:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [C]\{\dot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = \{f(t)\} \quad (1)$$

Non,

- $[M]$: Inertzia edo masa matrizea.
- $[C]$: Motelgarritasun matrizea.
- $[K]$: Zurruntasun matrizea.
- $\{x(t)\}$: Desplazamendu bektorea.
- $\{f(t)\}$: Kanpo indarren bektorea.

Sistema honen hiru matrizeek aipatu beharreko zenbait propietate dituzte. Alde batetik, hirurak simetrikoak izan behar dira. Horrez gain, masa matrizea definitu positiboa izan behar da, hau da, minor printzipalen determinanteak zero baino handiagoak dira. Bestetik, zurruntasun matrizea definitu positiboa edo semidefinitu positiboa izango da. Hau da, minor printzipalen determinantea zero edo handiagoa izango dira. [5]

Bibrazio moduak eta maiztasun naturalen lorpenerako, ordea, kanpo indarrak eta hasierako baldintza nuluak dira. Bestalde, motelgarritasuna txikia izan ohi da eta ez du eraginik maiztasun naturalen eta bibrazio moduen kalkuluan. Horregatik, arbuia egiten da. Hortaz, ebatzi beharreko ekuazioa honela geratuko litzateke:

$$[M]\{\ddot{x}(t)\} + [K]\{x(t)\} = 0 \quad (2)$$

Adierazpen hori izango da motelgarritasunik gabeko bibrazio askeen mugimendua deskribatzen duena. Ekuazio honen soluzioa, N askatasun graduko kasurako, honako itxura izango du:

$$\{x(t)\}_i = \{\phi\}_i \sin(\omega_i t - \alpha_i) \quad (3)$$

$\{\phi\}_i$ i-garren modua izanik, ω_i maiztasuna eta α_i angelu fasea duena.

(3) adierazpena (2) ekuazioan ordezkatur:

$$([K] - \omega_i^2 [M]) \{\phi\}_i = 0 \quad (4)$$

Azken hau, N ekuaziodun sistema gisa adieraz daiteke (5) adierazpenean bezala:

$$\begin{bmatrix} k_{11} - \omega^2 m_1 & k_{21} & \cdots & \cdots & k_{1N} \\ k_{21} & k_{22} - \omega^2 m_2 & \cdots & \cdots & k_{2N} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \cdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \cdots & \ddots & \vdots \\ k_{N1} & k_{N2} & \cdots & \cdots & k_{NN} - \omega^2 m_N \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \phi_N \end{Bmatrix}_i = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ \vdots \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (5)$$

Problema mota hau matematikoki autobektoreen eta autobalioen problema baten moduan ebatz daiteke. Hortaz, burutu beharreko eragiketa:

$$\det([K] - \omega_i^2 [M]) = 0 \quad (6)$$

(6) adierazpenari sistemaren ekuazio karakteristikoa deitzen zaio. Bestalde, bertatik kalkulaturako autobalioak ω_i^2 izango dira eta autobektoreek, berriz, bibrazio moduak adieraziko dituzte. Autobalio bakoitzari autobektore bat dagokionez, N askatasun graduko sistema batek N autobalio eta N autobektore izango ditu.

Laburbilduz, eta (4) ekuazioa berrantolatuz,

$$[K] \{\phi\}_i = \omega_i^2 [M] \{\phi\}_i \quad (7)$$

2.1.2.2 Analisi dinamikoa eta EFM-a

Esan bezala, EF erabiltzen dituen edozein software-ren oinarria geometriaren diskretizazioa da. Horrela, sistema jarraia N askatasun graduko sistema bihurtzen da, zeina aurreko atalean azaldu den moduan kalkula daitekeen. Bestalde, programak interpolazioa erabiltzen du nodoen arteko guneen kalkulua egiteko. Esate baterako, edozein puntuko desplazamendua hurrengo moduan kalkula daiteke:

$$\delta(\{x\}) = \sum_{j=1}^n (N^j(\{x\}) \cdot \delta^j) \quad (8)$$

Non, n elementuaren nodo kopurua den, $N^j(\{x\})$ j nodoari dagokion interpolazio funtzioa eta δ^j , berriz, j elementuaren desplazamendua izanik.

Hala ere, oraindik $[K]$ eta $[M]$ matrizeak ezezagunak izango lirateke. Hurrengo puntuetan matrizeen kalkulua azaldu egiten da:

Elementu baten zurruntasun matrizearen kalkulua

Dei diezaiozun $[k]$ elementu baten zurruntasun matrizeari. Honen kalkulurako desplazamendu birtualen teorematik abiatuko gara:

$$W = \{\delta\}^T \cdot \{F\} \tag{9}$$

Bestalde, desplazamenduen ondorioz pilatutako energia elastikoa hurrengo adierazpenak ematen du:

$$V = \int \{\varepsilon(\{x\})\}^T \{\sigma(\{x\})\} dv \tag{10}$$

Eta elastikotasun teoriaren arabera,

$$\{\varepsilon(\{x\})\} = [\partial] \{\delta(\{x\})\} \tag{11}$$

Interpolazio funtzioa era matrizialean idatziz (12) eta aurreko adierazpenean ordezkatzuz, (13) ekuazioa lortzen da:

$$\{\delta(\{x\})\} = [N(\{x\})] \cdot \{\delta\} \tag{12}$$

$$\{\varepsilon(\{x\})\} = [\partial][N(\{x\})]\{\delta\} = [B(\{x\})]\{\delta\} \tag{13}$$

Azkenik, tentsioen eta estentsioen arteko erlazioa (Hookeren lege orokortua):

$$\{\sigma(\{x\})\} = [D]\{\varepsilon(\{x\})\} = [D][\partial][N(\{x\})]\{\delta\} = [D][B(\{x\})]\{\delta\} \tag{14}$$

Beraz, (10) ekuazioan (11) eta (13) ordezkatu daitezke:

$$V = \{\delta\}^T \left(\int [B(\{x\})]^T [D] [B(\{x\})] dv \right) \{\delta\} \quad (15)$$

Bestalde, sistemak egindako lana eta gordetako energia elastikoa berdinak izan behar direnez (9) eta (10) ekuazioak berdindu egin daitezke eta sinplifikazioak egin ostean hurrengo adierazpena erdietsiko litzateke:

$$\left(\int [B(\{x\})]^T [D] [B(\{x\})] dv \right) \{\delta\} = \{F\} \quad (16)$$

Ekuazio hori oreka estatikoko ekuazioarekin $\{F\} = [K] \cdot \{\delta\}$ konparatuz zurruntasun matrizearen adierazpena ondorioztatzen da:

$$[k] = \int [B(\{x\})]^T [D] [B(\{x\})] dv \quad (17)$$

non, $[B(\{x\})]$ interpolazio funtzioen deribatuen matrizea den

Inertzia matrizearen kalkulua

D'alambert-en printzipioaren arabera inertziaren efektuak inertzia indarra deritzon bolumen- indarren bitartez azal daitezke, zeina masa eta azelerazioaren arteko biderkadurarekin kalkulatzen den.

Lan birtualen teorema erabiliz, inertziaren ondoriozko indar nodalak honela adieraz daitezke:

$$\{f\} = \int_V [N]^T \{g\} dV \quad (18)$$

Non, $\{f\}$ indar nodalak, $\{g\}$ bolumen indarrak eta $[N]$ interpolazio funtzioak diren.

$\{\ddot{u}\}$ bolumen diferentzialaren azelerazioa baldin bada:

$$\{g\} = -\rho\{\ddot{u}\} \quad (19)$$

Eta desplazamenduetarako erabilitako interpolazio funtzio berberak erabiliz:

$$\{\ddot{u}\} = [N]\{\ddot{d}\} \quad (20)$$

Ekuazio guztiak bateratuz hurrengo adierazpenera lortzen da (dentsitate konstantea suposatuz bolumen osoan zehar):

$$\{f\} = \left(\rho \int_V [N]^T [N] dV \right) \{\ddot{d}\} \quad (21)$$

Hortaz, elementuaren masa edo inertzia matrizea hurrengo eran definituta geratzen da.

$$\{m\} = \rho \int_V [N]^T [N] dV \quad (22)$$

Motelgarritasun matrizea

Azkenik, motelgarritasunari dagokionez, esan beharra dago nahiko mekanismo ezezaguna den aldetik, ez dagoela honen kalkulurako metodo zehatzik. Hala ere, motelgarritasun proportzionala deritzon teknika erabili izan ohi da. Hurbilpen honekin [C] matrizea masa eta zurruntasun matrizearen arteko konbinazio lineal moduan idatz daiteke:

$$[C] = \alpha[K] + \beta[M] \quad (23)$$

Non, α eta β balioak normalean antzeko material batekin ateratako neurketa esperimentaletatik lortzen diren. Hori egitean, ekuazioa desakoplatu egiten da eta zenbakizko integrazioaren beharrik ez da egongo.

Hala ere, arestian esan bezala, sistema mekaniko guztiek nolabaiteko motelgarritasuna duten arren, askotan mespretxatu egin daitezke.

2.1.3 Postprozesatzailea

Atal honetan programak emaitzak bistaratu egiten ditu. Honi esker, besteak beste, bibrazio moduak eta kalkulaturako maiztasun naturalak ikus daitezke.

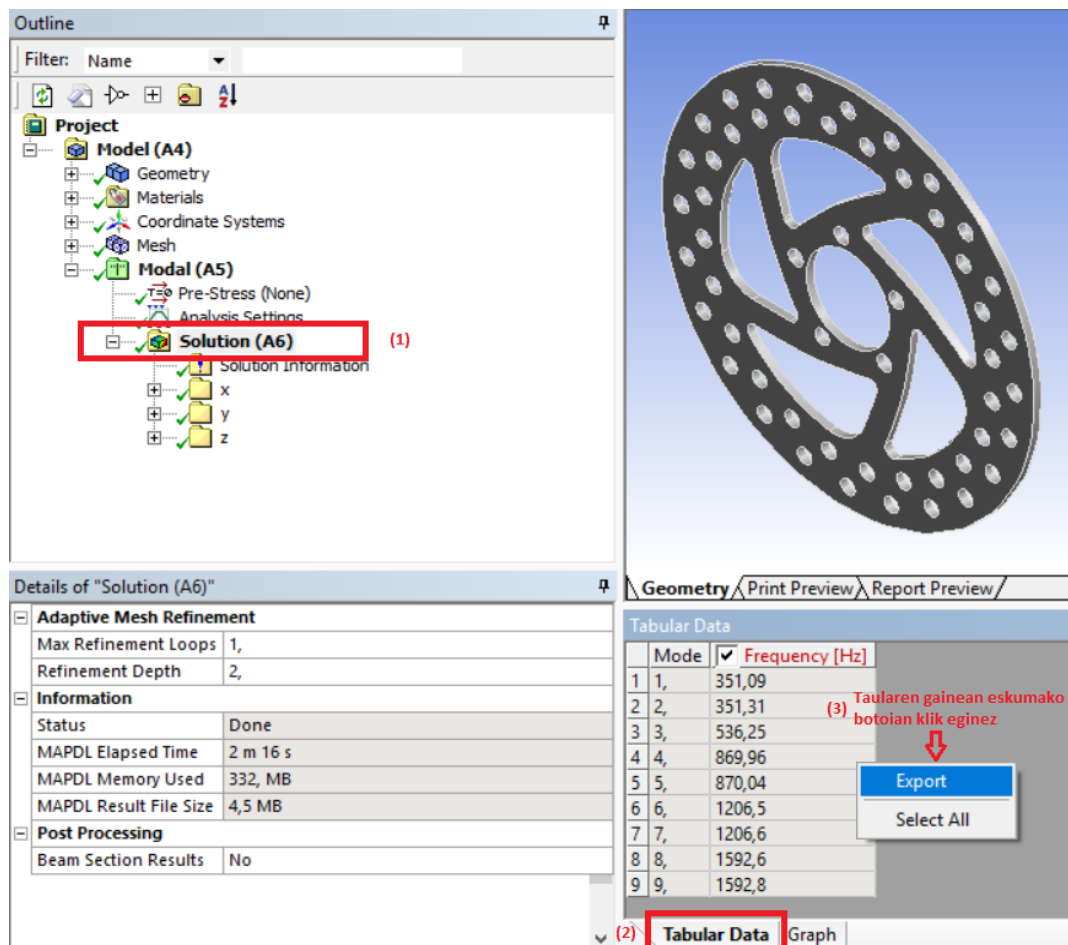
Proiektu honen emaitzei dagokienez, I.Eranskinean bibrazio modu bakoitzaren irudiak adierazita datoz bakoitzaren maiztasun naturalarekin batera.

2.2 Datuen esportazioa

Analisi teorikoa bukatutakoan informazio guztia esportatu beharra dago BK Connect programarekin erabili ahal izateko: maiztasun naturalak, nodoen kokapena eta desplazamenduak eta sareari buruzko informazioa gorde behar dira.

2.2.1 Maiztasun naturalak

Hurrengo irudian (7. Irudia) ikus daitekeen moduan *Mechanical* leihoan *Solution (A6)* -ren barruan kokatuta (1) eta *Tabular Data* (2) fitxan klik egin ostean bibrazio modu bakoitzaren maiztasun naturalak ikus daitezke. Taula horren gainean eskumako botoian klik eginez (3) *Export* aukera hautatu egin da.



7. Irudia - Maiztasunen esportazioa

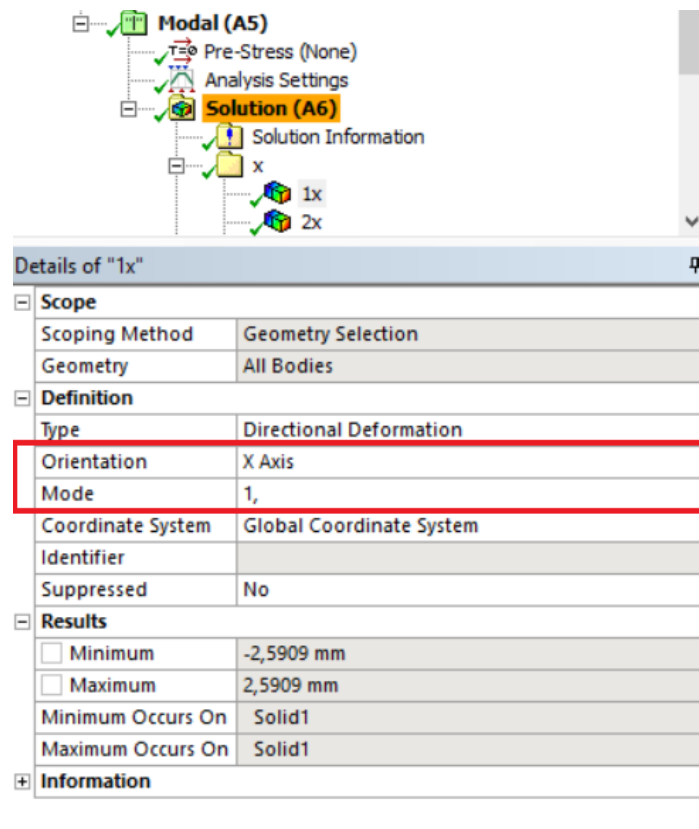
Korrelazioa egiteko lehendabiziko 15 maiztasunak esportatu egin dira solido zurrunekeo mugimenduak kenduta. Horrela, .txt formatuan gordeta hurrengo taula erdietsi da:

	Mode	Frequency [Hz]
1	1,	351,09
2	2,	351,31
3	3,	536,25
4	4,	869,96
5	5,	870,04
6	6,	1206,5
7	7,	1206,6
8	8,	1592,6
9	9,	1592,8
10	10,	2236,7
11	11,	2307,8
12	12,	2307,9
13	13,	2488,8
14	14,	2535,6
15	15,	2869,7

2. Taula - Maiztasun naturalak

2.2.2 Nodoen desplazamenduak










Solution gainean eskumako botoiarekin klik eginez: *insert* › *deformation* › *directional* aukeratu beharra dago. Ondoren, hurrengo irudiko aukeren artean *Orientation* eta *Mode* izenekoak aldatu dira bibrazio modu eta norabidea aukeratzeko. Guztira, bibrazio modu bakoitzeko hiru norabideetako desplazamenduak esportatu dira. Hortaz, aipatutako pausuak behin eta berriro errepikatu behar izan dira kasu bakoitzean bibrazio modua eta norabide gokia aukeratuz (8. Irudia).



8. Irudia - Desplazamendu direkzionalen aukeraketa

Ondoren, desplazamendu hauek guztiak banan-banan esportatu dira .txt formatuan. Horretarako, eskumako botoiarekin *Export txt File* aukeratu behar da.

Fitxategi hauek guztiak 9. Irudian adierazitako izenarekin gorde beharko dira:

-  1x.txt
-  1y.txt
-  1z.txt
-  2x.txt
-  2y.txt
-  2z.txt
-  3x.txt
-  3y.txt
-  3z.txt

9. Irudia - Desplazamenduak gordetzeko modua

Lehen zenbakia bibrazio modua adieraziko du eta hurrengo hizkiak, berriz, (x, y edo z, alegia) dokumentu horrek jasoko dituen desplazamenduen norabidea adierazten digu.

Fitxategi horietako bakoitzak 3. Taulan adierazten den moduan gordeko ditu desplazamenduak:

Node Number	X Location (mm)	Y Location (mm)	Z Location (mm)	Directional Deformation (mm)
1	54.65	53.15	-2.	2.0222
2	-24.38	-24.668	-2.	-1.1337
3	32.785	-81.981	-2.	4.4512e-002
4	-56.749	-52.682	-2.	-2.2274

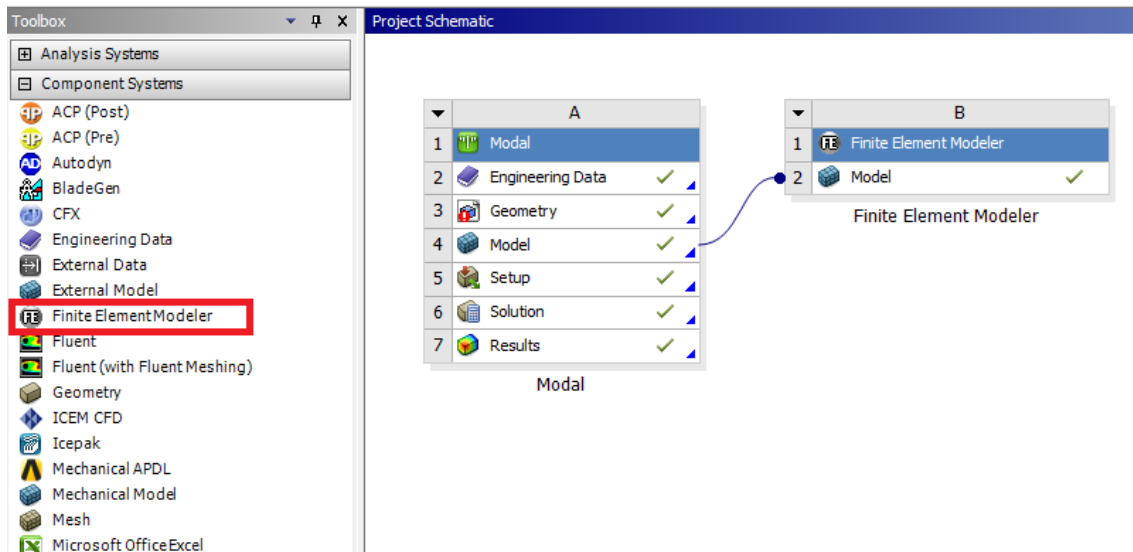
3. Taula - Desplazamendu direkzionalak esportatzeko era

Atal hau egiteko, berebiziko garrantzia du ANSYS 19 bertsioa edo aurreragoak erabiltzea. Izan ere, geroago azalduko den programa funtziona dezan, desplazamendu direkzionalak gordetzeko era aipatutako modu zehatz honetan bezala gordeta egon beharko da eta bertsio horien aurrekarietan erdiko hiru zutabeak (nodoen kokapenari dagozkionak) ez dira esportatzen. Hala ere, zutabe horiek ez dira beharrezkoak, sareari buruzko informazioa ateratzean errepikatzen baitira (2.2.3 atala). Horregatik, bertsio zaharragoak erabili nahi badira aldaketa txiki bat egitea nahikoa izango litzateke programa funtziona dezan, berez, programak datu horiek ez baititu taula honetatik gordetzen.

2.2.3 Sarearen informazioa

Atal honetan sareak dituen nodo eta elementuen informazioa esportatuko da: alde batetik, nodo bakoitzaren posizioa eta bestetik, elementu bakoitzaren mota zein den eta elementua osatzen duten nodoen zenbakia gorde egin dira.

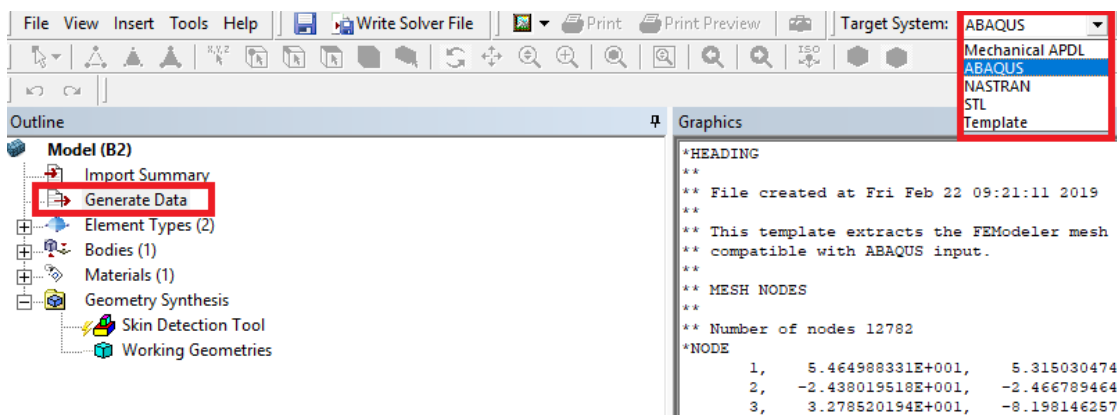
Informazio hau guztia lortzeko ANSYS-eko *Component System*-ren barruko *Finite Element Modeler* funtzioa erabili da. 10. Irudia n adierazita dator zein funtzio erabili den eta proiektuaren eskema zelan gelditu den.



10. Irudia - Finite Element Modeleren aukeraketa

Hau egin ostean, *Finite Element Modeler* deritzon erreminta erabili egin da. 11. Irudia agertzen da honen barruan egin diren pausuak: lehendabizi, *Generate Data* aukeraren barruan kokatu eta ondoren *Target System* izeneko aukeretan informazioa esportatzeko formatua aukeratu da.

Lan honetan garatu den programa erabili ahal izateko ABAQUS lengoia idatzita egon behar da.



11. Irudia - FEModeleren sarearen informazioa esportatzeko modua

Datu hauek .txt formatuan esportatu dira *nodoak.txt* izenarekin.

2.3 Formatu unibertsaleko fitxategien lorpena

Behin analisi teorikoa eginda eta beharrezko datu guztiak esportatu ondoren, formatu unibertsaleko fitxategiak sortu daitezke. Aurreko ataletan azaldu den moduan, formatu unibertsaleko fitxategiak datuak era ordenatu zehatz batean egituratuta dituen fitxategi bat baino ez da. Lan neketsu hori automatizatzeko II.Eranskineko kodigoa idatzi da Fortran bidez prozesu hori automatikoki egiten duen programa sortzeko.

2.3.1. Fortran programazio lengoaia

Fortran izena ingeleseko *The IBM Mathematical **Formula Translating System***-etik dator eta zenbakizko kalkulurako bideratuta dagoen programazio lengoaia da. Hasiera batean, maila altuko lengoaiarik zaharrena dena, IBM ordenagailuentzat diseinatu zen eta oso erabilia izan da zientziaren eremu anitzetan [10].

Bere sorreratik bertsio ugari sortu diren arren, proiektu honetan aipaturiko programa *Fortran95* programazio lengoian idatzita dago eta *Visual Studio Code* konpiladoreaz baliaututa kodigoa konpilatu eta exekutagarria sortu izan da .

2.3.2. UFF lortzeko kodigoa

Artearen egoeran azaldu den moduan (1.5 atala) fitxategi unibertsalak lortzeko ANSYSetik ateratako informazioa era egokian berridatzi behar da. Gordeko den informazioaren arabera dataset izeneko datu multzoetan banatzen da, zenbaki zehatz batzuekin identifikatzen direlarik. Horietako bakoitza -1 zenbakiarekin hasi eta bukatu egiten dira [9].

Hurrengo puntuetan lan honetan erabili diren hiru dataset hauek zelan idatzi diren azaldu egingo da. Kontuan hartu behar da idatzitako lerro guztiei formatu zehatz bat eman behar zaiela SDRC-k zehaztutakoaren arabera, baina hurrengo puntuetan lerro bakoitzean idatzi beharreko informazioan baino ez da sakonduko.

Universal dataset number 15

12. Irudian proiektu honetan erabilitako 15 dataset-aren adibide bat ikus daiteke.

```

-1
15
  1      0      0      0 -2.59206E+01  9.71594E+01 -2.00000E+00
  2      0      0      0 -9.72022E+01  8.53001E+00  2.00000E+00
  3      0      0      0 -4.11315E+01 -9.17373E+01  2.00000E+00
  4      0      0      0  8.45943E+01 -5.74813E+01 -2.00000E+00
  5      0      0      0  7.71234E+01  6.71655E+01 -2.00000E+00
  6      0      0      0 -5.97251E+00  3.61293E+01 -2.00000E+00
  7      0      0      0 -3.16468E+01  1.48656E+00  2.00000E+00
  8      0      0      0 -1.26706E+01 -3.13544E+01 -2.00000E+00
  9      0      0      0  2.90269E+01 -1.87337E+01 -2.00000E+00
 10      0      0      0  2.69125E+01  2.06548E+01 -2.00000E+00
-1
    
```

12. Irudia - 15 dataset-aren adibidea

Lehendabiziko zutabea nodo zenbakia adierazten digu. Hurrengo hiru zutabeetan 0 idatzi da kasu honetan (koordinatu sistemaren zenbakiak eta kolorea baino ez baitute adierazten). Azken hirurak, berriz, nodo bakoitzaren koordinatuak idatzi beharko dira.

Nodo bakoitzerako, lerro bana idatzi beharra dago.

Universal dataset number 82

Dataset honetan elementu guztiei buruzko informazioa gordetzen da. Batez ere, elementu horiek ze nodoz osatuta dauden eta lerroak zein ordenean irudikatuko diren. Hurrengo irudian 82. datasetaren egituraren adibidea ikus daiteke.

```

-1
82
Line 1      1      6      0
      15     1864     1837     269     4086     15
-1
    
```

13. Irudia - 82 dataset-aren adibidea

Datasetaren zenbakia idatzi ondoren, hiru zutabe bereizi daitezke: lehendabizikoan lerroaren zenbakia idatzen da, bigarrenean lerroa osatuko duten nodo kopurua eta azkenengoan kolorea baino ez da aukeratu behar (horregatik 0 idatzi da lerro guztietan).

Hurrengo lerroan, 'identification line' deritzon informazioa dago, zeinetan lerroari izen bat jarri baitakioke. Azkenik, lerro hori osatzen duten nodo kopurua agertzen da.

Egitura hau lerro bakoitzerako errepikatu behar da.

Universal dataset number 55

Dataset mota hau, bibrazio moduen informazioa gordetzeko erabili da. Hurrengo irudian ikus daitekeen moduan lehendabiziko bost lerroetan ez da ezer gorde behar, seigarrenean hasi behar da datuak sartzen.

```

-1
55
NONE
NONE
NONE
NONE
NONE
      1      2      2      8      2      3
      2      4      0      1
0.35100E+03 0.00000E+00 0.00000E+00 0.00000E+00
      1
0.29503E+00 -0.21363E+01 -0.71850E+02
      2
0.19522E+01 0.15899E+01 0.58836E+02
      3
0.23521E+01 -0.17882E+01 -0.19677E+02
      4
0.15726E+01 0.24190E+01 -0.38853E+01
      5
0.23928E+01 -0.10793E+01 0.36478E+02
      6
0.44234E+00 -0.99486E+00 -0.11159E+02
-1
    
```

14. Irudia - 55 dataset-aren adibidea

Seigarren lerroan sartu beharreko zenbakien arabera, hurrengoetan sartuko den informazio mota zehaztu egiten da. Zenbaki bakoitza zer adierazten duen SDRC-k

zehaztuta dauka bere web orrian. Kasu honetan zutabe bakoitzean erabilitakoak hurrengoak dira, hurrenez hurren.

- 1: Analisi estrukturala egingo dela adierazten da.
- 2: Modu normaleko analisi mota egingo dela adierazten da.
- 2: Sartuko diren datuak 3 askatasun graduako translazioko bektore globalak izango dira.
- 8: Datuak desplazamenduak izango direla adierazteko.
- 2: Zenbaki errealak erabiliko direla adierazten du.
- 3: Nodo bakoitzek hiru datu erabiliko direla.

Zazpigarren lerroan idatzitako zenbakiek aurrekoan erabakitako analisi motak mugatzen ditu. Izan ere, lehenengo bi zutabeak konstanteak izango dira analisi mota honetarako (2 eta 4 hurrenez hurren). Azken biek, berriz, karga mota zenbakia eta bibrazio modua adierazten dute. Hortaz, egitura hau bibrazio modu bakoitzerako errepikatu beharko da eta azken zenbaki honekin adieraziko da zein bibrazio moduari dagokion.

Hurrengo lerroan bibrazio maiztasuna bakarrik adierazi da 0 daukaten zutabeak masa eta motelgarritasunari buruzko informazioa gordetzen baitute.

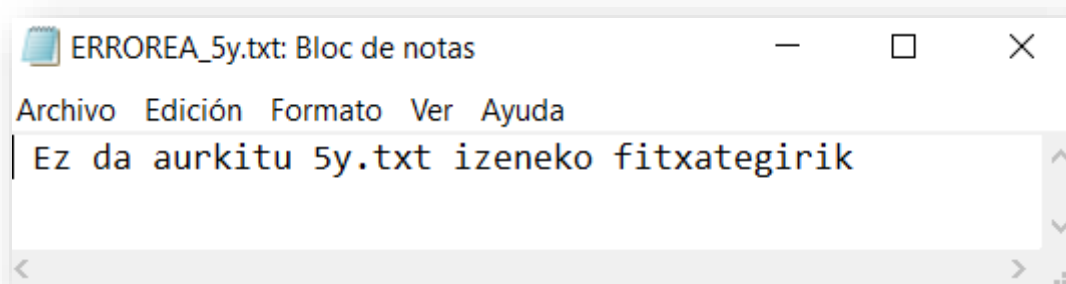
Dataset honekin bukatzeko geratzen diren lerroetan, nodo zenbakia idatzi behar da eta hurrengo lerroan nodo horren desplazamenduak. Azken pausu hauek behin eta berriro errepikatu dira ereduaren nodo guztien desplazamenduak gorde diren arte.

2.3.3. Programaren exekuzioa eta funtzionamendua

Atal honetan sortutako programaren funtzionamendua azaldu egingo da. Dena den, programak pausuz pausu zelan lortzen den ikusteko II.Eranskineko kodigoa aztertu beharko litzateke, bertan baitator programak jarraitutako sententzia guztiak. Kodearekin batera, ulermena erraztuko duen argibide ugariz osatuta dago.

Programaren exekuzioari dagokioenez, *UFF_sortu.exe* fitxategiarekin egiten da eta honek irakurri beharreko fitxategi guztiak exekutagarria gordetzen den karpeta berean egon beharko dira. Programaren funtzionamendu egokia ziurtatzeko, ANSYS-etik esportatutako fitxategiak -2.2 atalean azaldutakoak- modu egokian izendatuta egon beharko dira.

Alde batetik, programak bibrazio modu bakoitzeko desplazamenduak irakurri behar ditu. Berebiziko garrantzia du x norabideko desplazamenduak ondo definitzea. Izan ere, programak dokumentu horiek erabiliko ditu bibrazio modu kopurua zenbatesteko eta gainerako norabideetan errorerik dagoen ala ez ikusteko. Izan ere, x norabideko fitxategi kopurua zenbatu ondoren, gainerako norabideetako fitxategiak zenbatu eta berdinak diren aztertzen du. Errorerik egotekotan, hau da, norabideren batean fitxategirik faltako balira programak hurrengo dokumentuak sortuko lituzke erroreari buruz informatzeko (15. Irudia).



15. Irudia - Errore mezuaren adibidea

Kasu honetan 5x.txt fitxategia existitu egiten da, baina 5y.txt dokumentua falta denez ERROREA_5y.txt fitxategia sortzen du aurreko irudian ikus daitekeen moduan. Gauza bera gertatuko litzateke faltatzen den edozein beste dokumenturekin.

Aipatu beharra dago programa exekutatzen den bakoitzean aurreko exekuziotik egon litezkeen errore mezuak automatikoki ezabatzen direla. Horrela, ziurtatu daiteke errore mezurik aurkitzekotan azken exekuziokoak izango direla.

Bestalde, Maiztasunak.txt izeneko fitxategitik bibrazio modu bakoitzeko maiztasun naturalak irakurtzen ditu.

Azkenik, programa ondo funtziona dezan existitu beharreko azken fitxategia Nodoak.txt izena izan beharko du. Fitxategi honetan nodo guztien kokapena agertzen da eta elementu guztiak osatzen dituzten nodoen multzoak bereizten dira.

Orain arte aipatutako hiru fitxategiak nahikoak izango dira geometriari eta bibrazio moduei dagokion formatu unibertsaleko fitxategiak sortzeko.

Aipatutako informazioa era egokian gordeta badaude bi fitxategi sortuko dira formatu unibertsaleko formatuan (.unv). Alde batetik, *Geometria.unv* fitxategiak nodo guztien kokapena eta elementu bakoitza ze nodoz osatuta dagoen izango du. Bestalde, *Moduak.unv* fitxategiak bibrazio moduei buruzko informazioa izango du.

2.3.4. Decimation-a

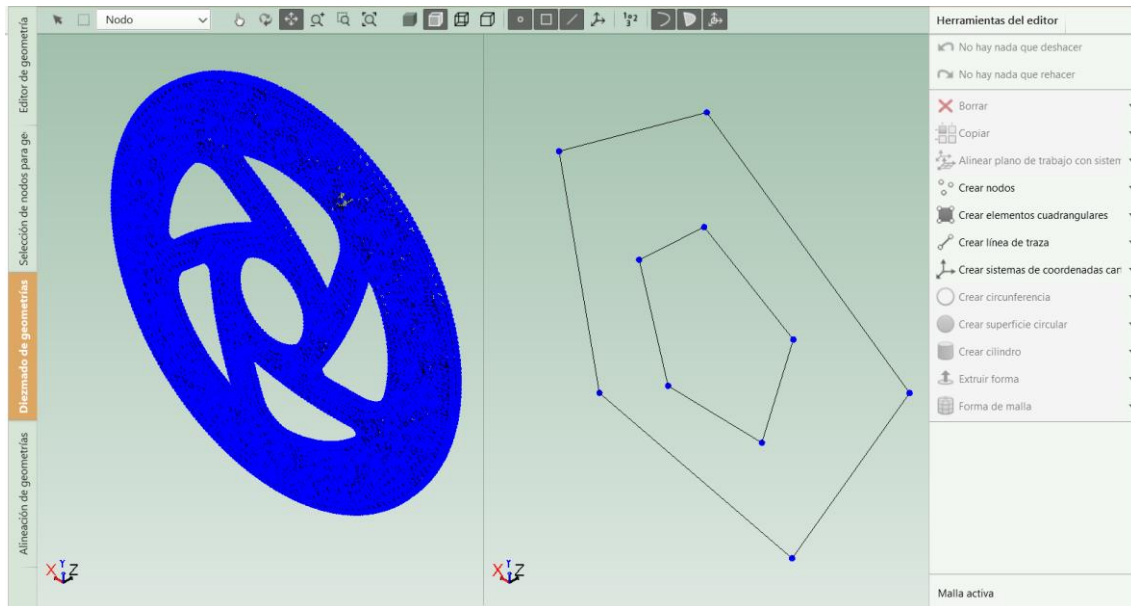
Aurreko atalean azaldutako programak zenbait fitxategi unibertsal sortu egiten ditu. Hala ere, fitxategi horrek EFM-ari buruzko informazio guztia izango du eta dezimatzea deritzon prozesua jasan beharko dute, zeinetan eredu sinplifikatu egiten den nodo gutxi batzuk mantenduz.

Honetarako, bi aukera daude: batetik, BK Connect programak bertan egitea ahalbidetzen du, baina prozesua errepikakorra eta neketsua izan daitekeenez Fortranen idatzitako programari, dezimatzeko aukera gehitu zaio automatikoki egin dezan *UFF_sortu.exe* exekutatzeko den bakoitzean. Izan ere, geroago azalduko den moduan, programa erabiliz dezimatzekoan mantentzen diren nodoen zenbakia automatikoki aldatzeko aukera gehitu zaio.

- **BK Connect erabiliz**

Programa erabiliz geometria dezimatu ahal izateko aurreko atalean lortutako *Geometria.unv* izeneko fitxategia BK Connect-era inportatu egin da. Modelo izeneko pestainaren barruan "*Diezmado y Geometria*" delakoaren barruan egin behar da 16. Irudiak adierazten duen bezala.

Geometria horretatik abiatuz eskuineko aukera multzoetatik "*Crear nodos*" hautatu eta mantendu nahi izan diren nodoak aukeratu egin dira. Hurrengo irudiko geometria lortzeko, "*Crear linea de traza*" aukerarekin nodo horien arteko lerroak ere marraztu egin dira.



16. Irudia - BK Connect bidezko dezimatzea

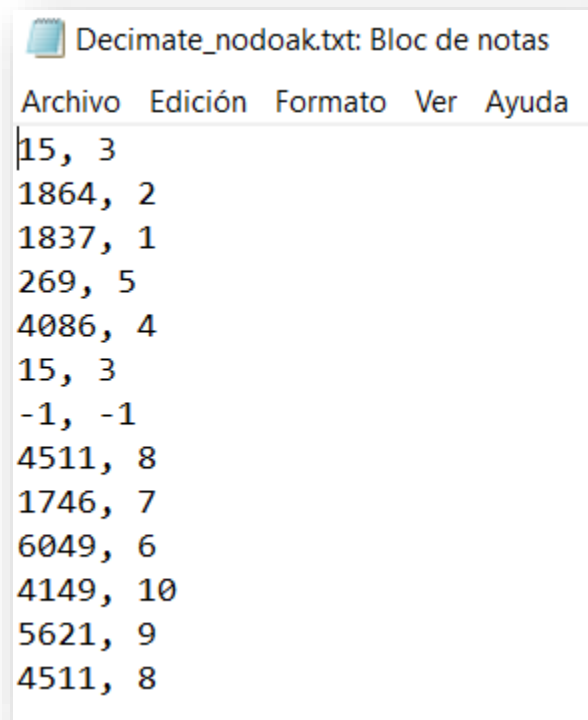
- **UFF_sortu.exe** exekutagarria erabiliz.

Esan bezala, sortutako programak geometria dezimatzea ere ahalbidetzen digu. Hau egin dezan, Decimate_nodoak.txt izeneko fitxategia existitu beharko da. Hala ere, aipatu beharra dago, fitxategi hau existitu ezean programak ez duela inolako errorerik emango, dezimatzea egiteke geratuko da soilik. Hau da, hautazko funtzio bat baino ez da.

Esandako fitxategi honetan, dezimatze prozesuaren ondoren mantendu nahi izango diren nodoen zenbakiak idatzita agertu beharko dira lerro-jauzi batez bereizia, hau da, nodo bakoitza lerro ezberdinetan idatzita. Horrez gain, nodoak idazteko ordena ere garrantzitsua izango da lerroak honen arabera marraztuko dira eta. Ondorioz, marraztu beharreko lerroek irudi itxia osatu behar badute lehendabiziko nodoa amaieran ere agertu beharko da errepikatuta, alegia. Dena dela, programa prestatuta dago nodoak birritan idatzi arren, fitxategiaren gainerako informazioa errepikatuta agertu ez dadin.

Lerro bat baino gehiago idatzi nahi bada, aurreko lerroaren azken nodoaren ondoren eta hurrengo lerroaren lehen nodoaren aurretik -1 zenbakia idatzi beharko da. Programak lerro guztiak irakurri eta -1 zenbakia aurkitzean lerroa bukatutzat ematen du eta hurrengoa irekitzen du. Hori dela eta, zenbaki hau ez da inoiz bukaeran agertu behar. Hau da, azken lerroa bukatutzat emango da fitxategia bertan bukatzen bada eta ez dago -1 idazteko beharrik.

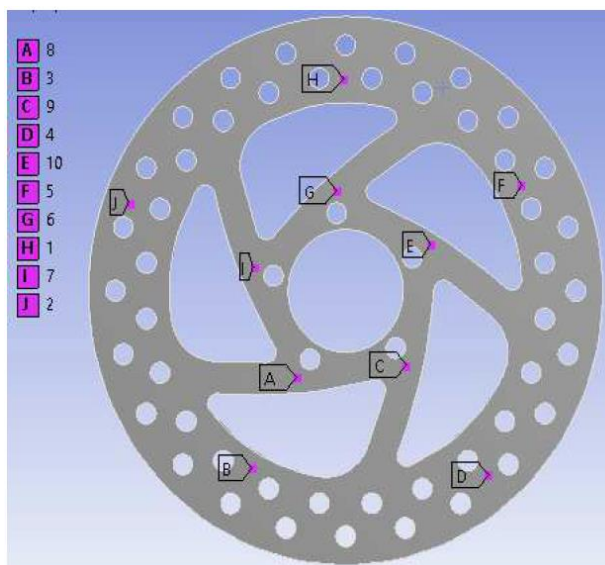
Horrez gain, esan den bezala, programak nodo hauen zenbakien aldaketa ahalbidetzen du. Horretarako, nodo bakoitzaren ostean nodo horrek jasoko duen zenbakia idatzi beharko da koma batez bereizita. Horrela bi zutabe bereizi ahalko dira begi bistaz: dezimatzearen ondoren geratuko diren nodoak eta nodo horiek izango duten zenbakia sinplifikazioa egin ostean. 17. Irudian honen adibide bat agertzen da. Ohar bedi, bigarren zutabean ere -1 zenbakia agertu behar dela.



17. Irudia - Dezimatzea egiteko idatzi beharreko fitxategiaren adibidea

Adibide honetan lerro bat marraztuko da lehen bost nodoen artean eta beste bat azken bost nodoen artean, idatzita dauden ordena berean. Bestalde, lerro itxiak izan daitezen lerro bakoitzeko lehen nodoa bukaeran ere agertzen da. Eskumako zutabean nodo horiek dezimatzearen ostean jasoko duten zenbakia agertzen dira.

Kontuan izanik analisi esperimentalean diskoaren zein puntuen datuak jasoko diren, dezimatutako nodoak puntu berdinak izan daitezen saiatu beharra dago. Hori dela eta, 18. Irudian kokatutako nodoak mantenduko dira soilik, hurrengo atalean ikus daitekeen moduan, analisi esperimentalean horiek erabiliko baitira.



18. Irudia - Dezimatutako nodoen kokapen hurbildua.

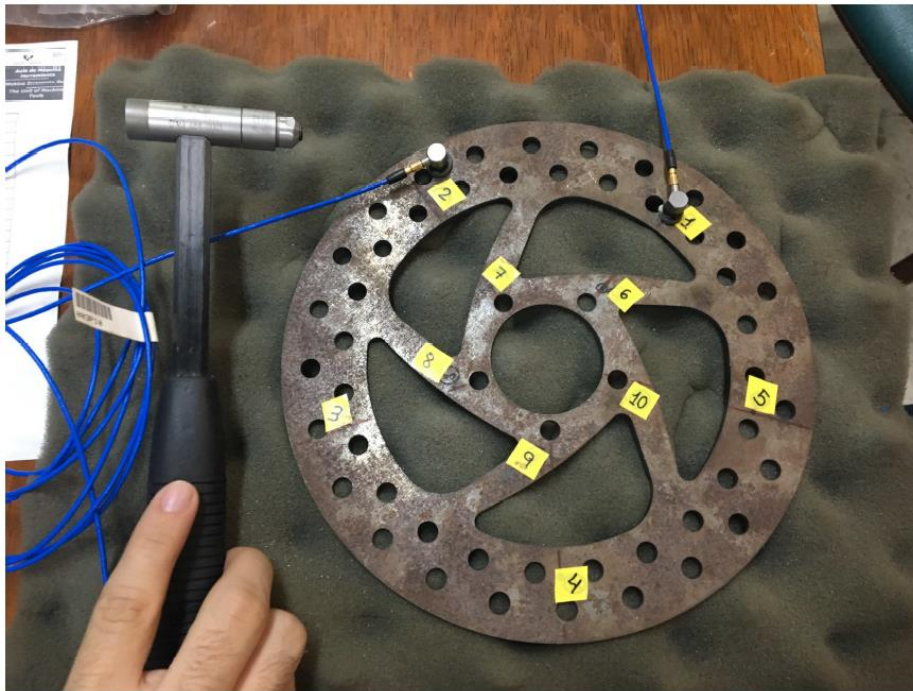
2.4 Analisi esperimentalak

Proiektuan analisi esperimentaleko emaitzak zuzenean jaso diren arren, analisi esperimentalak zelan burutu den ere azaldu egingo da atal honetan.

Analisi esperimentalak gauzatu ahal izateko, sarrera erregistratu, irteera aldagaiak neurtu eta biak prozesatu egin behar dira. Horretarako, kitzikatze sistema bat, transduktoreak eta seinale aztergailu baten beharra dago. Kitzikatze sistemak sarrerako seinalea sortu egiten du (desplazamenduak). Transduktoreak, berriz, sarrera seinale hori jaso eta irteera ezberdin bat (seinale elektrikoa) sortzen duten aparatuak dira: azelerometroak (azelerazioa neurtzen dutenak) edota karga zelulak (indarrak neurtzen dituztenak) erabili ohi dira.

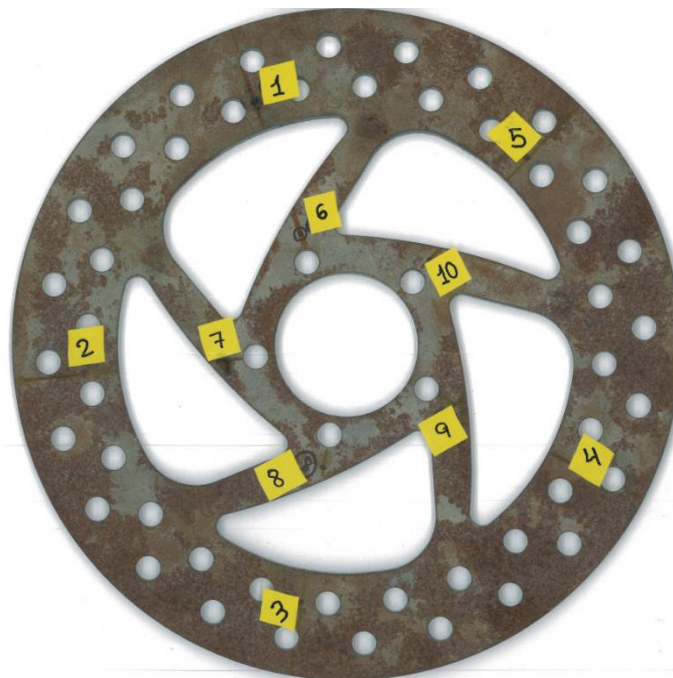
Analisi honetan mailu kitzikatzaile bat erabili egin da kitzikadura mekanismo gisa. Horrez gain, azelerometro bi erabili dira transduktore piezoelektriko modura.

Entsegua diskoaren bibrazioa askeak neurtzeko helburua du. Hori ahalbidetzeko, diskoa isolamendu akustiko gisa jarduten duen apar-esponja baten gainean jarri da hurrengo irudiak adierazten duen moduan. Era berean, azelerometroak diskoari konektatu egingo zaizkio diskoan markatutako bat eta bi puntuetan. (19. Irudia)



19. Irudia - Analisi esperimentalaren entsegua

Markatutako puntu bakoitza hiru aldiz kolpekatu egin da transferentzia funtzioaren batz-bestekoa egiteko. 20. Irudian puntu hauen posizioa adierazita dator.



20. Irudia - Diskoaren kitzikatze puntuak

Erdietsitako datuak OROS izeneko softwaretik esportatu egin dira .uff formatuan, geroago BK Connect programarekin ireki ahal izateko.

FRF-ak sarrera eta irteeraren arteko erlazioa adierazten du maiztasun domeinuan. Sistema mekanikoen analisi modalean, sarrera indar bat izan ohi da eta irteera azelerazioa (azelerometroek neurtutakoa). Hori erreparatuz, erresonantziak, motelgarritasunak, etab. aztertu daitezke.

FRF-a sarrera (input) bakarra erabiliz lortzen duten entseguek SISO (single-input, single output) edota SIMO (single-input, multiple-output) izena jasotzen dute. [7]

2.5 Korrelazioa

Analisi modal experimentalaren aplikaziorik garrantzitsuenetarikoa portaera dinamikoaren iragarpen teorikoa eta praktikan ikusten dena konparatzea da. Prozesu honi balioztatzea deitu ohi zaio.

Ondorengo puntuetan iragarritako eta neurtutako bibrazio moduen konparazioa kuantifikatzeko garatu diren zenbait teknika azaldu egingo dira. Hala ere, lan honetan emaitza teorikoen eta experimentalen arteko korrelazioa egiteko erabili den arren, estimatutako bi moduen arteko korrelazioa egiteko ere erabili daiteke.

2.5.1 Oinarri teorikoak: Modal Assurance Criterion

MAC-aren garapena neurtutako FRF experimentalen balioetatik lortutako emaitzen balioa egokia zela bermatzeko beharretik sortu zen. Hasiera batean, ortogonaltasuna betetzen zen begiratzen zuten bakarrik, baina honek beti ez zuen ematen hurbilketa egokirik.

Metodo tradizional honetan, beraz, experimentalki neurtutako bektore modalak eta zurruntasun edota inertzia matrizeak konparatu egiten dira ortogonaltasun propietatea ebaluatzeko. Izan ere, teorian, bektore modal bakoitza gainerako bektoreei ortogonalak izan behar zaie zurruntasun eta inertzia matrizeekiko (motelgarritasuna proportzionala den kasuetan). Orokorrean, propietate hau zehatzagoa izaten da masa edo inertzia matrizeak erabiliz, hori dela eta, ortogonaltasuna hurrengo eran adieraziko dugu [11]:

$r \neq s$ denean,

$$\{\varphi_r\}^T [M] \{\varphi_s\} = 0 \quad (24)$$

$r = s$ baldin bada,

$$\{\varphi_r\}^T [M] \{\varphi_s\} = m_r \quad (25)$$

Adierazpen hauetan, $\{\varphi_r\}$ eta $\{\varphi_s\}$ r eta s bibrazio moduak adierazten duten bektore propioak dira hurrenez hurren eta m_r , berriz, r moduaren masa modala.

Esperimentalki emaitza hauek ez dira ia inoiz lortzen eta horregatik, onargarritzat hartu egiten dira masa orokortuaren magnitudearen hamarrena. Dena den, hiru arrazoi egon daitezke ortogonaltasun propietate hauek ez betetzeko: bektore modalak baliagarriak ez izatea, inertzia matrizea baliagarria ez izatea edota inertzia matrizearen murrizpena ez baliagarria ez izatea.

Arrazoiak arrazoi, ikuspuntu esperimentaletik, beharrezkoa zen bektore modalen baliagarritasuna berma zezakeen metodoren bat. Hori dela eta, bibrazio moduen konparazioa ahalbidetzeko, hurrengo metodoak garatu egin ziren.

Modal Scale Factor:

Faktore hau bibrazio modu berean estimatutako forma modal guztiak normalizatzeko erabiltzen da, hurrengo eragiketetarako maila edo eskala berdinean gera daitezen.

Demagun $[\psi_A]_r$ eta $[\psi_X]_r$ r bibrazio moduaren estimatutako bi datu multzo konplexuak direla (adibidez, modu teorikoan lortutakoa eta esperimentalki erdietsitakoa) eta euren arteko konparazioa egin nahi dela. Orduan MSF-a hurrengo adierazpenak definituko luke.

$$MSF(A, X) = \frac{\{\psi_A\}_r^T \{\psi_X^*\}_r}{\{\psi_X\}_r^T \{\psi_X^*\}_r} \quad (26)$$

Edo,

$$MSF(X, A) = \frac{\{\psi_X\}_r^T \{\psi_A^*\}_r}{\{\psi_A\}_r^T \{\psi_A^*\}_r} \quad (27)$$

N, askatasun gradu kopurua izanik.

Modal Assurance Criterion:

MAC-a trinkotasun maila adierazten duen parametroa da. Horretarako, bi datu multzo (edo dataset) ezberdineko datuak konparatu egiten ditu. Parametro hau zero eta bat bitarteko eskalar bat baino ez da: bat inguruko MAC balioek korrelazio edo trinkotasun maila handia adierazten dute eta zero, berriz, txikia.

MSF-aren kasuan bezala, $\{\varphi_A\}$ eta $\{\varphi_X\}$ konparatu nahi diren bi datu multzoak baldin badira (analitikoa eta esperimentalak, esaterako) eta r eta q moduak konparatu nahi badira:

$$MAC(r, q) = \frac{|\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_X\}_q|^2}{(\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_A\}_r)(\{\varphi_X\}_q^T \{\varphi_X\}_q)} \quad (28)$$

L_A $[\varphi_A]$ -ren bibrazio forma kopurua eta L_X $[\varphi_X]$ -ren bibrazio forma kopurua baldin bada, guztira $L_A \times L_X$ MAC zenbaki egongo dira [12].

Konparatuko diren datuak dataset berekoak badira Auto-MAC izena hartzen du.

Bestalde, bibrazio modu konplexuetarako adierazpena, hau da, motelgarritasuna duen sistema baterako:

$$MAC(r, q) = \frac{|\{\psi_A\}_r^T \{\psi_X^*\}_q|^2}{(\{\psi_A\}_r^T \{\psi_A^*\}_r)(\{\psi_X^*\}_q^T \{\psi_X^*\}_q)} \quad (29)$$

Kalkulu honen emaitza zenbaki erreal bat izango dela antzeman daiteke.

2.5.2 AutoMAC-a

AutoMAC-a egiteko BK Connect Softwarea erabili izan da. *Analisis* › *Vector Comparison* › *AutoMAC* barruan sartu eta bertan inportatu egin dira ANSYS-etik lortutako bibrazio moduak eta geometria.

Hurrengo atalean azalduko den moduan, bi saiakuntza egin dira. Alde batetik, geometria osoa eta hari dagokion moduen taula, sinplifikaziorik gabekoak, alegia, eta bestetik, dezimatutako geometria eta moduak.

2.5.3 MAC-a

AutoMAC-a egin ostean dezimatutako informazioarekin eta analisi esperimentaletik lortutakoaren artean korrelazioa egin izan da.

Korrelazioa egiteko *Analisis* › *Vector Comparison* › *CrossMAC* barruan sartu eta bertan inportatu egin dira konparatu nahi diren ANSYS-etik lortutako bibrazio moduak eta geometriak.

Prozesu honetan lortutako emaitzak ere, hurrengo atalean azalduko dira.

2.6 Emaitzen deskribapena

Aurretiaz esan bezala, MAC-aren balioak 0 eta 1 bitartean egon beharko dira. 0 zenbakiak bektoreen trinkotasun eza adierazten du. Honen arrazoiak, besteak beste, honako hauek izan daitezke:

- Sistema iragankorra izatea. Ez-linealtasunen ondorioz baliteke analisi esperimentaletik lortutako inertzia, zurruntasun eta motelgarritasun matrizeak egonkorrak ez izatea, bi datu-multzoak momentu edo kitzikatze maila ezberdinak direla eta.
- Bibrazio moduan zarata izatea.
- Bibrazio moduak linealki independenteak izatea. Nahiz eta MAC-a ortogonalitasunaren adierazlea ez den, 0-tik gertu dauden bibrazio moduak ortogonalak direla ondoriozta daiteke. Hala ere, hau hurbilpen bat besterik ez da, masa eta zurruntasun matrizeak ez baitira kalkulan kontuan hartu.

Bestalde, MAC-a 1 inguruan egoteak bektore bien arteko trinkotasuna handia dela adierazten du. Ez du esan nahi zuzenak direnik, bi bektoreen artean korrelazio maila handia dagoela baizik. Fenomeno honen arrazoiak hauek izan litezke:

- Bibrazio modu ezberdinen artean ezberdintzeko askatasun gradu nahikorik ez izatea.
- Bibrazioak aztertutako arrazoietatik kanpo dagoen indar baten ondorioz sortuta egotea.
- Neurtutako bibrazio moduak zarata koherentea izatea gehienbat.
- Bi bektoreak bektore modal bera eskala ezberdinetan izatea.

Hortaz, bi bektoreen trinkotasuna bermatu daiteke baldin eta soilik baldin lehen hiru arrazoiak baztertu badaitezke. Izan ere, MAC-ak trinkotasuna adierazi egiten du bakarrik eta ez da gai erroreak antzemateko. Hurrengo puntuetan proiektuan lortutako emaitzak azaldu egingo dira.

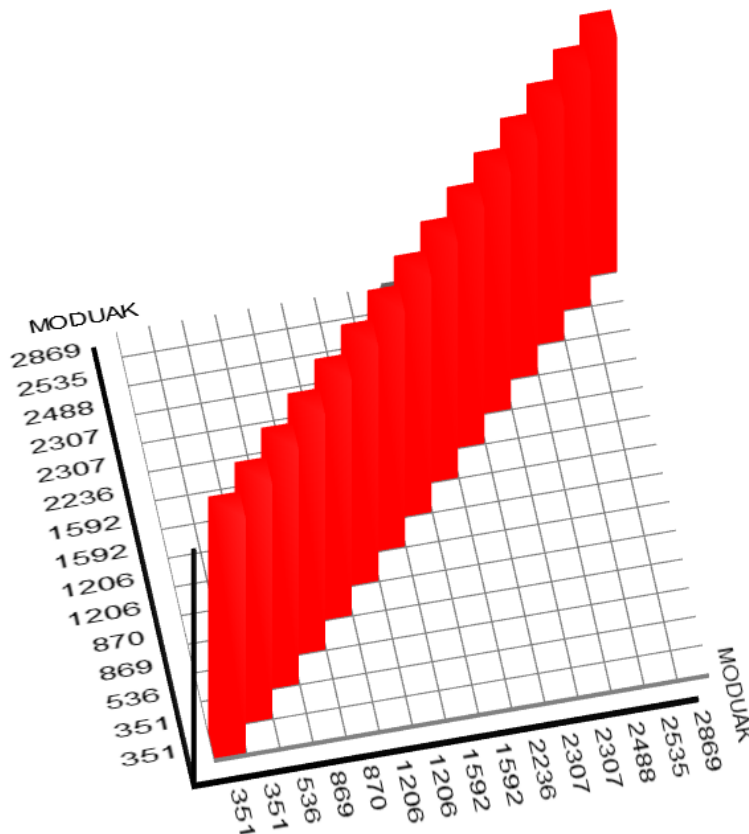
2.6.1 AutoMAC-aren emaitzak

Lehendabizi, analisi teorikotik lortutako datu guztiak (geometria eta bibrazio moduak) BK Connect-ekin ireki egin dira. Geometria osoa erabiliz egindako AutoMac-ean, inolako sinplifikaziorik egin gabe eta modu teorikoan lortutako emaitzak direnez, MAC matrizea diagonal izango da diagonal nagusiko osagaiak bat izanik. (21. Irudia)

AutoMAC: MODUAK		MODUAK														
		351,000	351,000(...	536,000	869,000	870,000	1206,000	1206,00...	1592,000	1592,00...	2236,000	2307,000	2307,00...	2488,000	2535,000	2869,000
	351,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	351,000(1)	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	536,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	869,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
	870,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	1206,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000
	1206,000(1)	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000
	1592,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	1592,000(1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	2236,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000
	2307,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,001	1,000	0,000	0,000	0,000	0,000
	2307,000(1)	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000	0,000
	2488,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000	0,000
	2535,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
	2869,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	1,000

21. Irudia - AutoMAC-aren emaitzak eredu osoarentzat (2D)

Bestalde, MAC-etik lortutako emaitzekin ohikoa den moduan, 3D grafikoa ere lortu daiteke. (22. Irudia)



22. Irudia - AutoMAC-aren emaitzak eredu osoarentzat (3D)

Beste alde batetik, dezimatutako datuak erabiliz gero erdietsitako datuak ezberdinak izango lirateke. Hori da, hain zuzen ere, hurrengo orriko emaitzetan (23. Irudia eta 24. Irudia) ikus daitekeena.

Bertan, matrizeko diagonal nagusiko datuak bat izateaz gain, trinkotasun handiko beste hainbat puntu ere badaude eta gainerakoak, trinkotasun txikikoak izan arren, ez dute balio nulurik.

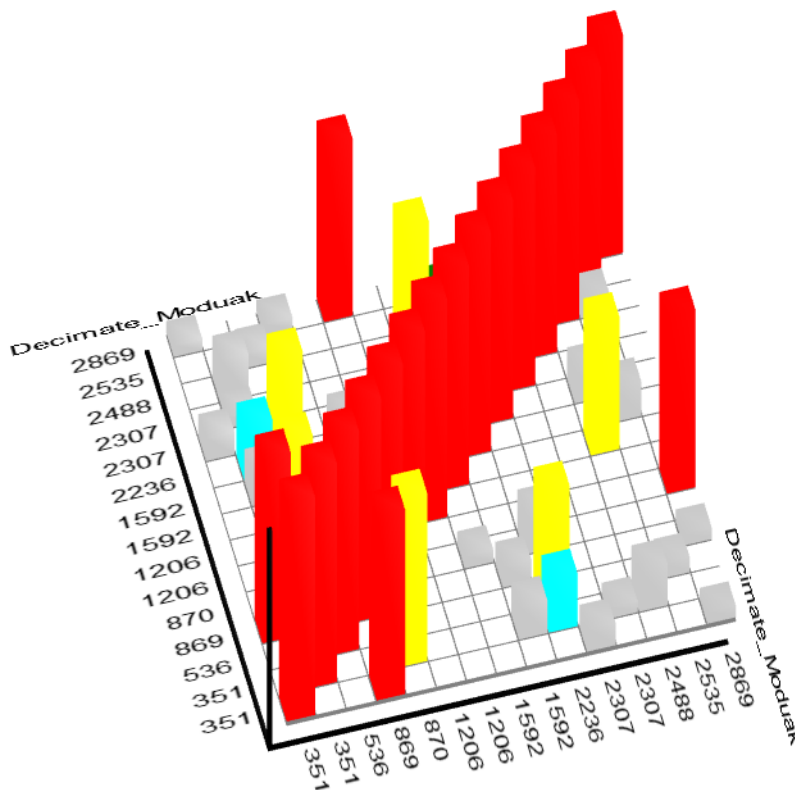
Azaldutako fenomeno hau gertatu egiten da geometria dezimatzean gertatzen den informazio galera dela eta. Izan ere, geometria eta moduei dagokien datu murrizketarekin batera, besteak beste, moduen arteko ortogonaltasun propietatea gal daiteke. Fenomeno honi *spatial aliasing* deritzo.

Beraz, AutoMAC-a dezimatutako datuen fidagarritasuna neurtzeko ere erabili daiteke.

AutoMAC: Decimate_Moduak

		Decimate_Moduak														
		351,000	351,000(...	536,000	869,000	870,000	1206,000	1206,00...	1592,000	1592,00...	2236,000	2307,000	2307,00...	2488,000	2535,000	2869,000
Decimate_Moduak	351,000	1,000	0,008	0,000	0,843	0,047	0,007	0,000	0,011	0,043	0,001	0,102	0,003	0,011	0,028	0,052
	351,000(1)	0,008	1,000	0,021	0,024	0,770	0,001	0,004	0,009	0,150	0,242	0,000	0,051	0,192	0,011	0,003
	536,000	0,000	0,021	1,000	0,004	0,019	0,000	0,001	0,001	0,013	0,527	0,001	0,001	0,016	0,069	0,001
	869,000	0,843	0,024	0,004	1,000	0,000	0,014	0,000	0,003	0,096	0,016	0,013	0,001	0,002	0,000	0,053
	870,000	0,047	0,770	0,019	0,000	1,000	0,000	0,007	0,057	0,032	0,185	0,018	0,021	0,014	0,036	0,006
	1206,000	0,007	0,001	0,000	0,014	0,000	1,000	0,000	0,000	0,040	0,004	0,001	0,000	0,023	0,001	0,812
	1206,000(1)	0,000	0,004	0,001	0,000	0,007	0,000	1,000	0,024	0,027	0,013	0,007	0,000	0,001	0,001	0,020
	1592,000	0,011	0,009	0,001	0,003	0,057	0,000	0,024	1,000	0,003	0,001	0,010	0,005	0,607	0,001	0,002
	1592,000(1)	0,043	0,150	0,013	0,096	0,032	0,040	0,027	0,003	1,000	0,007	0,002	0,021	0,003	0,157	0,013
	2236,000	0,001	0,242	0,527	0,016	0,185	0,004	0,013	0,001	0,007	1,000	0,002	0,001	0,144	0,041	0,012
	2307,000	0,102	0,000	0,001	0,013	0,018	0,001	0,007	0,010	0,002	0,002	1,000	0,019	0,003	0,000	0,000
	2307,000(1)	0,003	0,051	0,001	0,001	0,021	0,000	0,000	0,005	0,021	0,001	0,019	1,000	0,000	0,031	0,000
	2488,000	0,011	0,192	0,016	0,002	0,014	0,023	0,001	0,607	0,003	0,144	0,003	0,000	1,000	0,088	0,032
	2535,000	0,028	0,011	0,069	0,000	0,036	0,001	0,001	0,001	0,157	0,041	0,000	0,031	0,088	1,000	0,000
2869,000	0,052	0,003	0,001	0,053	0,006	0,812	0,020	0,002	0,013	0,012	0,000	0,000	0,032	0,000	1,000	

23. Irudia – Eredu sinplifikatuaren AutoMAC-a (2D)



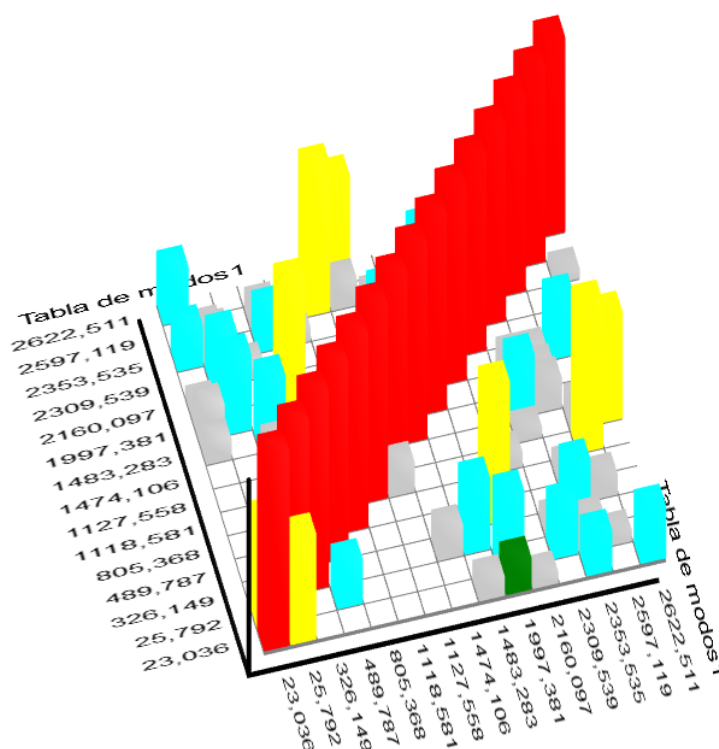
24. Irudia - Eredu sinplifikatuaren AutoMAC-a (3D)

Era berean, AutoMAC-a Analisi Modal Esperimentaleko datuei aplikatu dakieke. Lortutako emaitzak hurrengo irudietan laburbiltzen dira.

Tabla de modos 1

	23,036	25,792	326,149	489,787	805,368	1118,581	1127,558	1474,106	1483,283	1997,381	2160,097	2309,539	2353,535	2597,119	2622,511
23,036	1,000	0,539	0,032	0,042	0,030	0,012	0,018	0,029	0,101	0,162	0,056	0,003	0,205	0,001	0,270
25,792	0,539	1,000	0,005	0,224	0,011	0,012	0,000	0,004	0,000	0,385	0,011	0,265	0,155	0,052	0,018
326,149	0,032	0,005	1,000	0,000	0,007	0,001	0,002	0,151	0,363	0,004	0,015	0,070	0,000	0,003	0,042
489,787	0,042	0,224	0,000	1,000	0,001	0,001	0,001	0,032	0,024	0,706	0,005	0,037	0,209	0,107	0,002
805,368	0,030	0,011	0,007	0,001	1,000	0,011	0,014	0,007	0,001	0,014	0,001	0,006	0,073	0,000	0,000
1118,581	0,012	0,012	0,001	0,001	0,011	1,000	0,148	0,006	0,000	0,048	0,077	0,001	0,000	0,751	0,001
1127,558	0,018	0,000	0,002	0,001	0,014	0,148	1,000	0,043	0,006	0,003	0,002	0,050	0,005	0,129	0,543
1474,106	0,029	0,004	0,151	0,032	0,007	0,006	0,043	1,000	0,014	0,005	0,004	0,303	0,152	0,000	0,005
1483,283	0,101	0,000	0,363	0,024	0,001	0,000	0,006	0,014	1,000	0,024	0,000	0,192	0,098	0,005	0,002
1997,381	0,162	0,385	0,004	0,706	0,014	0,048	0,003	0,005	0,024	1,000	0,003	0,011	0,064	0,306	0,021
2160,097	0,056	0,011	0,015	0,005	0,001	0,077	0,002	0,004	0,000	0,003	1,000	0,003	0,023	0,009	0,043
2309,539	0,003	0,265	0,070	0,037	0,006	0,001	0,050	0,303	0,192	0,011	0,003	1,000	0,019	0,008	0,000
2353,535	0,205	0,155	0,000	0,209	0,073	0,000	0,005	0,152	0,098	0,064	0,023	0,019	1,000	0,049	0,051
2597,119	0,001	0,052	0,003	0,107	0,000	0,751	0,129	0,000	0,005	0,306	0,009	0,008	0,049	1,000	0,014
2622,511	0,270	0,018	0,042	0,002	0,000	0,001	0,543	0,005	0,002	0,021	0,043	0,000	0,051	0,014	1,000

25. Irudia – Eredu experimentalaren AutoMAC-a (2D)



26. Irudia - Eredu experimentalaren AutoMAC-a (3D)

2.6.2 MAC-aren emaitzak

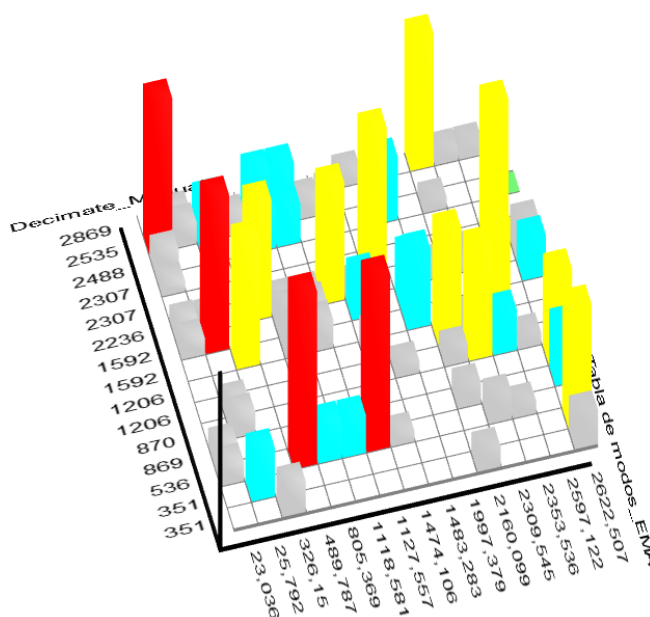
Arestian aipatutako moduan, Modal Assurance Criterion metodoa ANSYS-eko datu teorikoak eta esperimenterki lortutako datuak konparatzeko erabili izan da. Kasu honetan lortutako korrelazio matrizea (27. Irudia) izango da bibratio modu ezberdinen arteko trikontasun mailaren adierazlea.

MAC cruzado: Tabla de modos_EMA | Decimate_Moduak

Tabla de modos_EMA

	23,036	25,792	326,150	489,787	805,369	1118,581	1127,557	1474,106	1483,283	1997,379	2160,099	2309,545	2353,536	2597,122	2622,507
351,000	0,023	0,003	0,171	0,004	0,032	0,032	0,004	0,001	0,023	0,000	0,113	0,006	0,005	0,023	0,192
351,000(1)	0,000	0,274	0,001	0,002	0,001	0,001	0,002	0,000	0,001	0,001	0,018	0,000	0,011	0,001	0,673
536,000	0,104	0,002	0,004	0,977	0,214	0,214	0,977	0,057	0,016	0,000	0,049	0,144	0,066	0,016	0,023
869,000	0,099	0,005	0,046	0,000	0,019	0,019	0,000	0,013	0,000	0,014	0,116	0,002	0,006	0,000	0,326
870,000	0,005	0,118	0,029	0,003	0,021	0,021	0,003	0,030	0,015	0,002	0,002	0,006	0,000	0,015	0,519
1206,000	0,000	0,072	0,001	0,002	0,034	0,034	0,002	0,008	0,067	0,003	0,089	0,625	0,230	0,067	0,001
1206,000(1)	0,002	0,014	0,024	0,003	0,014	0,014	0,003	0,155	0,003	0,011	0,632	0,128	0,623	0,003	0,002
1592,000	0,002	0,001	0,709	0,004	0,156	0,156	0,004	0,004	0,000	0,428	0,001	0,003	0,000	0,000	0,031
1592,000(1)	0,093	0,869	0,023	0,003	0,142	0,142	0,003	0,242	0,001	0,294	0,001	0,035	0,002	0,001	0,229
2236,000	0,079	0,073	0,009	0,660	0,081	0,081	0,660	0,072	0,012	0,006	0,078	0,056	0,111	0,012	0,200
2307,000	0,001	0,000	0,026	0,000	0,002	0,002	0,000	0,000	0,790	0,004	0,006	0,003	0,003	0,790	0,022
2307,000(1)	0,053	0,002	0,013	0,000	0,006	0,006	0,000	0,001	0,005	0,010	0,004	0,019	0,006	0,005	0,011
2488,000	0,115	0,021	0,260	0,029	0,212	0,212	0,029	0,000	0,001	0,351	0,041	0,061	0,019	0,001	0,037
2535,000	0,854	0,119	0,230	0,104	0,327	0,327	0,104	0,124	0,007	0,005	0,012	0,003	0,023	0,007	0,002
2869,000	0,017	0,069	0,022	0,002	0,033	0,033	0,002	0,017	0,073	0,000	0,000	0,748	0,070	0,073	0,039

27. Irudia – MAC-aren emaitzak (2D)



28. Irudia - MAC-aren emaitzak (3D)

Emaitza horietatik bibrazio moduen baliokidetza atera daiteke. Maiztasun naturaleei erreparatzea (4. Taula) nahikoa da analisi bien arteko ezberdintasunak antzemateko.

	Maiztasun teorikoak	Maiztasun esperimentalak
1	351,09	23,0364
2	351,31	25,79233
3	536,25	326,14986
4	869,96	489,7866
5	870,04	805,36858
6	1206,5	1118,58073
7	1206,6	1127,55707
8	1592,6	1474,10582
9	1592,8	1483,28269
10	2236,7	1997,37862
11	2307,8	2160,09863
12	2307,9	2309,54513
13	2488,8	2353,53555
14	2535,6	2597,12219
15	2869,7	2622,5074

4. Taula - Maiztasun teorikoak eta esperimentalen konparazioa

Esperimentalki lortutako maiztasunak eta modu teorikoan lortutakoak bat egiten ez dutenez, ulergarria da MAC-aren emaitzak diagonalak ez izatea. Izan ere, ikus daitezkeen moduan analisi esperimentalean zenbait bibrazio modu lortzeke geratu dira.

Gainera, BK Connect-ek bibrazio modu bakoitza ikertzea ahalbidetzen duenez, euren arteko baliokidetza begi bistaz egiteko aukera ere badago. Hala ere, korrelazio minimo bat zehaztuta programak berak automatikoki egiten du. Kasu honetan, zehaztutako korrelazio minimoa 0,65 izan da. (29. Irudia)

Modo A	Frecuencia...	Modo B	Frecuencia...	Amortiguaci...	Ortogonalidad	MAC	Diferencia (...)
2	351	15	2622,50741	0,8025	0	0,673	-647,153
3	536	4	489,7866	0,13513	0	0,977	8,622
3	536	7	1127,55707	0,16488	0	0,977	-110,365
8	1592	3	326,14986	0,12957	0	0,709	79,513
9	1592	2	25,79233	11,32621	0	0,869	98,38
10	2236	4	489,7866	0,13513	0	0,66	78,095
10	2236	7	1127,55707	0,16488	0	0,66	49,573
11	2307	9	1483,28269	0,0978	0	0,79	35,705
11	2307	14	2597,12219	0,80607	0	0,79	-12,576
14	2535	1	23,0364	10,955	0	0,854	99,091
15	2869	12	2309,54513	0,45482	0	0,748	19,5

29. Irudia – Bibrazio moduen baliokidetza

Behin baliokidetza eginda dagoela, bibrazio moduen konparazioa egin daiteke. Taulari erreparatuz gero, berehala antzeman daiteke bibrazio modu teoriko batzuk esperimentaleko modu bati baino gehiagori esleitzen zaiola. Kasu horietan, modu bakoitza behatuz baliokidetza egokia lortu beharko litzateke. Hala ere, analisi esperimentaletik lortutako modu batzuk euren artean oso antzekoak direnez, baliteke EMA entsegua errepikatu behar izatea, mailuaren mutur gogorrago batekin adibidez (maiztasun gehiago kitzikatu daitezen).

2.7 Planifikazioa

Atal honetan proiektua gauzatzeko orduan jarraitutako planifikazioa azalduko da. Horretarako, Microsoft Project softwarea erabiliz proiektuaren Gantt diagrama sortu da, zeinetan egindako ataza guztiak eta bakoitzaren iraupen hurbildua adierazten diren.

Gantt diagramari dagokionez, ataza bakoitza A letrarekin izendatu da eta mugari garrantzitsuak, berriz, M letrarekin. Gainera, arrazoiak arrazoi, urtean zehar proiektuaren garapenari dagokionez, zenbait geldione egon dira. Hauek ere aipaturiko diagraman jaiegun gisa adierazi dira.

Bertan ikusi daitekeen moduan, proiektua egitean erabilitako denbora hiru atal nagusitan banatu egiten da: diskoaren analisi teorikoa, programa sortzea eta emaitzen korrelazioa.

Hiru ataza horiek garatuz joan ahala, proiektua idatzi eta lortutako emaitzak jasotzen joan da. Hori dela eta, aldibereko ataza gehigarri baten moduan agertzen da.

Hala ere, denbora gutxiagoko ataza batzuk ere beharrezkoak direla ikus daiteke. Hurrengo puntuetan ataza bakoitzaren deskribapen txikia egingo da, ondoren Gantt diagramarekin osotuko direnak.

A1- Hasierako prestakuntzak

Hasierako ataza honi dagokio proiektuaren irismena definitzeko eta beharrezko software-ren instalazioa egiteko adostutako bilerak. Horrekin batera, lehendabiziko informazioaren bilketa egin zen. Honen iraupen hurbildua hiru aste ingurukoa izan da.

A2- Analisi teorikoa

Ataza honen barruan CAD ereduaren prestakuntza, ANSYS programa erabiliz egindako Elementu Finituetako simulazioa eta emaitza teorikoen esportazioa sartuko lirateke. Honen iraupena 15 egunetako izan da eta bukatutakoan, proiektuaren mugarri garrantzitsu bat kokatu da, analisi teorikoa bukatutzat ematen duena, hain zuzen.

A3- Programa idaztea

Aurreko ataza burutu bitartean, programaren kodigoa idazten hasi da UFF motako fitxategiak lortzeko helburuarekin. Horretarako, Fortran programazio lengoia erabiltzen ikasteko eta programa bera idazteko erabilitako denbora aintzat harturik, bi hilabete inguruko iraupena izan du.

Ataza honen ostean, beste mugarri garrantzitsu bat jarri da, Formatu Unibertsaleko Fitxategiak erdietsitakoan.

A4- Analisi esperimentaleko datuen prestaketa

Analisi esperimentala proiektuaren parte ez den arren, aztertutako datu guztien prestaketa egin da, datu esperimentalak esportatzeko. Ataza hau hiru egunetan zehar luzatu egin da. Ataza honetan datuak maneiatu besterik ez direnez egin, erabilitako baliabide bakarrak BK Connect softwarea izan da.

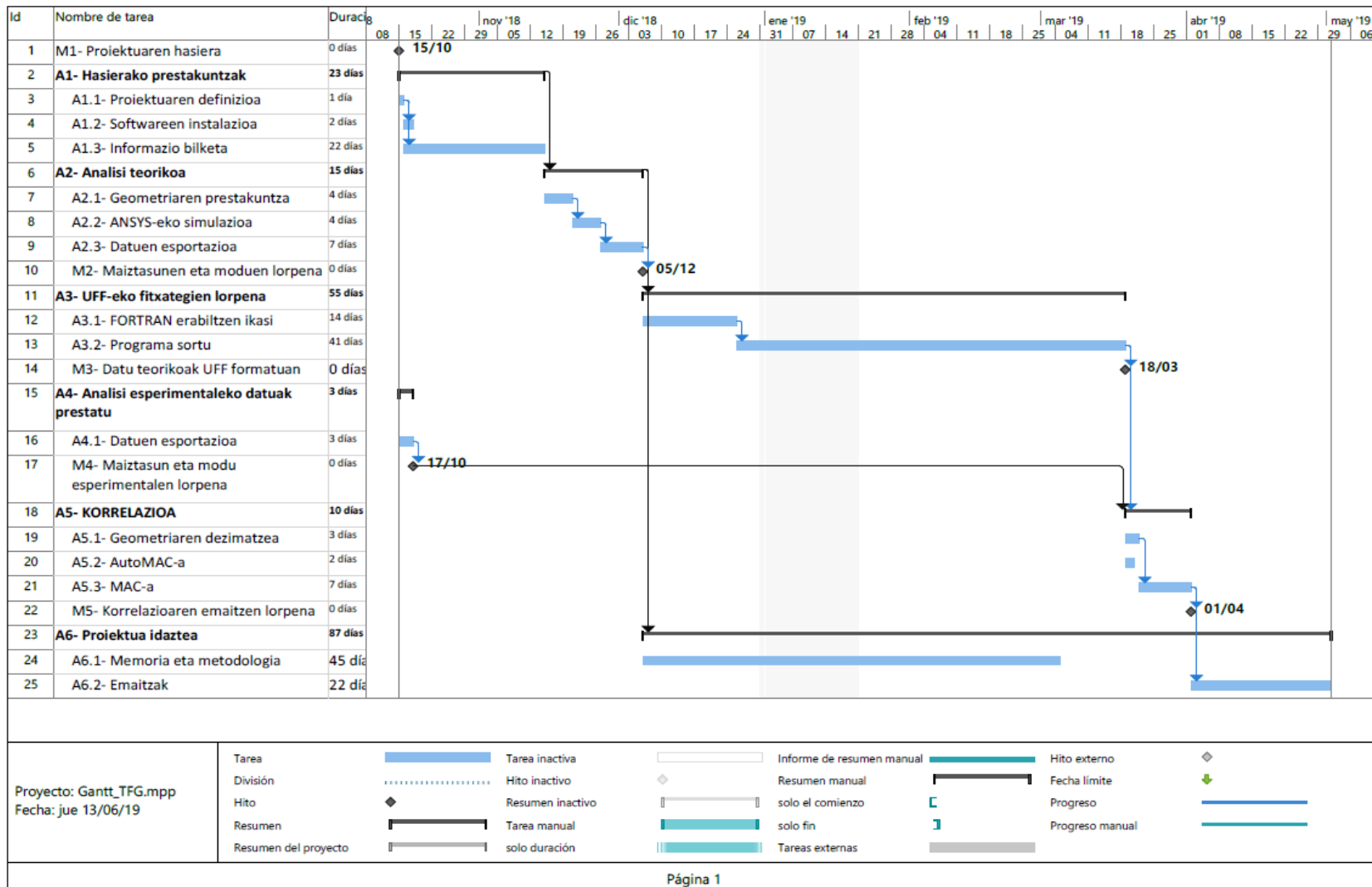
A5- Korrelazioa

Analisi esperimental eta teorikoaren datuak lortu ondoren, AutoMAC-a eta MAC-a egin da. Ataza honetan 10 egun inguru erabili izan dira. Izan ere, emaitzak konparatzeaz gain, antzemandako errorearen konponketari dagokion denbora ere ataza honi esleitu egin zaio.

A6- Proiektua idaztea

Proiektuan egindakoa idazteko erabilitako denbora hurbildua hiru hilabetekoa da. Hala ere, gainerako atazak egitearekin batera egin izan da.

Gantt diagrama (30. Irudia) osatzeko, III. Eranskinean planifikaziorako erabilitako taula (9. Taula) erantsi egin da. Bertan, ataza bakoitzari dagokion datak eta iraupenez gain lehentasunak ere ageri dira.



30. Irudia - Gantt diagrama

3. ALDERDI EKONOMIKOAK

Atal honetan, proiektu honen alderdi ekonomikoak aztertu egingo dira. Horretarako, Gradu Amaierako Lanean erabilitako barne orduak, amortizazioak eta gastuak kontuan izanik, hurrengo aurrekontu hurbildua egin da.

Aurrekontuan kontuan izan beharreko lehendabiziko kontzeptua barne-orduei dagokiena da, hau da, ikasleak (ingeniari hasiberria) eta irakasleak (ingeniari aditua) lanari eskainitako ordu kopurua (5. Taula).

BARNE-ORDUAK			
Kontzeptua	Orduak (h)	Kostua (€/h)	Guztira
Ingeniari hasiberria	180	30	5.400 €
Goi ingeniari aditua	25	50	1.250 €
Azpitotala			6.650 €

5. Taula – Barne-orduak

Amortizazioetan, berriz, proiektuan erabilitako aktiboak sartu dira. Hauek, nahiz eta lana bukatutakoan erabiltzen jarrai daitezke, bertan erabiltzeagatik duten balio galera hartu behar da kontuan (6. Taula). Amortizazioen kalkulurako, aktiboen hasierako balioa, zati bizitza erabilgarria bider proiektuan erabilitako denbora eginez kalkulatu behar dira. Hau da:

$$Amortizazioak = Hasierako Balioa \times \frac{Erabiltze Denbora}{Bizitza Erabilgarria} \quad (30)$$

Taula honetan sartu beharreko proiektu honen aktibo finakoak ordenagailu lizentziak eta ordenagailua bera dira. Lizentzien bizitza erabilgarria urte batekoa suposatuta da, unibertsitateak urtero beritu behar dituela suposatuz. Erabiltze denbora, berriz, hilabeteetan neurtu egin da. Izan ere, nahiz eta proiekturako erabilitako denbora txikiagoa izan, zenbait hilabeteetan luzatu da. Ordenagailua, berriz, sei urte inguruko bizitza erabilgarria izanik, proiektuaren iraupen guztian zehar erabili den tresna izan da. Hortaz, erabilera denbora 10 hilabete ingurukoa jarri da.

AMORTIZAZIOAK				
Kontzeptua	Erabilera (hilabeteak)	Hasierako kostua	Bizitza erabilgarria (hilabeteak)	Guztira
ANSYS lizentzia	2	25.000 €	12	4.166,67 €
BK Connect Lizentzia	3	2.000 €	12	500,00 €
Microsoft office Lizentziak	10	230 €	12	191,67 €
Ordenagailua	10	1.000 €	72	138,89 €
			Azpitotala	4.997,22 €

6. Taula - Amortizazioak

Azkenik, behin erabilia berrerabiltzeko gaitasuna galtzen dituzten atalak, gastuak izeneko taulan laburbiltzen dira (7. Taula).

GASTUAK	
Kontzeptua	Kostua
Idazteko materiala	5 €
Bidaiak	67 €
Azpitotala	72 €

7. Taula - Gastuak

Aurrekontu osoaren laburpena azkeneko taula honetan laburbiltzen dira (8. Taula). Ohar bedi %10-ko kontzeptu gehigarri bat erantsi egin direla proiektuan gerta liratekeen edozein ezustekoei aurre egiteko. Ikus daitekeenez, proiektua gauzatzean estimatutako aurrekontua 12.891,14€-koa da.

LABURPENA	
BARNE-ORDUAK	6.650,00 €
AMORTIZAZIOAK	4.997,22 €
GASTUAK	72,00 €
KOSTU-ZUZENAK	11.719,22 €
Ezustekoak %10	1.171,92 €
TOTALA	12.891,14 €

8. Taula – Aurrekontuaren laburpena

4. ONDORIOAK

Gradu Amaierako Lan honetan analisi dinamiko teorikoa eta esperimentalak konparatzeko metodo bat garatu egin da. Ikusi izan den moduan, bi analisisietatik lortutako maiztasun natural batzuk bat egiten duten arren, bibrazio moduen baliokidetzak egitea ezinbestekoa da konparazio ona egin dadin.

Gainera, analisi hauek egiteko baliabideak oso ugariak diren arren, euren arteko korrelazioa ahalbidetzeko UFF formatuen beharra egoten da askotan. Hortaz, transformatuko diren datu kantitatearen ondorioz, fitxategi hauek sortzeko programa bat behar izaten da.

Proiektu honetan sortutako programak egindako korrelazioa ahalbidetu badu ere, edozein sistema mekanikoren datuak eralda eta antola dezake. Hau da, geometria edozein delarik ere, etorkizunean suerta daitekeen beste edozein analisi modal baten konparaketa egiteko ere erabili daiteke.

Analisi teorikoari esker, sistema mekaniko baten portaera dinamikoa zein izango den aurreikusi daitezke ikusi izan da. Hori dela eta, analisi esperimentalen kopurua murriztu daiteke, analisi modalaren kostuak murriztuz.

Horrez gain, proiektuan zehar ikusi izan den moduan, sinplifikazioak egitean, hau da, geometria dezimatzean, informazioa (ortogonalitasun propietateak, esaterako) galdu egin daiteke. Horregatik, dezimatze prozesu horretan hautatutako nodoak baliagarriak ez izatea gerta daiteke eta, beharbada, saiakuntza ugari egin behar izango dira. Hori dela eta, programaren beste abantaila bat prozesu horren automatizazioa izango da: nahi beste saiakuntza egin daitezke nodo zenbakiak bakarrik aldatuz. Bestalde, datu hauen baliagarritasuna neurtzen duten tresnak existitzen direla ere ikusi da: AutoMAC-a esaterako.

Analisi teoriko eta esperimentalaren arteko korrelazioari dagokionez, berriz, ikusi egin da, enpirikoki lortutako maiztasunak teorikoki lortutakoak baino gutxiago direla. Gainera, bibrazio modu teorikoak argi eta garbi bereiz daitezkeela ikusi egin da. Aitzitik, esperimentalki lortutako artean antzekotasun ugari aurkitu dira, konparazioa zailtzen dutenak. Hori dela eta, MAC metodoaren erabilerak dituen abantailak ere ikusi egin dira.

Proiektuaren garapenari dagokionez, berriz, hasieran definitutako helburuak betetzat joko dira. Alde batetik, analisi modal teoriko eta esperimentalei buruz ikasleak berenganatutako ezagutzak handitu egin dira, xede akademikoei dagokienez. Eta bestetik, lortutako helburu teknikoak proiektua bera egitean eta korrelazioko emaitzak aztertutakoan.

5. BIBLIOGRAFIA

- [1] M. Kothari, «Disk Brake (Part 4) – Working Principle, Advantages and Disadvantages & Maintenance Tips | BikeAdvice.in». [Sarean]. Available at: <https://bikeadvice.in/disk-brake-part-4-working-principle-advantages-disadvantages-maintenance-tips/>. [Eskuratua: 20-martx-2019].
- [2] «Brake Disks». [Sarean]. Available at: https://ru.bosch-automotive.com/en/parts_and_accessories/service_parts_1/brakes_1/disk_brakes/brake_disks/brake_disks_1. [Eskuratua: 20-martx-2019].
- [3] «Movimiento “stick-slip” - musiki». [Sarean]. Available at: http://musiki.org.ar/Movimiento_%27stick-slip%27. [Eskuratua: 20-mai-2019].
- [4] D. C eta S. R, «Analysis of the vehicle brake judder problem by employing a simplified source–path–receiver model», *IMEchE Vol.225 PartD*. or. 141–149, 2010.
- [5] A. Hernández, C. Pinto, J. Agirrebeitia, eta V. Petuya, *Dinámica de máquinas*. 2015.
- [6] E. Cárdenas eta L. Medina, «Análisis Modal Operacional en el dominio de la frecuencia: una revisión del estado del arte», 2016.
- [7] D.J.Ewins, *Modal Testing: Theory, Practice and Application*. 2000.
- [8] R. Avilés, *Métodos de análisis para diseño mecánico*. 2003.
- [9] University of Cincinnati Department of Mechanical and Materials Engineering, «Universal File Formats for Modal Analysis Testing — Structural Dynamics Research Lab». [Sarean]. Available at: <http://sdrl.uc.edu/sdrl/referenceinfo/universalfileformats>. [Eskuratua: 22-ots-2019].
- [10] «Lenguaje de Programación FORTRAN». [Sarean]. Available at: <http://www.larevistainformatica.com/FORTRAN.htm>. [Eskuratua: 11-eka-2019].
- [11] R. J. Allemang, «The Modal Assurance Criterion (MAC): Twenty Years of Use and Abuse». .
- [12] M. Pastor, M. Binda, eta H. Tomas, «Modal Assurance Criterion». 2012.

I. ERANSKINA: programaren kodea.

Eranskin honetan, Fortran95 erabiliz sortutako programaren kodea dator:

```

program uff
implicit none
INTEGER ::
moduKop,moduKopurua,nodoKop,i,j,k,luzera,elementuKopI,elementuMotaKop,itx
i
INTEGER :: sinp, decimateKop, lerroa,idecimate,bukaera,z
INTEGER, ALLOCATABLE, DIMENSION(:):: zbk,elementuKop,elementLuzera,
errepikEz
INTEGER, ALLOCATABLE, DIMENSION(:,:):: elementuZerrenda
REAL, ALLOCATABLE, DIMENSION(:,:) :: nodoPosizioa
CHARACTER*30 ::
gorde1,gordeNodoak,izenaX,izenaY,izenaZ,ezGorde,nodoChar,elementuMota,mot
a
CHARACTER*2 :: modua
REAL, ALLOCATABLE, DIMENSION(:,:) ::
desplazamenduakX,desplazamenduakY,desplazamenduakZ
REAL, ALLOCATABLE, DIMENSION(:) :: maiztasunak
LOGICAL :: amaiera, ezIdatzi
INTEGER, DIMENSION(20):: lerroLuzera
INTEGER, DIMENSION(120):: aldaketa

!Zenbat bibrazio modu dauden kalkulatzeko du
moduKop = moduKopurua()

!Dagokion fitxategia irekitzen du.
!Ez aurkitzekotan errorea ematen du.
call erro(moduKop)

!Fitxategia aurrtiaz sortuta badago itxi egiten da eta berri bat ireki.
Open(19,file='MODUAK.unv',status='old',iostat=itxi)
IF (itxi==0) THEN
  CLOSE(19, STATUS='DELETE')
ELSE
  CLOSE(19)
ENDIF
Open(11,file='MODUAK.unv',status='new')
Open(10,file='Nodoak.txt',status='old')

!Nodo kopurua 10 lerroan irakurri behar dira.
DO i = 1, 9
  Read(10,*)

```

ENDDO

!Nodo kopurua gordetzen da textu formatoan
 Read(10,*)gorde1,gorde1,gorde1,gorde1,gordeNodoak

!Integer formatoan gordetzen da
 Read(gordeNodoak,*)nodoKop
 Read(10,*)

!arrayak dimentsionatu egiten dira.
 Allocate(zbk(nodoKop))
 Allocate(nodoPosizioa(nodoKop,3))
 Allocate(maiztasunak(moduKop))
 Allocate(elementuKop(10))
 Allocate(elementLuzera(10))
 elementuKop(1)=0

!Nodo posizioa gordetzen da
 Do i=1,nodoKop

Read(10,*)zbk(i),nodoPosizioa(i,1),nodoPosizioa(i,2),nodoPosizioa(i,3)
 ENDDO

!Elementu kopurua zenbatu behar dira

Read(10,*)
 Read(10,*)
 Read(10,*)
 amaiera=.FALSE.
 Read(10,*)gorde1,elementuMota
 k=2
 DO

IF (amaiera.eqv..FALSE.)THEN
 !adib.: 'C3D20' ateratzen du
 call elementuMotaIrakurri(elementuMota)
 !adib.: aurreko motatik 20ko luzera da emaitza
 call elementuLuzera(elementuMota,luzera)
 elementLuzera(k-1)=luzera
 !elementu mota horretatik zenbat elementu dauden
 call elementuKopurua(elementuKopI,mota,amaiera)
 elementuMotaKop=k-1
 elementuKop(k)=elementuKopI
 elementuMota=mota
 k=k+1

ELSE

EXIT

ENDIF

```

ENDDO
DO I=1, 5
ENDDO

!Datuak irakurtzeko kurtsorea leku egokian kokatu behar da.
rewind 10
DO i = 1, 9
    Read(10,*)
ENDDO
Read(10,*)
Read(10,*)
Do i=1,nodoKop
    Read(10,*)
ENDDO
Read(10,*)
Read(10,*)
Read(10,*)
Read(10,*)gorde1

!Zutabe bakoitzean modu jakin bateko desplazamenduak gordetzen dira
norabide bakoitzean
!i zutabea = i.modua
!j errenkada = j.nodoaren desplazamendua (x,y edo z norabidean)
Allocate(desplazamenduakX(nodoKop,moduKop))
Allocate(desplazamenduakY(nodoKop,moduKop))
Allocate(desplazamenduakZ(nodoKop,moduKop))

!Desplazamenduak gordetzen dira
Do i=1,moduKop

    IF (i<10) THEN
        Write(modua,'(i1)') i
    ELSE
        Write(modua,'(i2)') i
    ENDIF

    !IZENA: moduarenZbk.txt
    izenaX = TRIM(modua)//'x.txt'
    izenaY = TRIM(modua)//'y.txt'
    izenaZ = TRIM(modua)//'z.txt'

    Open(80,file=izenaX,status='old')
    Read(80,*)
    Open(81,file=izenaY,status='old')
    Read(81,*)
    Open(82,file=izenaZ,status='old')

```

```

Read(82,*)

DO j=1, nodoKop
    Read(80,*)ezGorde,ezGorde,ezGorde,ezGorde,desplazamenduakX(j,i)
    Read(81,*)ezGorde,ezGorde,ezGorde,ezGorde,desplazamenduakY(j,i)
    Read(82,*)ezGorde,ezGorde,ezGorde,ezGorde,desplazamenduakZ(j,i)
ENDDO

CLOSE(80)
CLOSE(81)
CLOSE(82)

ENDDO

!Bibrasio maiztasunak gordetzen ditu
Open(12,file='Maiztasunak.txt',status='old')
Read(12,*)
DO i=1,moduKop
    Read(12,*)ezGorde,ezGorde,maiztasunak(i)
ENDDO
CLOSE(12)

!Programa idatzi egiten du

!Sinplifikazioak egin behar izatekotan.
Open(30,file='Decimate_nodoak.txt',status='old',iostat=sinp)
IF (sinp==0) THEN !Fitxategia existitzen baldin bada

    !Aurreko exekuzioko fitxategia ezabatzen da, existitzekotan
    !MODUAK
    Open(38,file='Decimate_Moduak.unv',status='old',iostat=itxi)
    IF (itxi==0) THEN
        CLOSE(38, STATUS='DELETE')
    ELSE
        CLOSE(38)
    ENDF
    Open(31,file='Decimate_Moduak.unv',status='new')
    !GEOMETRIA
    Open(39,file='Decimate_Geometria.unv',status='old',iostat=itxi)
    IF (itxi==0) THEN
        CLOSE(39, STATUS='DELETE')
    ELSE
        CLOSE(39)
    ENDF
    Open(32,file='Decimate_Geometria.unv',status='new')

```

```

!Aldagaien hasieraketa
decimateKop = 0 !Nodo kopurua zenbatzeko (fitxategiaren luzera totala
egia esateko: -1ak ere)
lerroa = 1      !Lerro kopurua zenbatzeko
k = 1          !Lerroaren luzera zenbatzeko

!Sinplifikazioak izango dituen nodo eta lerro kopurua zenbatu
DO
    Read(30,*,IOSTAT=bukaera)idecimate,aldaketa(decimateKop+1)
    !-1 zenbakia izango da lerroa amaitu denaren adierazlea
    IF (idecimate == -1)THEN
        lerroLuzera(lerroa) = k-1
        lerroa = lerroa +1
        k = 0    !Hurrengo lerroa zenbatzen hasteko
    ENDIF
    !Fitxategia bukatzen denean: EXIT
    IF (bukaera<0)THEN
        rewind(30)
        lerroLuzera(lerroa) = k-1
        EXIT
    ELSE
        decimatekop = decimateKop + 1
    ENDIF
    k = k +1
ENDDO
ELSE
    CLOSE(30)
ENDIF
Allocate(errepikEz(decimateKop))

!55. dataset-a
DO i=1,moduKop
    Write(11,'(a6)')'-1'
    Write(11,'(a6)')'55'
    DO k=1, 5
        Write(11,'(40A4)')'NONE'
    ENDDO
    Write(11,'(6I10)')1,2,2,8,2,3
    Write(11,'(8I10)')2,4,0,i
    Write(11,'(6E13.5)')Maiztasunak(i),0.0,0.0,0.0

    DO j=1, nodoKop
        Write(11,'(I10)')zbc(j)

Write(11,'(6E13.5)')desplazamenduakX(j,i),desplazamenduakY(j,i),desplazam
enduakZ(j,i)

```

```

ENDDO

Write(11,'(a6)')'-1'

Write(11,*)
ENDDO

!Sinplifikazioak: Moduak_decimate
rewind(30)
IF (sinp==0) THEN
    DO i=1,moduKop
        DO j=1,decimateKop
            errepikEz(j) = -10
        ENDDO
        Write(31,'(a6)')'-1'
        Write(31,'(a6)')'55'
        DO k=1, 5
            Write(31,'(40A4)')'NONE'
        ENDDO

        Write(31,'(6I10)')1,2,2,8,2,3
        Write(31,'(8I10)')2,4,0,i
        Write(31,'(6E13.5)')Maiztasunak(i),0.0,0.0,0.0

        !errepikatuta ager daitezkeen arren behin bakarrik idatzi
        DO j=1,decimateKop
            Read(30,*)idecimate
            ezIdatzi = .FALSE.
            DO k=1, j
                IF (idecimate == errepikEz(k)) THEN
                    ezIdatzi = .TRUE.
                ENDIF
            ENDDO
            IF (idecimate ==-1) THEN
                ezIdatzi = .TRUE.
            ENDIF
            errepikEz(j) = idecimate

            !Errepikatu gabe daudenak bakarrik idatzi
            IF (ezIdatzi.eqv..FALSE.)THEN
                Write(31,'(I10)')aldaketa(j)

            Write(31,'(6E13.5)')desplazamenduakX(idecimate,i),desplazamenduakY(idecim
            ate,i),desplazamenduakZ(idecimate,i)
            ENDIF
        ENDDO
    ENDDO

```



```

        Write(31,'(a6)')'-1'
        rewind(30)
    ENDDO
ENDIF

DO i=1, decimateKop
    errepikEz(i)=0
endDo
!GEOMETRIARI dagokion fitxategia
IF (sinp==0) THEN
    rewind(30)
    Read(30,*,IOSTAT=bukaera)idecimate
ENDIF

Open (9,file='Geometria.unv',status='old',iostat=itxi)
IF (itxi==0) THEN
    CLOSE(9, STATUS='DELETE')
ELSE
    CLOSE(9)
ENDIF
Open (9,file='Geometria.unv',status='new')

!15.dataseta (nodoak)
Write(9,'(a6)')'-1'
Write(9,'(a6)')'15'
DO i=1, nodoKop

Write(9,'(4I10,1P3E13.5)')i,0,0,0,nodoPosizioa(i,1),nodoPosizioa(i,2),nodoPosizioa(i,3)
ENDDO
Write(9,'(a6)')'-1'

!Sinplifikazioak: Geometria_decimate
IF (sinp==0) THEN
    rewind(30)
    Write(32,'(a6)')'-1'
    Write(32,'(a6)')'15'
    DO i=1, decimateKop
        Read(30,*)idecimate
        ezIdatzi = .FALSE.
        DO j=1, decimateKop
            IF (idecimate == errepikEz(j)) THEN
                ezIdatzi = .TRUE.
            ENDF
        ENDDO
        IF (idecimate ==-1) THEN

```

```

        ezIdatzi = .TRUE.
    ENDIF
    errepikEz(i) = idecimate
    !Errepikatzen ez direnak idatzi
    IF (ezIdatzi.eqv..FALSE.)THEN

Write(32,'(4I10,1P3E13.5)')aldaketa(i),0,0,0,nodoPosizioa(idecimate,1),no
doPosizioa(idecimate,2),&
        nodoPosizioa(idecimate,3)
    ENDIF
    ENDDO
    Write(32,'(a6)')'-1'
ENDIF

Allocate(elementuZerrenda(1,elementLuzera(1)))
!82.dataseta (lerroak)
DO i=1,elementuMotaKop
    DO j=elementuKop(i)+1, elementuKop(i+1)

        Write(9,'(a6)')'-1'
        Write(9,'(a6)')'82'

        !elementu motaren arabera nodo kopurua aldatu egingo da:
        SELECT CASE(elementLuzera(i))
        CASE (20)

Read(10,*)gorde1,elementuZerrenda(1,1),elementuZerrenda(1,2),elementuZerr
enda(1,3),elementuZerrenda(1,4), &
        elementuZerrenda(1,5),
elementuZerrenda(1,6),elementuZerrenda(1,7),elementuZerrenda(1,8),elemen
tuZerrenda(1,9),&
        elementuZerrenda(1,10),elementuZerrenda(1,11),
elementuZerrenda(1,12),elementuZerrenda(1,13),elementuZerrenda(1,14), &
elementuZerrenda(1,15),elementuZerrenda(1,16),elementuZerrenda(1,17),elem
entuZerrenda(1,18),elementuZerrenda(1,19),&
        elementuZerrenda(1,20)
        CASE (15)

Read(10,*)gorde1,elementuZerrenda(1,1),elementuZerrenda(1,2),elementuZerr
enda(1,3),elementuZerrenda(1,4), &
        elementuZerrenda(1,5),
elementuZerrenda(1,6),elementuZerrenda(1,7),elementuZerrenda(1,8),elemen
tuZerrenda(1,9),&
        elementuZerrenda(1,10),elementuZerrenda(1,11),
elementuZerrenda(1,12),elementuZerrenda(1,13),elementuZerrenda(1,14), &

```

```

        elementuZerrenda(1,15)
    CASE (10)

Read(10,*)gorde1,elementuZerrenda(1,1),elementuZerrenda(1,2),elementuZerrenda(1,3),elementuZerrenda(1,4), &
        elementuZerrenda(1,5),
elementuZerrenda(1,6),elementuZerrenda(1,7),elementuZerrenda(1,8),elementuZerrenda(1,9),&
        elementuZerrenda(1,10)
    CASE (8)

Read(10,*)gorde1,elementuZerrenda(1,1),elementuZerrenda(1,2),elementuZerrenda(1,3),elementuZerrenda(1,4), &
        elementuZerrenda(1,5),
elementuZerrenda(1,6),elementuZerrenda(1,7),elementuZerrenda(1,8)
    CASE (6)

Read(10,*)gorde1,elementuZerrenda(1,1),elementuZerrenda(1,2),elementuZerrenda(1,3),elementuZerrenda(1,4), &
        elementuZerrenda(1,5), elementuZerrenda(1,6)
    CASE (4)

Read(10,*)gorde1,elementuZerrenda(1,1),elementuZerrenda(1,2),elementuZerrenda(1,3),elementuZerrenda(1,4)
    END SELECT

    Write(9,'(3I10)')j,elementLuzera(i),0
    Write(nodoChar,*)j
    Write(9,'(80A8)')'Line'//TRIM(nodoChar)

    SELECT CASE(elementLuzera(i))
    CASE (20)

Write(9,'(8I10)')elementuZerrenda(1,1),elementuZerrenda(1,2),elementuZerrenda(1,3),elementuZerrenda(1,4), &
        elementuZerrenda(1,5),
elementuZerrenda(1,6),elementuZerrenda(1,7),elementuZerrenda(1,8),elementuZerrenda(1,9),&
        elementuZerrenda(1,10),elementuZerrenda(1,11),
elementuZerrenda(1,12),elementuZerrenda(1,13),elementuZerrenda(1,14), &
        elementuZerrenda(1,15),elementuZerrenda(1,16),elementuZerrenda(1,17),elementuZerrenda(1,18),elementuZerrenda(1,19),&
        elementuZerrenda(1,20)
    CASE (15)
    
```

```

Write(9,'(8I10)')elementuZerrenda(1,1),elementuZerrenda(1,2),elementuZerr
enda(1,3),elementuZerrenda(1,4), &
        elementuZerrenda(1,5),
elementuZerrenda(1,6),elementuZerrenda(1,7),elementuZerrenda(1,8),element
uZerrenda(1,9),&
        elementuZerrenda(1,10),elementuZerrenda(1,11),
elementuZerrenda(1,12),elementuZerrenda(1,13),elementuZerrenda(1,14), &
        elementuZerrenda(1,15)
CASE (10)
    
```

```

Write(9,'(8I10)')elementuZerrenda(1,1),elementuZerrenda(1,2),elementuZerr
enda(1,3),elementuZerrenda(1,4), &
        elementuZerrenda(1,5),
elementuZerrenda(1,6),elementuZerrenda(1,7),elementuZerrenda(1,8),element
uZerrenda(1,9),&
        elementuZerrenda(1,10)
CASE (8)
    
```

```

Write(9,'(8I10)')elementuZerrenda(1,1),elementuZerrenda(1,2),elementuZerr
enda(1,3),elementuZerrenda(1,4), &
        elementuZerrenda(1,5),
elementuZerrenda(1,6),elementuZerrenda(1,7),elementuZerrenda(1,8)
CASE (6)
    
```

```

Write(9,'(8I10)')elementuZerrenda(1,1),elementuZerrenda(1,2),elementuZerr
enda(1,3),elementuZerrenda(1,4), &
        elementuZerrenda(1,5), elementuZerrenda(1,6)
CASE (4)
    
```

```

Write(9,'(8I10)')elementuZerrenda(1,1),elementuZerrenda(1,2),elementuZerr
enda(1,3),elementuZerrenda(1,4)
END SELECT
Write(9,'(a6)')'-1'
    
```

```

ENDDO
Read(10,*)
ENDDO
    
```

```

!Sinplifikazioak: Geometria_decimate
!Lerroak
IF (sinp==0) THEN
    lerroa = 1
    z=0 !aldagai honekin lerro bakoitzean idatziko diren zenbaki
kopuruaren kontrola
    Write(32,'(a6)')'-1'
    
```

```

Write(32,'(a6)')'82'
Write(32,'(3I10)')lerroa,lerroLuzera(lerroa),0
Write(32,'(80A8)')'Line'//TRIM(nodoChar)
rewind(30)

DO i = 1, decimateKop
    read(30,*)idecimate
    IF (idecimate /= -1)THEN
        Write(32,'(8I10)',advance='no') aldaketa(i)
        z = z+1
    ENDIF
    IF (idecimate==-1) THEN

        !Aurreko lerroaren bukaera
        Write(32,*)
        Write(32,'(a6)')'-1'

        lerroa=lerroa+1

        !Hurrengo lerroaren hasiera
        Write(32,'(a6)')'-1'
        Write(32,'(a6)')'82'
        Write(32,'(3I10)')lerroa,lerroLuzera(lerroa),0
        Write(32,'(80A8)')'Line'//TRIM(nodoChar)
        z=1
    ELSEIF (MOD(z,8)==0) THEN
        Write(32,*)
        z=1
    ENDIF

ENDDO
Write(32,*)
Write(32,'(a6)')'-1'

ENDIF

end program uff

integer function moduKopurua()
    IMPLICIT NONE
    CHARACTER*1 :: norabide
    CHARACTER*2::txtMod
    Integer :: exist
    Character*30 :: izen

```

```

norabide = 'x'
moduKopurua = 0

DO
    ! '1x.txt' izeneko fitxategiak
    ! non, 1=bibrazio modua eta x = norabidea
    moduKopurua = moduKopurua + 1
    IF (moduKopurua<10) THEN
        Write(txtMod,'(i1)') moduKopurua
    else
        Write(txtMod,'(i2)') moduKopurua
    ENDIF
    izen = TRIM(txtMod)//norabide//'.txt'
    Open (70,file=izen, status='old', iostat=exist)
    !irekitako fitxategia existitzen ez bada aurreko zbk azken modua
izan da
    IF (exist == 0) THEN
        CLOSE(70)
    ELSE
        moduKopurua = moduKopurua -1
        CLOSE(70)
        EXIT
    ENDIF
ENDDO

EndFunction

subroutine elementuMotaIrakurri(elementuMota)
    implicit none
    CHARACTER*30 :: elementuMota
    INTEGER :: kokapena,luzera

    luzera = len_trim(elementuMota)
    kokapena = index(elementuMota,'=')
    elementuMota=elementuMota(kokapena+1:luzera)
endSubroutine

subroutine elementuLuzera(elementuMota,luzera)
    implicit none
    CHARACTER*30 :: elementuMota
    INTEGER :: luzera

    SELECT CASE(TRIM(elementuMota))
        CASE ('C3D20')
            Luzera=20
        CASE ('C3D15')

```

```

        Luzera=15
    CASE ('C3D10')
        Luzera=10
    CASE ('C3D8')
        Luzera=8
    CASE ('C3D6')
        Luzera=6
    CASE ('C3D4')
        Luzera=4
END SELECT

```

```
endSubroutine
```

```

subroutine elementuKopurua(elementuKopI,mota,amaiera)
    implicit none
    CHARACTER*30 :: zbk2C,zbk1C,mota
    INTEGER :: zbk1,zbk2,zbk0,elementuKopI,stat
    LOGICAL :: amaiera
    zbk0=-1
    DO
        Read(10,*)zbk1C,mota
        read(zbk1C,*,iostat=stat)zbk1
        IF (TRIM(zbk1c)=='*ELEMENT' .OR. TRIM(zbk1c)=='**' )THEN
            IF (TRIM(zbk1c)=='**')THEN
                amaiera = .TRUE.
            ENDIF
            IF (zbk0+1==zbk2)THEN
                elementuKopI = zbk2
            ELSE
                elementuKopI = zbk0
            ENDIF
            EXIT
        ENDIF
        zbk0=zbk2
        Read(10,*)zbk2C,mota
        read(zbk2C,*,iostat=stat)zbk2
        IF (TRIM(zbk2c)=='*ELEMENT' .OR. TRIM(zbk2c)=='**' )THEN
            IF (TRIM(zbk2c)=='**')THEN
                amaiera = .TRUE.
            ENDIF
            IF (zbk0+1==zbk1)THEN
                elementuKopI = zbk1
            ELSE
                elementuKopI = zbk0
            ENDIF
            EXIT
        ENDIF
    END DO

```

```

        ENDIF
        zbk0=zbk1
    ENDDO

endSubroutine

subroutine erro (moduKop)
    implicit none
    CHARACTER*2 :: modua
    Character*30 :: izenx,izeny,izenz,izenErrorX,izenErrorY,izenErrorZ
    INTEGER :: i,moduKop,errorX,errorY,errorZ

    DO i=1,moduKop
        IF (i<10) THEN
            Write(modua,'(i1)') i
        ELSE
            Write(modua,'(i2)') i
        ENDIF
        izenx = TRIM(modua)// 'x.txt'
        izeny = TRIM(modua)// 'y.txt'
        izenz = TRIM(modua)// 'z.txt'
        izenErrorX = 'ERROREA_'//TRIM(modua)//'x.txt'
        izenErrorY = 'ERROREA_'//TRIM(modua)//'y.txt'
        izenErrorZ = 'ERROREA_'//TRIM(modua)//'z.txt'

        Open (98,file=izenx, status='old', iostat=errorX)
        Close(98)
        Open (97,file=izeny, status='old', iostat=errorY)
        Close(97)
        Open (96,file=izenz, status='old', iostat=errorZ)
        Close(96)

        call erroreaIdatzi(errorX,izenErrorX,modua,'x')
        call erroreaIdatzi(errorY,izenErrorY,modua,'y')
        call erroreaIdatzi(errorZ,izenErrorZ,modua,'z')

    ENDDO
end subroutine erro

subroutine erroreaIdatzi (e,izenError,modua,norab)
    implicit NONE
    INTEGER :: e, erEz
    Character*30 :: izenError
    Character*1:: norab
    Character*2:: modua

```

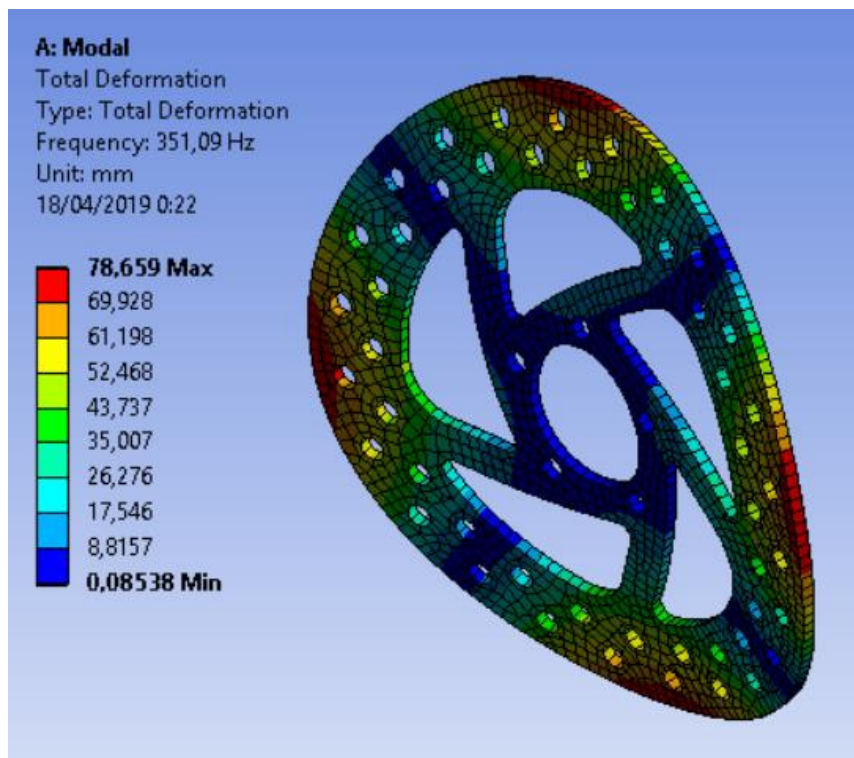


```
!Aurreko ejekuzioan errorenik egongo balitz itxi egingo litzateke
Open (98,file=izenError, status='old', iostat=erEz)
IF (erEz == 0) THEN
    CLOSE(98, STATUS='DELETE')
ENDIF

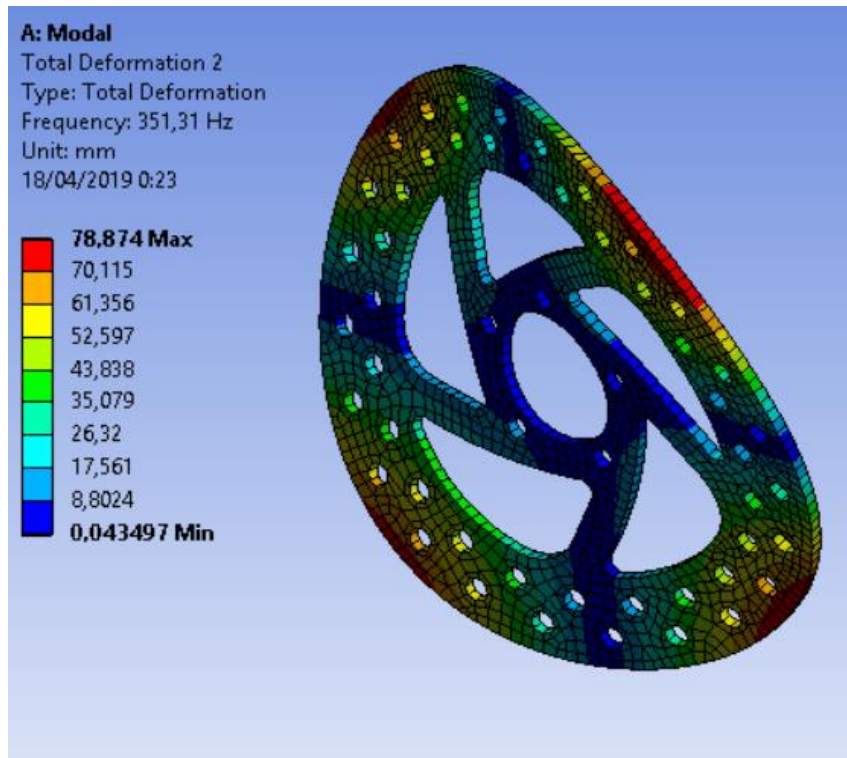
IF (e/=0)THEN
    Open(99,file=izenError, status = 'new')
    Write (99,*) 'Ez da aurkitu '//TRIM(modua)//norab//'.txt izeneko
fitxategirik'
    Close(99)
ENDIF
Close(98)
end subroutine
```

II. ERANSKINA: bibrazio moduak.

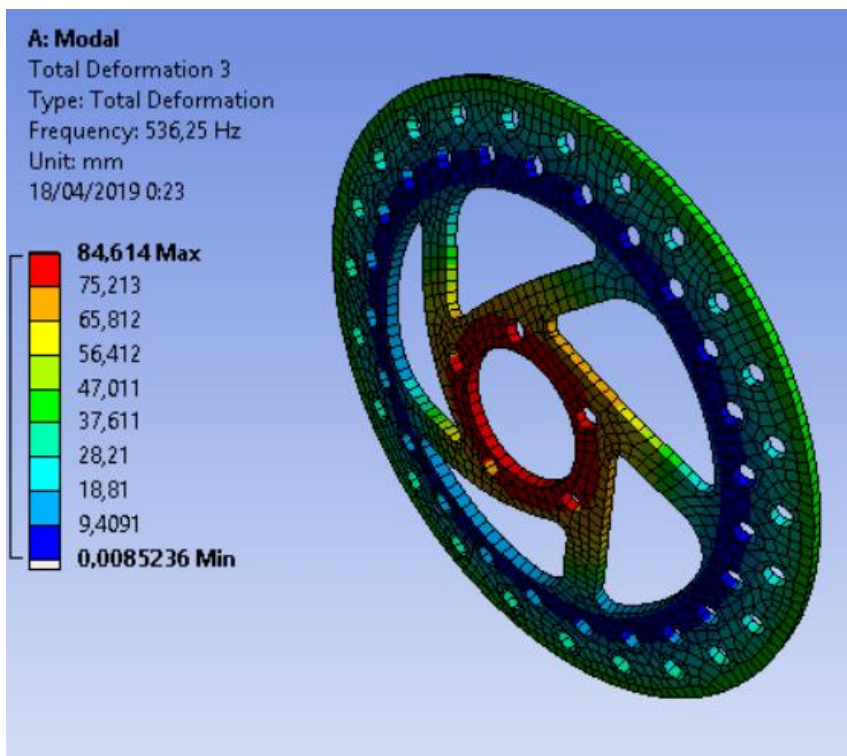
Eranskin honetan analisi teorikotik ateratako emaitzak adieraziko dira, ANSYS-etik lortutakoak, alegia. Irudi bakoitzean, maiztasun natural bakoitzerako diskoaren forma modala ikus daiteke bibrazioaren kokapen orokor batez adierazita.



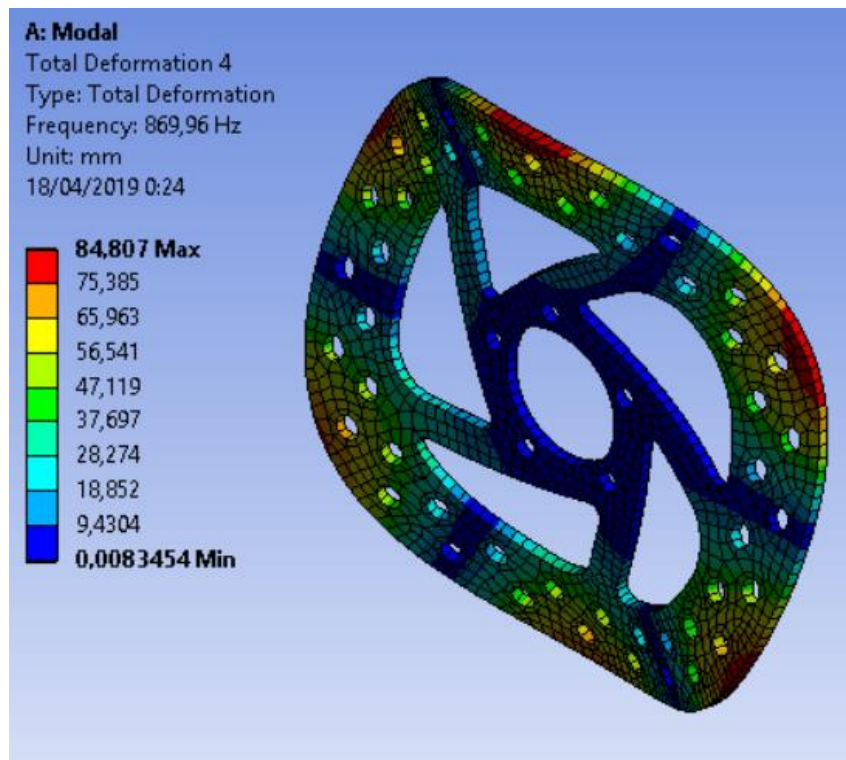
31. Irudia – Diskoaren forma modala 351,09 Hz-etan



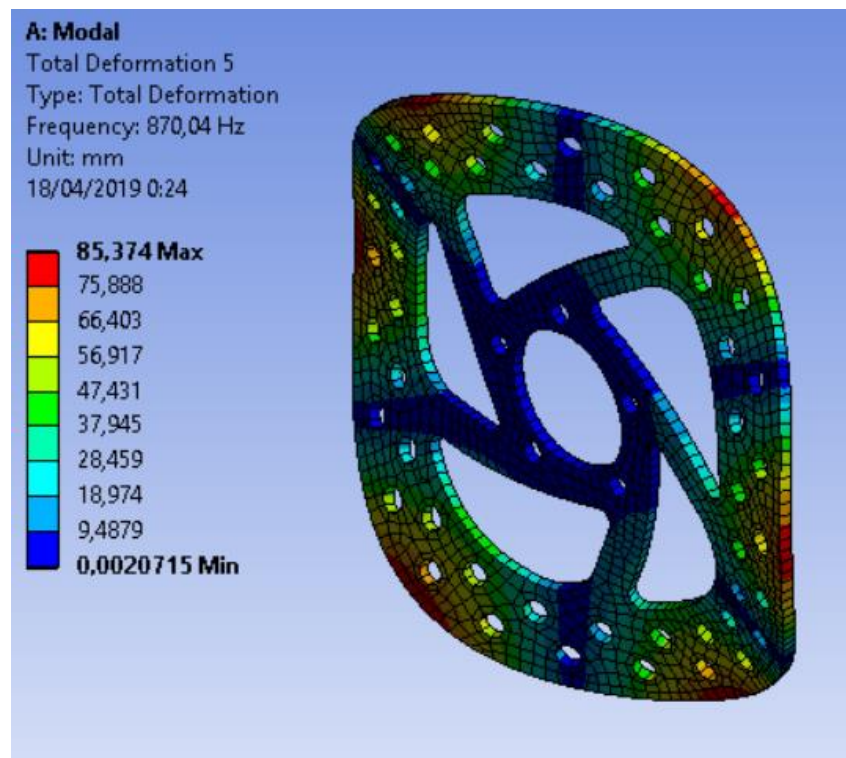
32. Irudia - Diskoaren forma modala 351,31 Hz-etan



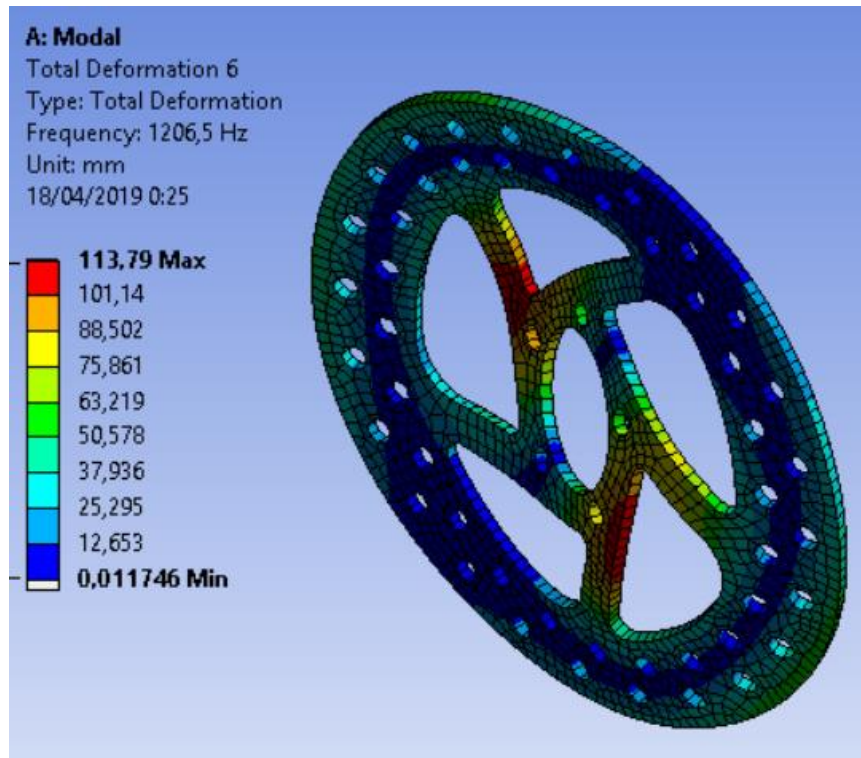
33. Irudia - Diskoaren forma modala 536,25 Hz-etan



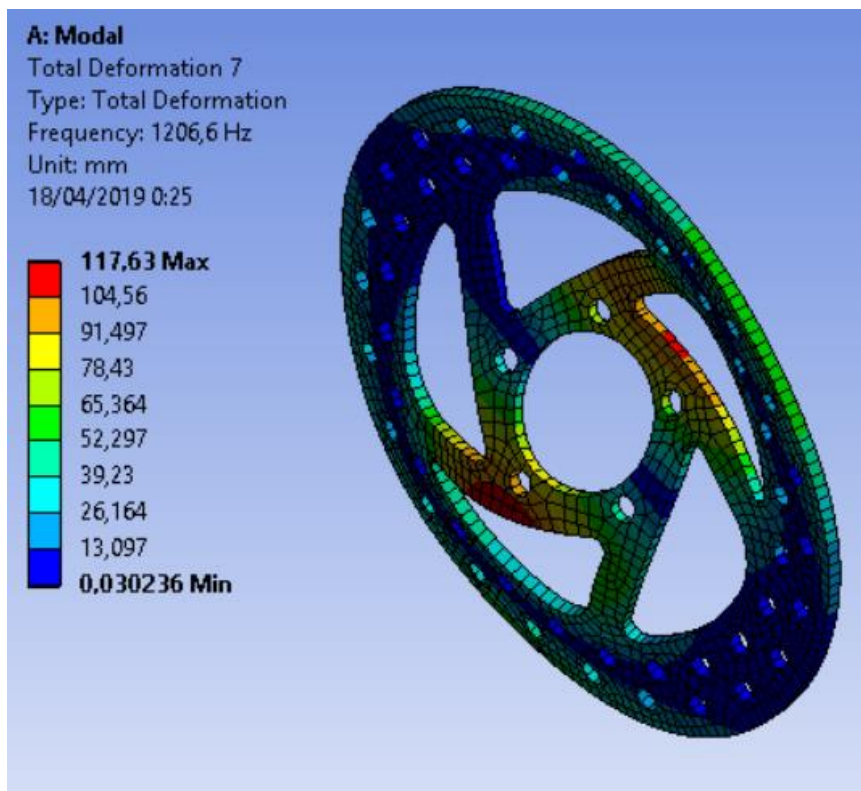
34. Irudia - Diskoaren forma modala 869,96 Hz-etan



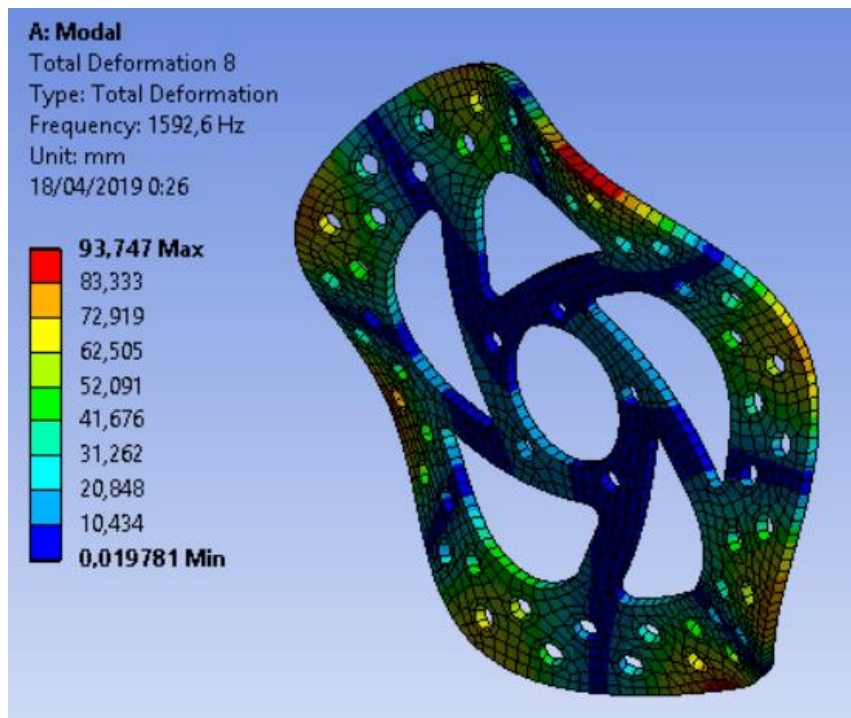
35. Irudia - Diskoaren forma modala 870,04 Hz-etan



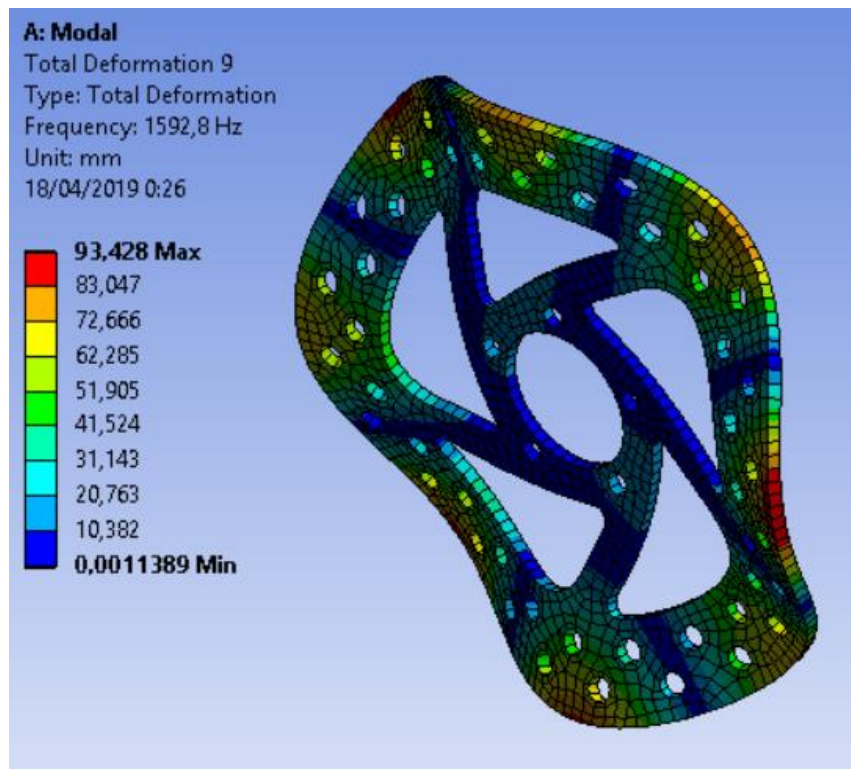
36. Irudia - Diskoaren forma modala 1206,5 Hz-etan



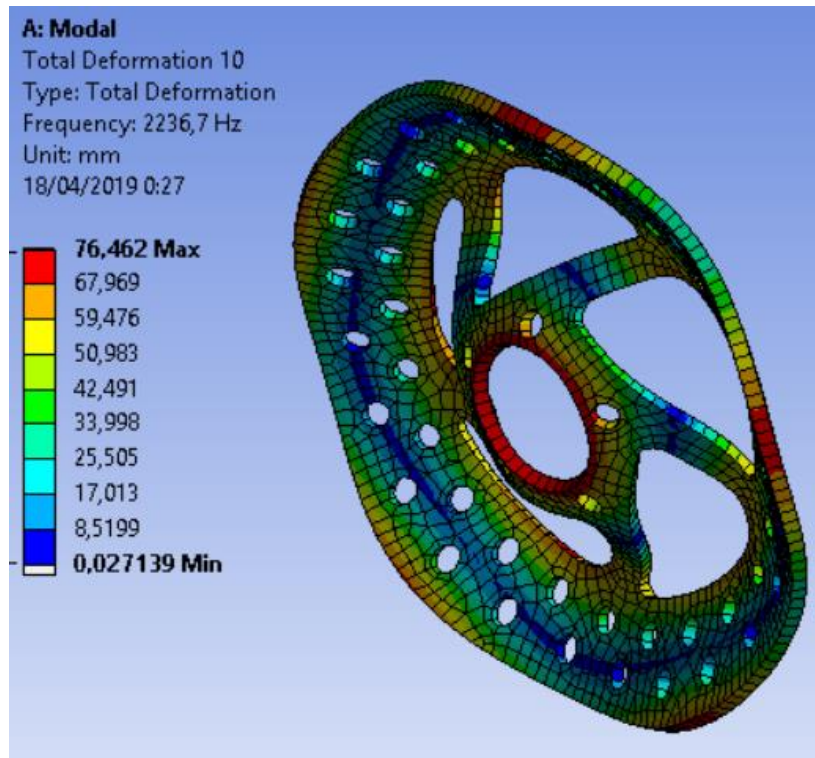
37. Irudia - Diskoaren forma modala 1206,6 Hz-etan



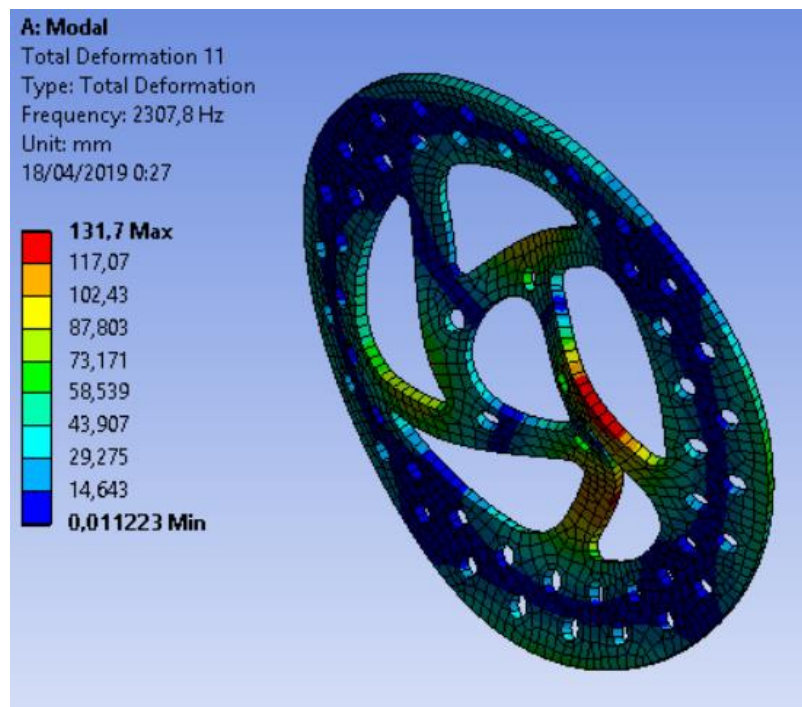
38. Irudia - Diskoaren forma modala 1592,6 Hz-etan



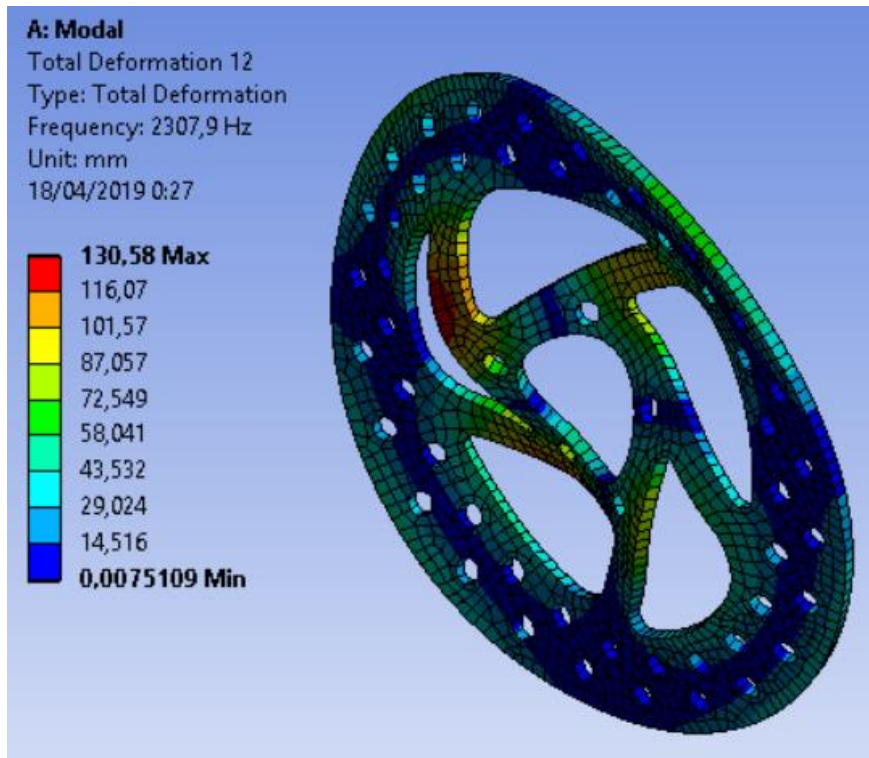
39. Irudia - Diskoaren forma modala 1592,8 Hz-etan



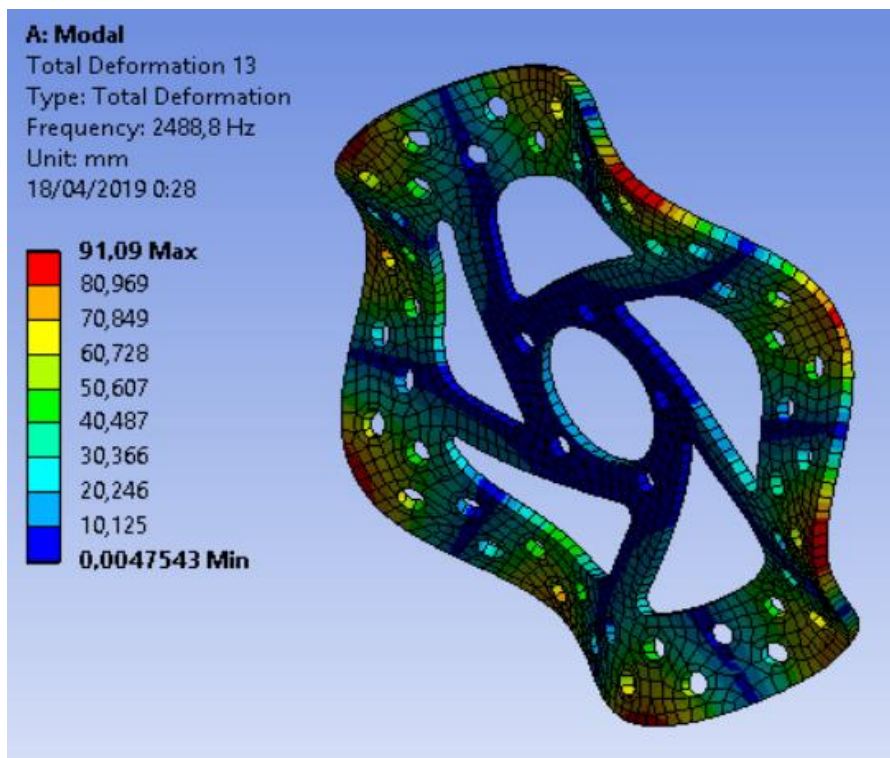
40. Irudia - Diskoaren forma modala 2236,7 Hz-etan



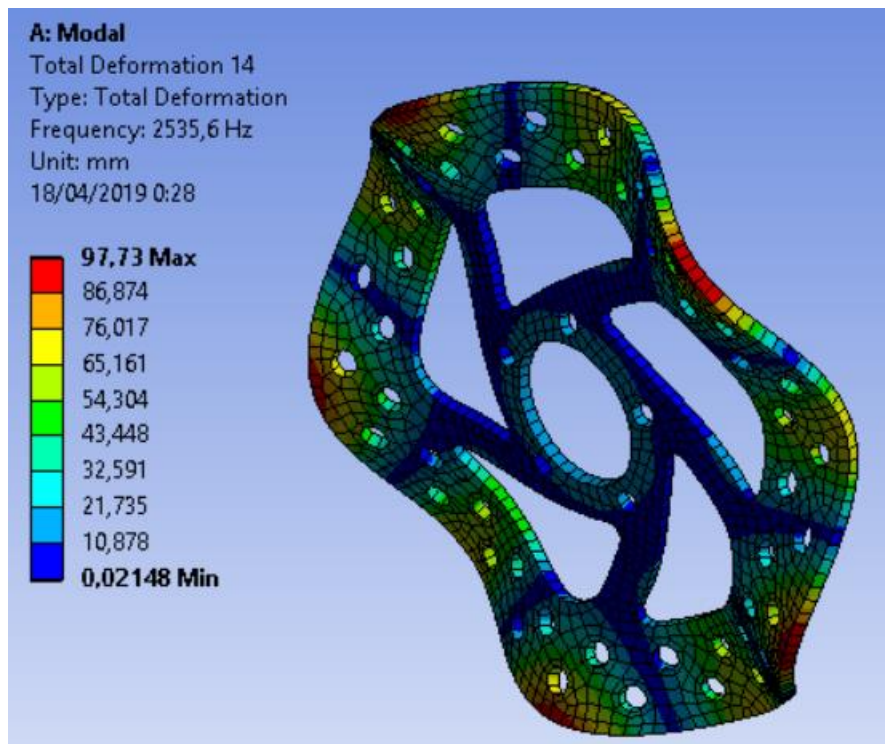
41. Irudia - Diskoaren forma modala 2307,8 Hz-etan



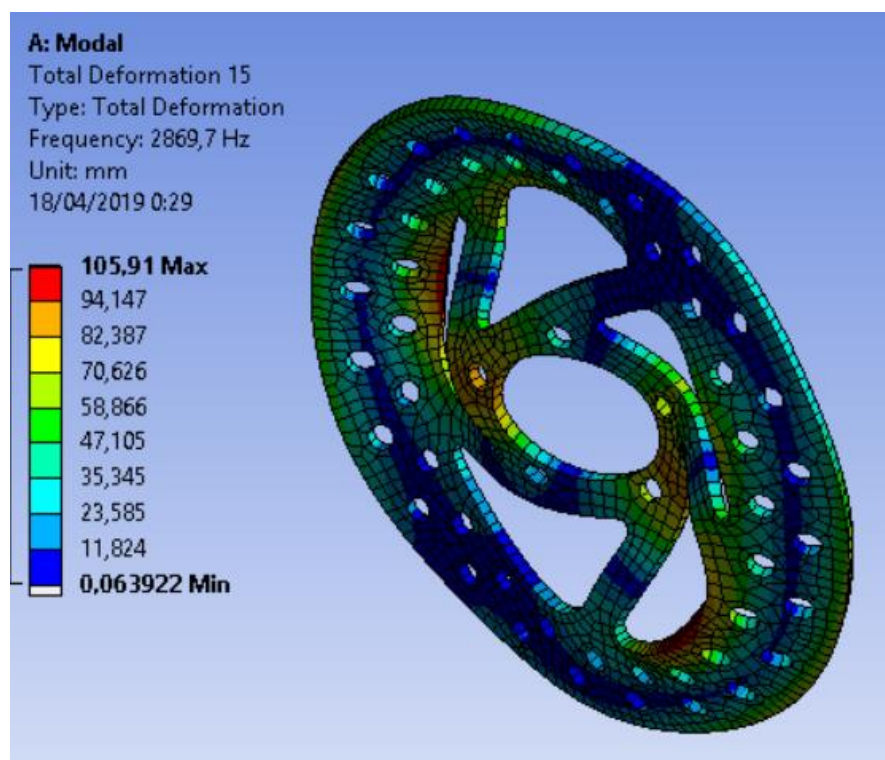
42. Irudia - Diskoaren forma modala 2307,9 Hz-etan



43. Irudia - Diskoaren forma modala 2488,8 Hz-etan



44. Irudia - Diskoaren forma modala 2535,6 Hz-etan



45. Irudia - Diskoaren forma modala 2869,7 Hz-etan

III. ERANSKINA: planifikazioa.

Eranskin honi, planifikazioa osatzeko xedearekin, hurrengo taula erantsi zaio:

ATAZAREN IZENA	IRAUPENA	HASIERA	BUKAERA	LEHENTESIA
M1- Proiektuaren hasiera	0 egun	lun 15/10/18	lun 15/10/18	
A1- Hasierako prestakuntzak	23 egun	lun 15/10/18	mié 14/11/18	
A1.1- Proiektuaren definizioa	1 egun	lun 15/10/18	lun 15/10/18	
A1.2- Softwareen instalazioa	2 egun	mar 16/10/18	mié 17/10/18	A1.1
A1.3- Informazio bilketa	22 egun	mar 16/10/18	mié 14/11/18	A1.1
A2- Analisi teorikoa	15 egun	jue 15/11/18	mié 05/12/18	A1
A2.1- Geometriaren prestakuntza	4 egun	jue 15/11/18	mar 20/11/18	
A2.2- ANSYS-eko simulazioa	4 egun	mié 21/11/18	lun 26/11/18	A2.1
A2.3- Datuen esportazioa	7 egun	mar 27/11/18	mié 05/12/18	A2.2
M2- Maiztasunen eta moduen lorpena	0 egun	mié 05/12/18	mié 05/12/18	A2.3
A3- UFF-eko fitxategien lorpena	55 egun	jue 06/12/18	lun 18/03/19	A2
A3.1- FORTRAN erabiltzen ikasi	14 egun	jue 06/12/18	mar 25/12/18	
A3.2- Programa sortu	41 egun	mié 26/12/18	lun 18/03/19	A3.1
M3- Datu teorikoak UFF formatuan	0 egun	lun 18/03/19	lun 18/03/19	A3.2
A4- Analisi esperimentaleko datuak prestatu	3 egun	lun 15/10/18	mié 17/10/18	
A4.1- Datuen esportazioa	3 egun	lun 15/10/18	mié 17/10/18	
M4- Maiztasun eta modu esperimentalen lorpena	0 egun	mié 17/10/18	mié 17/10/18	A4.1
A5- KORRELAZIOA	10 egun	mar 19/03/19	lun 01/04/19	M4;M3
A5.1- Geometriaren dezimatzea	3 egun	mar 19/03/19	jue 21/03/19	
A5.2- AutoMAC-a	2 egun	mar 19/03/19	mié 20/03/19	
A5.3- MAC-a	7 egun	vie 22/03/19	lun 01/04/19	A5.1
M5- Korrelazioaren emaitzen lorpena	0 egun	lun 01/04/19	lun 01/04/19	A5.3
A6- Proiektua idaztea	87 egun	jue 06/12/18	mié 01/05/19	A2
A6.1- Memoria eta metodologia	45 egun	jue 06/12/18	lun 04/03/19	
A6.2- Emaitzak	22 egun	mar 02/04/19	mié 01/05/19	M5

9. Taula - Planifikazioa, atazen ezaugarriak.