



IKER  
GAZTE  
NAZIOARTEKO  
IKERKETA EUSKARAZ

## V. IKERGAZTE

NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2023ko maiatzaren 17, 18 eta 19a  
Donostia, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:  
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)



Aitortu-PartekatuBerdin 3.0

## INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Deformazio altuko elastomero  
magneto-aktibo baten garapena  
eta karakterizazioa**

*Ainhoa Ugartetxe, Ainara Gomez,  
Joanes Berasategi Arostegi eta  
Mohammed Mounir Bou-Ali Saidi*

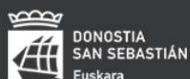
199-205 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.v.03.26>

ANTOLATZAILEA:



BABESLEAK:



LAGUNTZAILEAK:



## **Deformazio altuko elastomero magneto-aktibo baten garapena eta karakterizazioa**

Ainhoa Ugartetxe, Ainara Gomez, Joanes Berasategi, Mohamed Mounir Bou-Ali

*Fluido-mekanika taldea, Mekanika eta ekoizpen Industrialeko departamentua  
Mondragon Unibertsitatea – Goi Eskola Politeknikoa*

ainhoa.ugartetxe@alumni.mondragon.edu

### **Laburpena**

Lan honetan, eremu magnetiko bat aplikatzean deformatzen den elastomero baten garapena eta karakterizazioa egingo da. Elastomeroaren sintesia pausuz-pausu azalduko da garatu diren bi konfigurazioetarako, konfigurazio plano eta zilindrikoa. Gainera, hauek eremu magnetiko batekiko duten erantzuna aztertuko da. Azkenik, materialaren efektu magnetoerreologikoa ezagutzeko konfigurazio planoko elastomeroa erabiliko da eta hainbat eremu-magnetiko aplikatuz bere biltegitratze-moduluaren eta galera-moduluaren aldaketa aztertuko da.

Hitz gakoak: Elastomeroa, magnetoerreologikoa, eremu magnetikoa.

### **Abstract**

*The aim of this work is to develop an elastomer with high deformation capability when a magnetic field is applied. The synthesis of the elastomer will be explained step by step and the response of the two configurations obtained (sheet shape and tubular shape) will be analysed once a magnetic field is applied. Finally, in order to determine the magnetorheological effect of the material, the change on the storage and loss modulus of the elastomer will be analysed applying different magnetic fields.*

*Keywords: Elastomer, magnetorheological, magnetic field.*

## **1. Sarrera eta motibazioa**

Material adimenduen ikerketa gero eta interesgarriagoa bilakatzen ari da industria-arloan. Material adimendua kanpo estimulu bat aplikatzean modu kontrolatu eta itzulgarri batean erantzuteko gai diren materialak dira. Material magnetoerreologikoen (MR) kasuan, hauek eremu magnetiko bati erantzuten dioten material aktiboak dira, bere portaera erreologikoa aldatuz. Material hauek partikula ferromagnetikoz osatuta daude, eta eremu magnetiko bat aplikatzean partikulak zuntz-egitura bat eratzen saiatzen dira, propietate fisikoak aldatuz.

Material MR erabilienak fluidoak eta elastomeroak dira. Fluidoak, egoera likidoan aurkeztzen diren materialak dira, partikula ferromagnetikoz eta likido eramaile batez osatuak. Material MR erabilienak dira, aplikazio garrantzitsuenak frenoetan, baterietan, balbuletan eta indargetzaileetan izanik (Berasategui et al., 2018; Eshgarf et al., 2022).

Elastomeroak, polimero elastiko eta likatsuak dira, molekulek kate luzeak osatzen dituzte eta deformazioak jasan ondoren jatorrizko formara itzultzeko gai dira. Elastomero MR-ak partikula ferromagnetikoz eta matrize elastikoz osatuta daude. Partikula horiei esker, eremu magnetiko bat aplikatzerako orduan materialaren propietate biskoelastikoak aldatzen dira (Díez et al., 2021). Aldaketa hauei efektu MR (Zhou, 2003) deritzo eta materialaren biltegitratze-moduluaren aldaketa bezala definitzen da. Biltegitratze-modulua laginaren gainean egindako indarraren eta honek jasaten duen deformazioaren arteko erlazioa da.

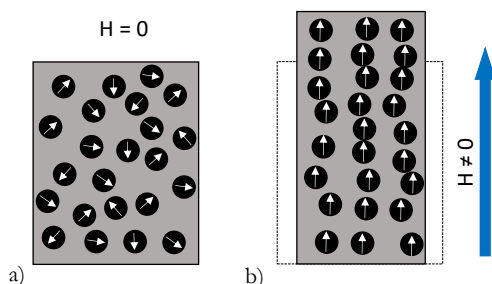
Propietate aldaketa hauek interesgarriak izan daitezke industriaren hainbat aplikaziotan, hala nola bibrazio edo talka-motelgailu eta isolatzaile akustiko kontrolagarrietarako (Díez et al., 2021). Lan honen motibazioa eremu magnetikoa aplikatzerakoan deformazio handiak jasaten dituen material berri bat garatzea eta hau karakterizatzea da.

## 2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

Azterketa honetan, elastomero MR berri bat garatuko da. Elastomero honek aurkezten duen berritasun adierazgarriena eremu magnetiko bat aplikatzerakoan deformazio handiak eta begi bistara nabarmenak dituela da. Elastomeroaren deformazioak erabilitako partikulen propietateen arabekoak dira, magnetikoki bigunak edo gogorrak izan daitezkeelarik.

Magnetikoki bigunak diren partikulak, erraz magnetizatzeke eta desmagnetizatzeke ahalmena dute. Partikula bakoitzak momentu magnetiko bat dauka, aldamenen dagoen partikularekin elkarreragin dipolarra dutelako. Ez dagoenean eremu magnetikorik aplikatuta, partikula guztien momentuak ausaz kokatuta daude, momentu guztien batura zero izanik. Eremu magnetikoa aplikatzerako orduan ordea, partikula guztiak eremu magnetikoaren norabidearekiko orientatzen dira, dipolo-dipolo interakzioa eraginez. Horren ondorioz, partikulak mugitu egiten dira eta elastomeroak bere forma aldatzen du (1.irudia). Propietate hau aurkezten duten elastomeroek industria-arloan hainbat aplikazio izan ditzakete, farmakoen kudeaketa kontrolatua, mikrofluidikarako balbulak, uren arazketa-tratamendua edo robotikarako aplikazioak (A-C Liu et al., 2019; Zhao et al., 2010).

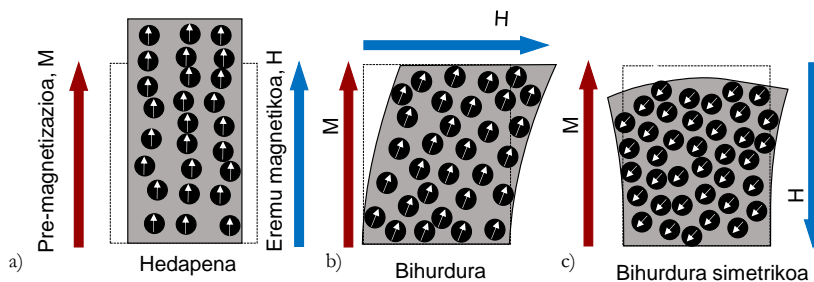
### 1. irudia. a) Magnetizazio biguneko elastomeroa eremu magnetikorik ez dagoenean aplikaturik b) Magnetizazio biguneko elastomeroa eremu magnetikoa aplikatuta dagoenean



Magnetizazio gogorra duten partikulen kasuan ordea, histeresi-magnetikoa bezala ezagututako fenomenoak ematen da. Behin eremu magnetiko bat aplikatu dela, hau kentzerakoan, partikulek magnetizazioa mantentzen dute. Partikulen momentu magnetikoa ez dago ausaz kokatuta eta ondorioz, momentuen batura ez da zero. Partikula hauek dituzten elastomeroetan, hiru deformazio eman daitezke, eremu magnetikoa partikulen momentuarekiko zein norabidetan kokatzen den arabera.

2.a) irudian ikus daitezenez, eremua partikulen momentuen norabide berean aplikatuz gero, partikulak eremuaren norabidean orientatzen dira, materiala hedatuz. Eremua perpendikularri aplikatzen denean ordea, partikulak biratzen saiatzen dira eremuarekin orientatzeko, baina pre-magnetizazioagatik ezin dira guztiz orientatu eta materiala bihurtzen da (2.b) irudia). Azkenik 2. c) irudian adierazitako kasua eman daiteke, non eremu magnetikoa momentuaren norabide berean ematen da, baina kontrako noranzkoan. Kasu honetan partikulak eremuarekin orientatzen dira materialean bihurtura simetrikoa sortuz.

### 2. irudia. a) Magnetizazio gogorreko elastomeroa eremua partikulen momentuen norabide berean aplikatuta b) Eremua partikulen momentuen norabide perpendikularrean kokatuta c) Eremua partikulen momentuen norabide berean aplikatuta baina kontrako noranzkoan



Lan hau, magnetizazio biguneko elastomeroen garapenean zentratuko da. Helburu nagusia, eremu magnetikoa aplikatzean, deformazio handiak dituen elastomero bat garatzea eta bere konfigurazio edo formaren arabera bere portaera aztertzea izanik.

### 3. Ikerketaren muina

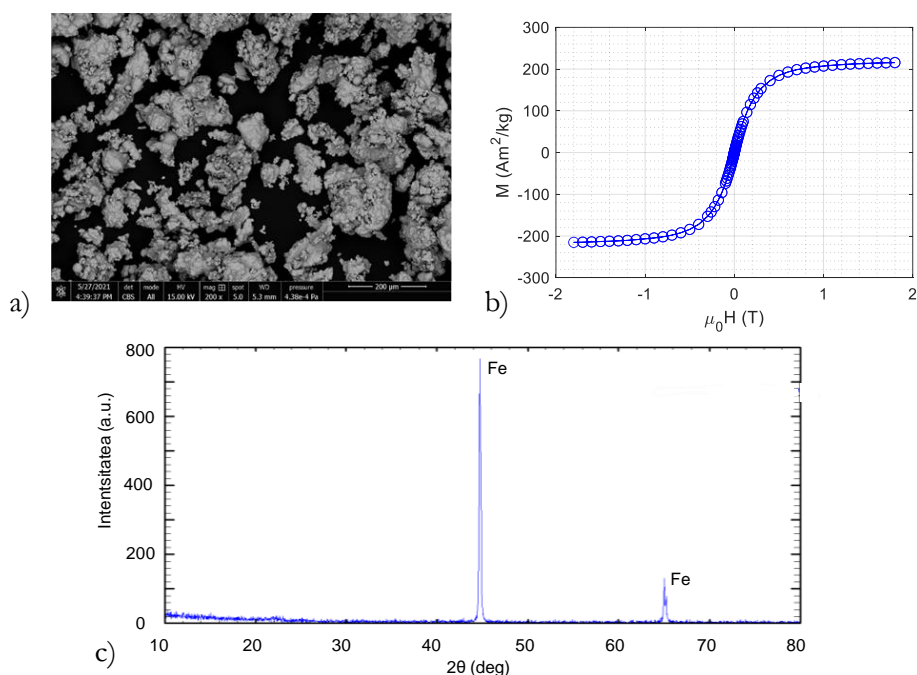
#### 3.1 Materialaren sintesia

Elastomero magneto-aktiboak hiru osagaiak konposatzen dituzte, elastomero matrize elastikoa, partikula ferromagnetikoak eta olioak. Sintesi honetan erabilitako elastomeroa silikona matrizea duen, bi osagaietako Wacker Elastosil® M4644 A/B izan da. A eta B osagaiak nahasterakoan, gogortze prozesua hasten da eta elastomeroa zurruntzen da. Osagai hauek nahasteko, hauen arteko proportzioa kontutan hartu behar da, matrize honen kasuan 10:1 (A:B). Elastosilaren dentsitatea 1,08 g/ml-koa da.

Erabilitako olioak, Xiameter™ PMX-200 silikona olioak izan da, Dow-en eskutik. Olioaren eginkizun nagusia elastomeroaren elastizitatea handitzea eta matrizearen biskositatea txikitzea da. Olio honen dentsitatea 0,96 g/ml-koa da 25 °C-tan.

Azkenik, partikula ferromagnetikoak daude. Elastomero hauen sintesirako erabilitako partikulak 10-200 µm arteko tamainakoak dira 3.a) irudian ikus daitezkeen bezala. 3.b) irudian, partikulen saturazio magnetikoa 215,5 A m<sup>2</sup> kg<sup>-1</sup>-koa dela ikus daiteke. Kasu honetan, magnetizazio biguneko partikulak erabili direnez, ez da inolako histeresi-begiztarik ikusten. Konposizioari dagokionez (3.c) irudia) X izpien difrakzio bidez neurketak egin dira 10° eta 80° arteko balioetan eta 0,02° tarteko eraso-angeluekin. 3.c) irudiari erreparatuz, partikulen konposizioa % 98,86 batean burdinez osatuta dagoela ondoriozta daiteke, hauen dentsitatea 7,65 g/ml-koa izanik.

#### 3. irudia. a) Partikulen tamaina b) Partikulen histeresi-begizta c) Partikulen konposizioa



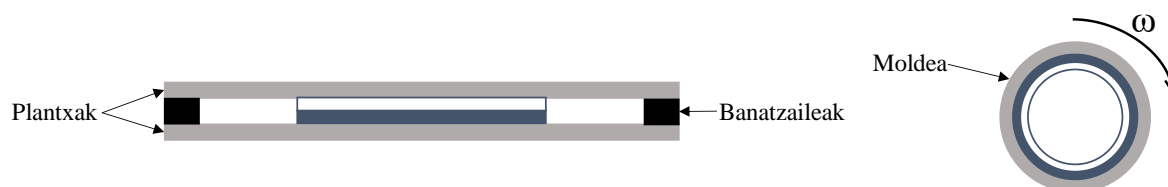
Elastomeroaren partikula kontzentrazioa masan % 60-koa da, eta olioak eta silikonak proportzio bera dute, hau da, masan % 20 olioak eta % 20 elastomero matrizea. Lehenik partikulak eta olioak nahasten dira eta nahasgailu mekanikoan eta ultrasoinutan sartzen da 5 minutu bakoitzeko. Gero, Elastosil® M4644 A osagaia gehitzen zaio nahasketari eta kasu honetan, dena huts-ponpa barruan sartzen da 15 minutu inguru, nahasketa barruan geratutako aire guztia kanporatzen dela ziurtatzeko. Aireak guztiz ez kentzekotan, elastomeroan zuloak sor daitezke,

honen portaera egokia galaraziz. Behin ainerik ez dagoela, Elastosil® M4644 B osagaia gehitzen da, une honetatik aurrera gogortze prozesua hasten da. Nahasketan sortu ahal izan diren burbuilak kentzeko asmoz berriz ere 5 minutuko huts-ponpa ziklo bat aplikatzen da.

Behin nahasketa prest dagoela, elastomeroari eman nahi zaion formaren arabera (konfigurazio plano edo zilindrikoa), prozesu diferenteak jarraitu behar dira. Konfigurazio planoaren kasuan, bi plantxa eta bi banatzaile erabiltzen dira, banatzaileak elastomeroak izango duen lodiera izanik. Nahasketa beheko plantxaren gainean bota eta bereizgailuak kokatu ondoren goiko plantxa kokatzen da. Elastomeroa 24 ordu uzten da estatiko 4.irudian ikus daiteken bezala. Partikulen eta matrizearen dentsitatearen arteko aldea dela eta, gogortze prozesu bitartean, partikula ferromagnetikoak hondoko partean pilatzen dira, bi kapa sortuz.

Konfigurazio zilindrikoa egiteko, nahasketa molde zilindriko batean botatzen da, lortu nahi diren dimentsioak kontutan hartuta (tutuaren lodiera, luzera...). Moldea horizontalki kokatzen da eta bere buruaren gainean 2000 bira minutuko abiadura biratzen jartzen da 24 orduz (4.irudia). Biraketak sortzen duen indar zentrifugoa dela eta, partikulek, dentsitate nagusia dutela, moldearen paretaren kontra gelditzen dira. Horrela, berriz ere bi kapa sortzen dira, kanpoaldekoa partikulekin eta barnekoa matrizearekin.

#### 4. irudia. Elastomeroen sintesia egiteko moldeak konfigurazio planoan zein zilindrikoan

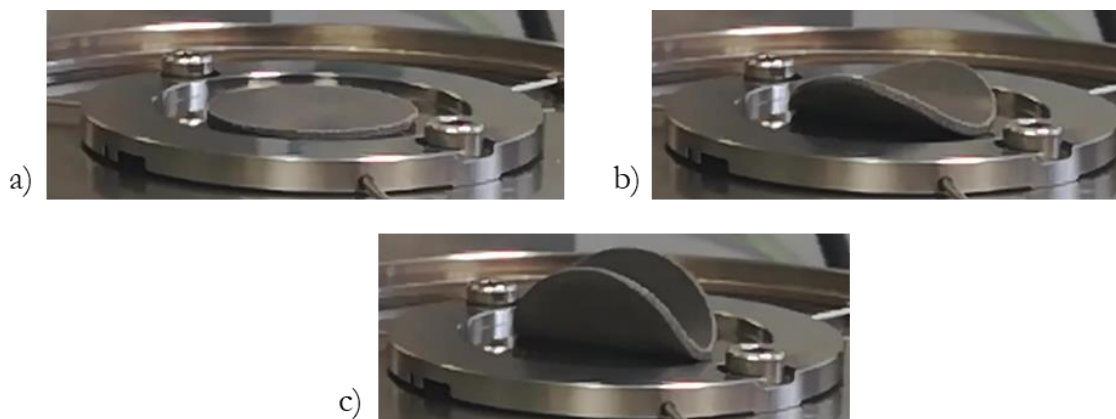


### 3.2 Eredu magnetikoaren eragina

Elastomero magneto-aktiboek deformazioak sufritzen dituzte, aplikatzen diren eremu magnetikoen arabera. Eredu magnetikoaren intentsitatearen eta norabidearen eragina aztertzeko, iman permanenteak eta iman elektromagnetikoa (Anton Paar MCR-501 erreometroa MRD 70/1T zelularekin) erabili dira.

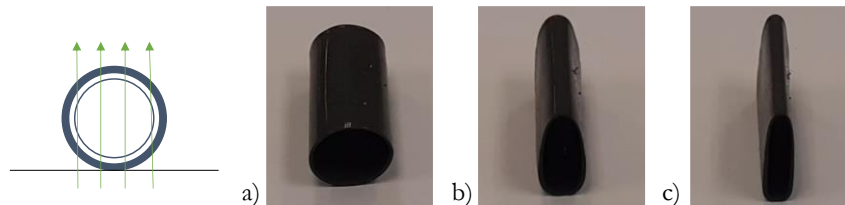
Konfigurazio planodun elastomeroen erantzuna eremu magnetiko batekiko aztertzeko, 20 mm diametroko biribiletan moztu da elastomeroa, eta hainbat intentsitateetako eremu magnetiko aplikatu zaizkio iman elektromagnetikoarekin. 5.a) irudian ikus daitekenez, ez dagoenez eremu magnetikorik aplikatuta, elastomeroak ez du inolako deformaziorik sufritzen. 5.b) c) irudiko egoerei erreparatuz ordea,  $104 \text{ kA m}^{-1}$  eta  $207 \text{ kA m}^{-1}$  intentsitateetako eremuak daude aplikatuta, hurrenez hurren. a) egoerarekiko deformazio bat nabarmen daiteke eta c) kasuan, deformazioa handiagoa dela ere ikusten da. Beraz, elastomeroaren deformazioa aplikatutako eremu magnetikoarekiko proportzionala dela ondoriozta daiteke.

#### 5. irudia. a) Elastomeroa eremu magnetikorik aplikatu gabe b) Elastomeroa $104 \text{ kA m}^{-1}$ -ko eremua aplikatuta c) Elastomeroa $207 \text{ kA m}^{-1}$ -ko eremua aplikatuta

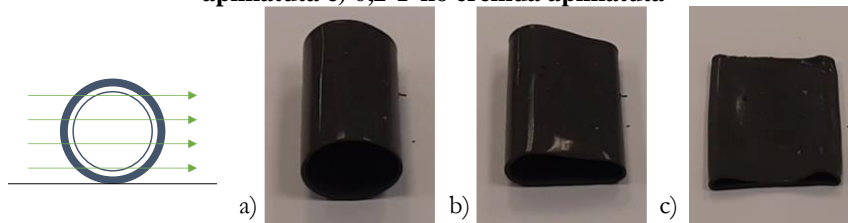


Konfigurazio zilindrikoaren kasuan, iman permanenteak erabili dira. Ere mu magnetikoaren intentsitateaz gain, honen norabideak ere eragina duela ikus daiteke (6.irudia eta 7.irudia). Iman permanenteak erabili direnez, ere mu magnetikoaren intentsitatea aldatzeko, imanaren eta elastomeroaren arteko distantzia aldatzen joan da. Bi kasuetan, ere mu magnetikoaren intentsitatea geroz eta handiagoa izan, tutuaren deformazioa handiagoa izan da. Ere mu magnetikoa aplikatu den norabideari erreparatu, tutua ere muaren norabidean luzatzen dela ikus daiteke (6.c) irudia eta 7.c) irudia), 7.c) irudia kasuan guztiz ixteko kapaz izan arte.

**6. irudia. Ere mu bertikalki aplikatuta a) ere mu magnetikorik aplikatu gabe b) 0,08 T-ko ere mu aplikatuta c) 0,17 T-ko ere mu aplikatuta**



**7. irudia. Ere mu horizontalki aplikatuta a) ere mu magnetikorik aplikatu gabe b) 0,1 T-ko ere mu aplikatuta c) 0,2 T-ko ere mu aplikatuta**



### 3.3 Konportamendu erreologikoa

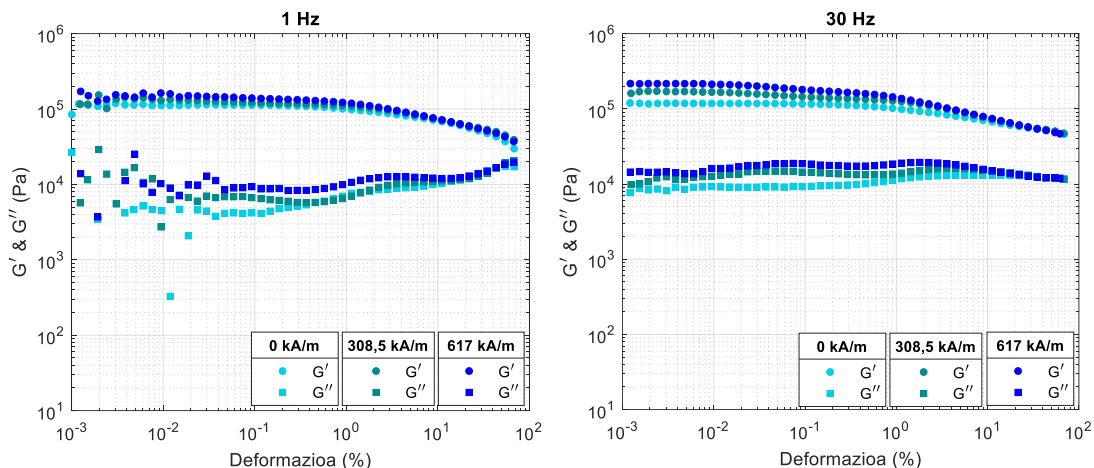
Reologiak material baten jariatortasun- edo deformazio-gaitasuna aztertzen du. Konportamendu erreologikoa, material batek kanpo-indar baten aurrean nola erantzuten duen neurtzen du.

Elastomeroaren konportamendu erreologikoa ezagutzeko, konfigurazio planodun elastomeroa aztertu da erreometroan. Lehenik, elastomeroaren tarte biskoelastiko lineala ezagutu behar da, ze deformazio arte elastomeroak ez duen barne estrukturan apurketarik sufritzen jakiteko. Tarte hau identifikatzeko, % 0,0001 eta % 70 arteko deformazioen artean 60 neurketa egin dira.

Neurketetan zehar, laginaren eta plateraren arteko labaintza saihesteko, 3 N-eko kontaktu indarra aplikatu ohi da, baina elastomeroak, ere mu magnetiko bat aplikatzean duen deformazioaren ondorioz, kasu honetan 13 N-eko kontaktu indarra aplikatu behar izan da. Horrela, elastomeroa platerarekin guztiz kontaktuan dagoela ziurtatuz.

Sei neurketa egin dira, 1 Hz eta 30 Hz-tara, 0 kA m<sup>-1</sup>, 308,5 kA m<sup>-1</sup> eta 616,7 kA m<sup>-1</sup>-tako ere mu magnetikoak aplikatuz frekuentzia bakoitzean. Neurketa bakoitzean elastomeroaren biltegitate-modulua (G') eta galera-modulua (G'') neurtu da 8.irudian ikus daitezkeen erantzunak lortuz. Tarte biskoelastiko lineala, G' eta G'' konstante mantentzen diren deformazioen balioen artean definituko da.

**8. irudia. Biltegitratze eta galera-moduluen aldaketa eremu magnetikoa aplikatzerakoan 1 Hz eta 30 Hz-ra**

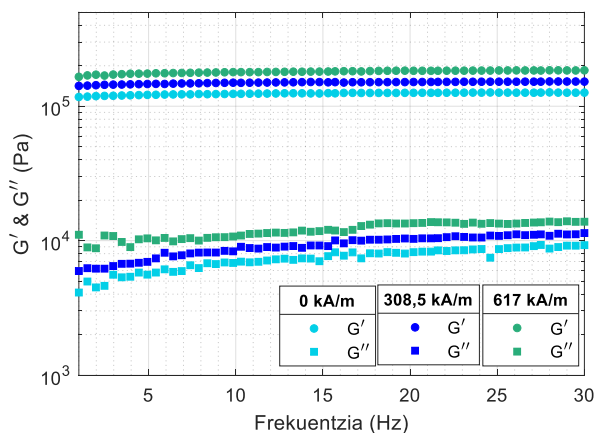


Neurketetan lortutako erantzunei erreparatuz, eremu magnetikorik aplikatu barik, elastomeroaren biltegitratze zein galera moduluek konportamendu lineala dute. Beste alde batetik, eremu magnetikoa aplikatzerakoan, bi moduluek gorakada bat izan arren, elastomeroak ez du portaera linealik erakusten. Beraz, ezin da identifikatu elastomeroaren tarte biskoelastiko lineala identifikatu

Deformazio entseguen egonkortasun ezaren ondorioz, azterketa sakonago bat beharrezkoa da, saiakuntza-baldintza egokiak zeintzuk diren identifikatzeko. Horretarako % 0,01-eko deformazioan neurketak egin dira 1 Hz-tik 30 Hz-ra, 0,05 Hz-ko tarteekin, intentsitate ezberdinetako eremu magnetikoak aplikatuz (0 kA m<sup>-1</sup>, 308,5 kA m<sup>-1</sup> eta 617 kA m<sup>-1</sup>). Deformazioetan lortutako emaitzetatik ezin izan denez tarte biskoelastiko lineala identifikatu, beste ikasketa batzuetan erabilitako deformazioa aukeratzea erabaki da (% 0,01) (Agirre-Olabide et al., 2014).

9. irudian hiru eremu magnetikoen eragina ikus daitezke. Biltegitratze zein galea-moduluek igoera bat sufritzen dute eremu magnetikoaren intentsitatea handitzen doan heinean. Gainera, galera-moduluak maiztasunarekiko gorakada bat ere erakusten du, baina deformazio neurketetan bezala, biltegitratze-moduluak ezegonkortasunak erakusten ditu. Biltegitratze-moduluari erreparatuz, frekuentziarekiko konstante mantentzen dela ikus daiteke, bata bestearekiko independentea izango balitz bezala.

**9. irudia. Biltegitratze eta galera moduluen aldaketa eremu magnetikoa aplikatzean deformazioa % 0,01**



#### 4. Ondorioak

Lortutako emaitzei erreparaturaz, aurkeztutako elastomeroak, asko deformatu daitezke, begibistara nabariak diren deformazioak lortzeko kapaza izan arte. Deformazio hauek aplikatutako eremu magnetikoarekiko zuzenki proportzionalak dira eta eremu magnetikoak duen norabidean deformatzeko joera dute.

Propietate magneto-dinamikoei dagokionez, eremu magnetikoa aplikatzerakoan galera-moduluan ezegonkortasunak ikusten dira. Hala ere, aldaketa handia ikus daiteke biltegitratze zein galera-moduluan. Beraz, elastomeroaren efektu MR-koa altua dela ondoriozta daiteke.

#### 5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Etorkizunerako, hainbat partikulek elastomeroen portaeran duten eragina aztertzea dago helburuen artean. Era berean, partikula kontzentrazioa, edo kapen konfigurazioa aldatzea ere planteatzen da, 10.irudian ikus daitezken hiru kapadun elastomeroak garatuz.

##### 10. irudia. Hiru kapadun elastomeroak



Beste ildo batetik, eremu magnetikoa aplikatzerakoan, partikulak nola mugitzen diren aztertu ahal izateko, matrize ahalik eta elastiko bat garatu beharko da eta partikula kontzentrazioa gutxitu.

#### 6. Erreferentziak

- A-C Liu, J., Gillen, J. H., Mishra, S. R., Evans, B. A., & Tracy, J. B. (2019). Photothermally and magnetically controlled reconfiguration of polymer composites for soft robotics. *APPLIED SCIENCES AND ENGINEERING*. <http://advances.sciencemag.org/>
- Agirre-Olabide, I., Berasategui, J., Elejabarrieta, M. J., & Bou-Ali, M. M. (2014). Characterization of the linear viscoelastic region of magnetorheological elastomers. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 25(16), 2074–2081. <https://doi.org/10.1177/1045389X13517310>
- Berasategui, J., Gomez, A., Martinez-Agirre, M., Elejabarrieta, M. J., & Bou-Ali, M. M. (2018). Magnetorheological damper behaviour in accordance with flow mode. *EPJ Applied Physics*, 84(2). <https://doi.org/10.1051/epjap/2018180182>
- Díez, A. G., Tubio, C. R., Etxebarria, J. G., & Lanceros-Mendez, S. (2021). Magnetorheological Elastomer-Based Materials and Devices: State of the Art and Future Perspectives. In *Advanced Engineering Materials* (Vol. 23, Issue 6). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/adem.202100240>
- Eshgarf, H., Ahmadi Nadooshan, A., & Raisi, A. (2022). An overview on properties and applications of magnetorheological fluids: Dampers, batteries, valves and brakes. *Journal of Energy Storage*, 50. <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.104648>
- Zhao, X., Kim, J., Cezar, C. A., Huebsch, N., Lee, K., Bouhadir, K., & Mooney, D. J. (2010). Active scaffolds for on-demand drug and cell delivery. *PNAS*. <https://doi.org/10.1073/pnas.1007862108/-/DCSupplemental>
- Zhou, G. Y. (2003). Shear properties of a magnetorheological elastomer. *INSTITUTE OF PHYSICS PUBLISHING*. <http://iopscience.iop.org/0964-1726/12/1/316>

#### 7. Eskerrak eta oharrak

Eusko Jaurlaritzari eskerrak eman nahi dizkiogu LHI (PRE\_2021\_2\_0235) bekaren esparruan finantzatzeagatik. Egile guztiek eskertzen dugu Eusko Jaurlaritzaren laguntza finantzarioa MMMfavIN proiektuan (KK-2020/00099 Elkartek programa), Gipuzkoako Foru Aldundiarena Hoztikor proiektuaren esparruan (2022-CIEN-000052-01) eta Ikerketa Taldearen IT1505-22 Programaren esparruan. Egileek J. Gutiérrez irakasleak partikula magnetikoen karakterizazioan egindako ekarpenak ere eskertu nahi ditugu.