



IKER
GAZTE
NAZIOARTEKO
IKERKETA EUSKARAZ

IV. IKERGAZTE NAZIOARTEKO IKERKETA EUSKARAZ

2021eko ekainaren 9, 10 eta 11a
Gasteiz, Euskal Herria

ANTOLATZAILEA:
Udako Euskal Unibertsitatea (UEU)

INGENIARITZA ETA ARKITEKTURA

**Fabrikazio aditibo bidezko sare
egituren eredu analitikoa
zeharkako isotropiarako,**

*Markel Alaña Olivares,
Sergio Ruiz de Galarreta eta
Aitziber López de Arancibia*

99-106 or.

<https://dx.doi.org/10.26876/ikergazte.iv.03.12>



Fabrikazio aditibo bidezko sare egituren eredu analitikoa zeharkako isotropiarako

Alaña Olivares, M., Ruiz de Galarreta, S., López de Arancibia, A.

TECNUN Ingeniaritza Eskola, Manuel de Lardizabal Ibilbidea, 13, 20018 Donostia

malana@tecnun.es

Laburpena

Ekoizpen aditiboaren azken urteetako garapenak egitura konplexuak eskala txikietan sintetizatzea ahalbideratu du, egitura hauen geometriaren kontrol oso altuarekin. Sare egiturak egitura mesoskopikoak dira, habez osatuak, eta hauek moldatu egin daitezke egitura osoak ezaugarri mekaniko jakin batzuk izan ditzan. Hau bereziki erabilgarria da inplante ortopedikoen diseinuan, izan ere, inplantearen eta hezurren arteko zurruntasun ezberdintasunak arazoak sor ditzake inplantea ondo finkatzeko, eta posible da kirurgia gehiagoren beharra izatea. Lan honetan eredu analitiko bat garatu da zeharka isotropikoak diren egiturak diseinatzeko, era honetan dentsitate altuko hezurren (hezur kortikalak) propietate mekanikoak imitatuz.

Hitz gakoak: Fabrikazio aditiboa, sare egiturak, inplante ortopedikoak, eredu analitikoa

Abstract

The development of additive manufacturing in recent years has enabled the production of complex structures at small scales with a very high control of the resulting geometry. Lattice structures are mesoscopic structures formed by beams that can be tailored to obey predefined mechanical properties. This can be particularly useful in the design of orthopaedic implants, since the stiffness difference between the bone and implant causes problems that affect implant fixation and can lead to surgery revision. In this work an analytical model was developed to design transversely isotropic structures, thus mimicking the mechanical properties of the denser bones, e.g. cortical bones.

Keywords: Additive manufacturing, lattice structures, orthopaedic implants, analytical model

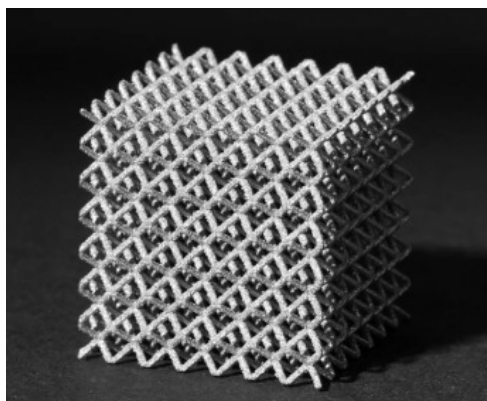
1. Sarrera eta motibazioa

Sare egiturak habez osaturiko egiturak dira, oinarritzko unitate-gelaxka bat erabiliz espazio bat betetzen dutelarik (ikusi 1a Irudia) (Gibson eta Ashby, 1997). Oinarritzko unitate-gelaxka hauek egitura osoaren ezaugarri mekanikoak baldintzatzen dituzte: unitate-gelaxkek habe kopuru ezberdinak, kargarekiko hainbat angelu, eta diametro ezberdinak izan ditzakete (Deshpande *et al.*, 2001).

Ekoizpen aditiboari, eta bereziki *Selective Laser Melting* (SLM) teknologiari esker, konplexutasun handiko metalezko sare egiturak fabrika daitezke gaur egun, eta sektore askotarako prezio lehiakorrean, hala nola aeronautika, industria espaziala eta osasungintzaren alorrean (Maconachie *et al.*, 2019). Honela, posible da eskala mesoskopiko egoiturak era fidagarrian ekoiztea. Eskala mesoskopikoa eskala mikroskopiko eta makroskopikoaren artekoa da. Honela, egiturak begi hutsez ikus badaitezke ere, posible da euren portaera mekanikoa solido homogeen trinko bakar batena bezala aztertzea. Eskala mesoskopikoan ekoiztearen abantaila sare egitura meta-material gisa aztertu daitekeela da. Era honetan sare egiturak beren-beregi diseinatutako propietate mekanikoak dituen material baten gisa jardungo du.

Egitura mota hau bereziki baliagarria da inplante ortopediko berrien garapenean (1b Irudia), egungo inplanteen diseinuan hainbat erronkei aurre egin behar zaielako. Erronka hauetako bat inplantearen eta hezuraren arteko zurruntasun ezberdinak epe erdi eta luzera eragin ditzaken arazoei aurre egitea da. Gorputzeko hezur-ehunak etengabe sortzen eta desegiten dira, osteogenesi eta hezur-erresortzio izeneko prozesuen bitartez, eta bi prozesu hauen arteko orekak berebiziko garrantzia du hezurren funtzionamendu egokia bermatzeko. Osteogenesia hezurra jasaten duen kargaren arabera erregulatzen da, beraz, hezurra ez badu esfortzurik bere gain hartzen, osteogenesi

1. Irudia: a) Sare egitura bidez osatutako kubo (Tancogne-Dejean eta Mohr, 2018b) eta b) sare egitura bidez egindako inplanterako pieza (Perticarini *et al.*, 2015).



(a)

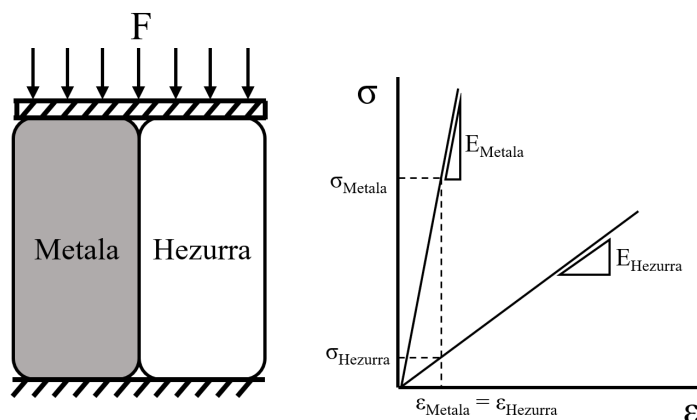


(b)

prozesua moteldu egiten da, eta hezur-erresortzioak ehunaren desagertzea eta hezuraren dentsitate jaitziera eragingo du (Barba *et al.*, 2019; Murr, 2018).

Ohiko inplante ortopedikoak material trinkoz eginak daude. Material erabilienak Ti-6Al-4V eta Co-Cr aleazioak dira eta euren Young-en moduluak 110 GPa eta 210 GPa dira, hurrenez hurren. Hezuraren Young-en moduluak, ordea, gehienez 30 GPa ingurukoa da. Gainera, hezuraren zurruntasuna oso aldakorra da, gutxi gora behera 20 MPa eta 30 GPa arteko hainbat balio har ditzake (Currey, 2013) hezuraren kokapenaren arabera, besteak beste. Honek ondorio nabariak ditu hezurak jasaten dituen esfortzuetan hezur eta inplanteak elkarrekin dihardutenean, 2 Irudian azaltzen den bezala: Hezurak eta inplante zurrunago batek karga jasatean, inplanteak kargaren zati askoz handiago bat jasoko du, hezurari zati txiki bat utziz. Lehen azaldu bezala, hau gertatzean, hezur-erresortzioa emango da, eta hezurak dentsitatea galduko du. Honek pazienteengan minak sor ditzake, eta inplantea askatzera hel daiteke hezur asko galduz gero (Zhang *et al.*, 2020). Sare egiturek hauen oinarritzko materiala baino malguagoak diren piezak sortzea ahalbidetzen dute. Hortaz, biobateragarriak diren Ti-6Al-4V eta Co-Cr aleazioak erabilia inplante malguagoak diseina daitezke. Honetaz gain, pieza porotsuak izanik, hezurra sare egituraren barnerantz hedatu daiteke, hezur-ehun berriak sortuz eta inplante eta hezuraren arteko lotura hobetuz.

2. Irudia: Hezur eta metal arteko interakzioa, eta material bakoitzean sortzen den tentsio eta deformazioa F karga baten eraginpean.



Are gehiago, inplantearen zurruntasunaz gain, bere anisotropia ere kontrolatzea posible da, inplantearen eta hezuraren ezaugarri mekanikoak ahalik eta antzekoenak izan daitezken. Lan honen helburua sare egitura zeharka isotropikoak diseinatzea da. Zeharka isotropikoak diren materialek Young-en modulu bera dute plano bakar bateko norabide guztietan, planoarekiko perpendikularra den norabidean zurruntasun ezberdina dutelarik.

2. Arloko egoera eta ikerketaren helburuak

2.1. Dentsitate erlatiboa

Sare egituren ezaugarri mekanikoak euren dentsitate erlatiboaren arabera dira. Dentsitate erlatiboa ρ/ρ_s edo ρ^* bezala adierazten da:

$$\rho^* = \frac{\rho}{\rho_s} = \frac{V_{lattice}}{V_{total}} \quad (1)$$

Ekuzio honetan $V_{lattice}$ aldagaiak sare egituraren materialak hartzen duen bolumena adierazten du. Bestalde, V_{total} aldagaia egitura osoak hartzen duen bolumena da. Beste era batera, dentsitate erlatiboa, materialaren eta egitura osoaren arteko frakzioa da.

2.2. Homogeneizazioa

Ikertutako sare egiturak eskala mesoskopikoan ekoizten dira eta pieza bakar batean milaka habe egon daitezke. Hori dela eta, habe bakoitza kontuan hartu beharrean, egitura mesoskopikoa meta-material gisa kontsidera daiteke eskala makroskopikoan lan egitean. Honetarako sare egiturari zurruntasun matrize bat esleitzen zaio, egituraren portaera baliokidea duena. Honi homogeneizazio deitzen zaio, egitura bat meta-material homogeneo gisa erduztzen baita.

Gibson eta Ashby (1997)en ereduaren arabera, sare egitura mota bakoitzaren zurruntasun eta erresistentzia hauen dentsitate erlatiboaren berreketa gisa defini daitezke 2 eta 3 ekuazioetan adierazi bezala. Hauetan E_s eta $\sigma_{y,s}$ material solidoaren propietateak dira, E eta σ sare egituraren ezaugarriak direlarik. Honek adierazten du dentsitate erlatiboak sare egituraren eta hau osatzen duen material solidoaren zurruntasun eta erresistentziaren arteko erlazioa definituko duela.

$$\frac{E}{E_s} = C_1 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{n_1} \quad (2)$$

$$\frac{\sigma_y}{\sigma_{y,s}} = C_2 \left(\frac{\rho}{\rho_s} \right)^{n_2} \quad (3)$$

Era honetan, unitate-gelaxka bakarra erabiliz ezaugarri mekanikoen tarte zabalak lortu daitezke habeen konfigurazio berdinerako, euren diametroaren bidez dentsitate erlatibo ezberdinak diseinatuz. Lan honen helburua hezuraren zurruntasun baliokidea duten metalezko sare egiturak diseinatzea da. Zurruntasun maila baliokideaz gain, garatutako eredu analitikoak sare egitura zeharka isotropikoak diseinatzeko ere balio du, hezuraren anisotropia baliokidea lortzeko.

3. Ikerketaren muina

3.1. Zurruntasun-matrizea

Erreferentzia sistema gisa 1, 2 eta 3 norabide ortogonalak erabiliko dira. Honela, diseinatutako egitura zeharka isotropikoa izango da 1-2 planoan. Bestalde, 3 norabidean zurruntasun ezberdina edukiko du, 1-2 planokoarena baino handiagoa. Bi zurruntasun hauen arteko erlazioa diseinuan E_3/E_1 bezala definituriko aldagaia izango da, kontuan izanik 1-2 planoan zurruntasuna E_1 dela edozein norabidetan.

Hasteko zeharka isotropikoa den zurruntasun-matrize orokor bat (C) definitu da 4 Ekuazioan (Tan, 1994). Aldagaiak argiago erakusteko, zurruntasun matrizea malgutasun matrizearen (S) alderantzizko gisa adierazten da:

$$C = S^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{12}}{E_1} & \frac{-\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ & \frac{1}{E_1} & \frac{-\nu_{13}}{E_1} & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{1}{E_3} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{1}{G_{13}} & 0 & 0 \\ sym & & & & \frac{1}{G_{13}} & 0 \\ & & & & & \frac{E_1}{2(1+\nu_{12})} \end{bmatrix}^{-1} \quad (4)$$

Sare egituraren zurruntasun-matrizea lortzeko lehenik eta behin sare egituraren energia kalkulatu beharra dago, deformazioaren menpe. Ezaugarri mekanikoen diseinua ahalbidetuko duen eredu matematiko sinplea lortzeko habeen makurdura eta tortsioa mespretxatu egin dira, esfortzu axialak soilik kontuan hartuz. Honela, egituraren deformazio energia elastikoa (ψ) habe bakoitzaren energiaren batura izango da, 5 Ekuazioak definitzen duen bezala (Tancogne-Dejean eta Mohr, 2018a). E_s material solidoaren Young-en modulua da, V_0 egituraren bolumena, eta $A^{(i)}$, $l^{(i)}$ eta $\varepsilon^{(i)}$ habe bakoitzaren sekzioa, luzera eta deformazio axiala dira, hurrenez hurren. $\underline{\underline{\varepsilon}}$ deformazio tentsore makroskopikoa da, eta $\underline{\underline{n}}^{(i)}$ bektorea i habearen norabidea adierazten duen bektore unitarioa da.

$$\psi(\underline{\underline{\varepsilon}}) = \frac{1}{2} \frac{E_s}{V_0} \sum_{i=1}^{N_{habe}} A^{(i)} l^{(i)} \varepsilon^{(i)^2}, \quad \text{non } \varepsilon^{(i)} = \underline{\underline{\varepsilon}} : (\underline{\underline{n}}^{(i)} \otimes \underline{\underline{n}}^{(i)}) \quad (5)$$

5 Ekuazioan definituriko energia deformazio makroskopikoarekiko ($\underline{\underline{\varepsilon}}$) birritan diferentziatuz, zurruntasun matrizearen adierazpen analitikoa lortzen da edozein egitura motarako:

$$C_{jklm} = \frac{\partial^2 \psi}{\partial \underline{\underline{\varepsilon}}^2} = E_s \sum_{i=1}^{N_{habe}} \frac{A^{(i)} l^{(i)}}{V_0} n_j^{(i)} n_k^{(i)} n_l^{(i)} n_m^{(i)} \quad (6)$$

6 Ekuazioak edozein sare egituraren zurruntasun-matrizea definitzen du, honen habeen morfologiaren eta norabidearen arabera. $n_x^{(i)}$ aldagai bakoitzak $\underline{\underline{n}}^{(i)}$ bektorearen proiektzioa adierazten du x norabidean (1, 2 edo 3 norabideak). Bestalde, 6 Ekuaziotik sare egiturarekiko independenteak diren bi murrizketa gara daitezke:

$$C_{jjkk} = C_{jkkj} \quad (7)$$

$$C_{1111} + C_{2222} + C_{3333} + 2C_{1122} + 2C_{1133} + 2C_{2233} = \rho^* E_s \quad (8)$$

7 eta 8 Ekuazioak 4 Ekuazioko zurruntasun matrizean aplikatuz, eta aldagaiak ordenatuz, zeharka isotropikoa den edozein sare egituraren zurruntasun matrizea defini daiteke, betiere makurdura eta tortsioa mespretxagarriak izatekotan. Honela, lortzen den zurruntasun-matrizea lau aldagai independenteren menpe egongo da: dentsitate erlatiboa (ρ^*), zurruntasunen arteko erlazioa (E_3/E_1), material solidoaren Young-en modulua (E_s) eta Poisson-en koefizienteak (ν_{12}):

$$C = \frac{3\rho^* E_s}{4[2 + \frac{E_3}{E_1}(1 - \nu_{12} + 4\nu_{13})]} \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & \frac{4}{3} \frac{E_3}{E_1} \nu_{13} & 0 & 0 & 0 \\ & 1 & 1/3 & 0 & 0 & 0 \\ & & \frac{4}{3} \frac{E_3}{E_1} (1 - \nu_{12}) & 0 & 0 & 0 \\ & & & \frac{4}{3} \frac{E_3}{E_1} \nu_{13} & 0 & 0 \\ sim. & & & & \frac{4}{3} \frac{E_3}{E_1} \nu_{13} & 0 \\ & & & & & 1/3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Zurruntasun-matrize honek zeharka isotropikoa diren sare egituren portaera elastikoa definitzen du, eta hone-tatik Young-en moduluak atera daitezke 1 eta 3 norabideetan, baita G_{12} eta G_{13} ebakidura moduluak:

$$E_1 = \rho^* E_s \frac{(1 + \nu_{12})}{4 + \frac{E_3}{E_1} [2(1 - \nu_{12}) + 8\nu_{13}]} \quad (10)$$

$$E_3 = \rho^* E_s \frac{\frac{E_3}{E_1} (1 + \nu_{12})}{4 + \frac{E_3}{E_1} [2(1 - \nu_{12}) + 8\nu_{13}]} \quad (11)$$

$$G_{12} = \rho^* E_s \frac{1}{4 \left[2 + \frac{E_3}{E_1} [(1 - \nu_{12}) + 4\nu_{13}] \right]} \quad (12)$$

$$G_{13} = \rho^* E_s \frac{\frac{E_3}{E_1} \nu_{13}}{2 + \frac{E_3}{E_1} [(1 - \nu_{12}) + 4\nu_{13}]} \quad (13)$$

Sare egituraren Young-en moduluak eta ebakidura moduluak dentsitate erlatiboarekiko (ρ^*) eta material trinkoaren Young-en moduluarekiko (E_s) proportzionalak dira eredu honen arabera. Hala ere, ρ^* aldagaia sare egituraren habe bakoitzaren bolumenaren batura soila da, euren arteko intersektzioak kontuan izan gabe. Ereduaren zehaztasuna hobetzeko dentsitate erlatiboaren aldagaia doitu egin da, materialaren intersektziok kontuan har ditzan. Eraldaketa honek modulu elastikoen eta dentsitate erlatiboaren arteko linealtasuna desegiten du, 4 Irudian azaltzen diren eredu analitikoetan ikus daitekeen bezala.

Hala ere, eredu analitikoa E_s -rekiko lineala da, eta hortaz 10-13 Ekuazioko moduluak baino zentzu gehiago du eredu analitikoa materialaren modulu elastikoarekiko normalizatuta adieraztea, hau da, E_1/E_s , E_3/E_s , G_{12}/E_s eta G_{13}/E_s ; hala adierazten da 4 Irudian. Era honetara, eredu analitikoa materialarekiko independentea egiten da, eta sare egituraren portaera elastikoa lortzeko nahikoa da materialaren Young-en moduluarekin biderkatzea.

Bestalde, nahiz eta 9-13 Ekuazioetan ν_{13} aldagaia agertzen den, hau ez da independentea. Zeharkako isotropia bermatzeko 14 Ekuazioan adierazten den ν_{12} eta ν_{13} aldagaien arteko erlazioa ere bermatu beharra dago:

$$4 \frac{E_3}{E_1} \nu_{13}^2 + 3\nu_{12} - 1 = 0 \quad (14)$$

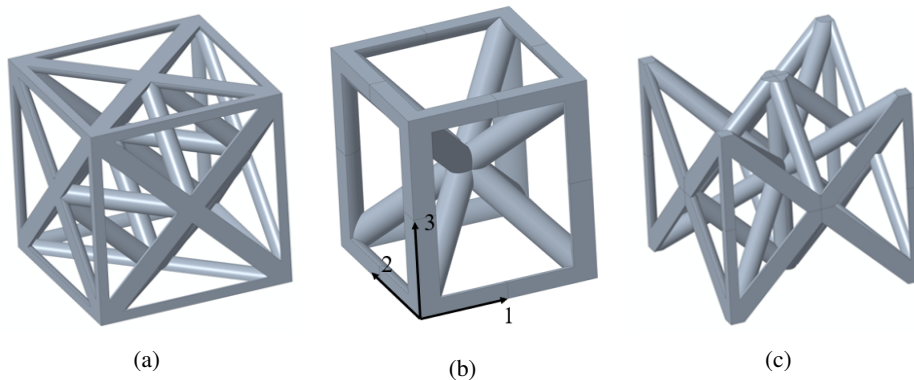
Azkenik, zurruntasun aldaketa ahalik eta mailakatua izan dadin, zurruntasun direkzionala elipsoide bat izan dadin kalkulatu da (ikus 4d Irudia). Hau ν_{12} jakin bat inposatuz lortzen da.

Zurruntasun-matrizea definitzen duten gainerako aldagaiak (E_s , E_3/E_1 eta ρ^*) egiturak diseinatu aurretik aukera daitezke, eta hortik habiatuz egituraren konfigurazioa eta habeen diametroak kalkulatu ahalko dira. Hortaz, zeharka isotropikoak diren sare egituren eredu analitikoa komuna da edozein egiturarako, eta portaera elastiko bera lortzeko hainbat aukera ezberdin egon daitezke.

3.2. Egituren diseinua

Sare egitura diseinatzeko lehenik eta behin zurruntasun-matrizea definitu beharra dago, 9 Ekuazioan adierazitako diseinu-parametroen menpe. Behin zurruntasun matrizea ezagututa, sare egitura osatuko duen unitate-gelaxka aukeratzeko da, hots, egitura osatuko duten habe kopurua eta hauen posizioa. Kontuan hartu behar da habe eta lotura asko dituzten unitate-gelaxka hiperestatikoei hobeto beteko dutela makurdura eta torsio mespretxagarrien hipotesia. 3 Irudiak hiru unitate-gelaxka posible irudikatzen ditu.

3. Irudia: Zeharka isotropikoak diren sare egitura posibleen unitate-gelaxkak: a) SC2FCC2, b) SC2BCC eta portaera mekanikorako erabilitako erreferentzia sistema, eta c) VFCCBCC.



Unitate gelaxka eta zurruntasun-matrizea definiturik daudela, 6 Ekuazioan parametro ezezagun bakarrak haben sekzioak izango dira ($A^{(i)}$). Hauek, 6 eta 9 ekuazioak berdinduz lortu ahalko dira. Honela, egiturak guztiz definiturik geratuko dira, eta euren portaera elastiko ideala 9 Ekuazioko zurruntasun matrizeak deskribatuko du.

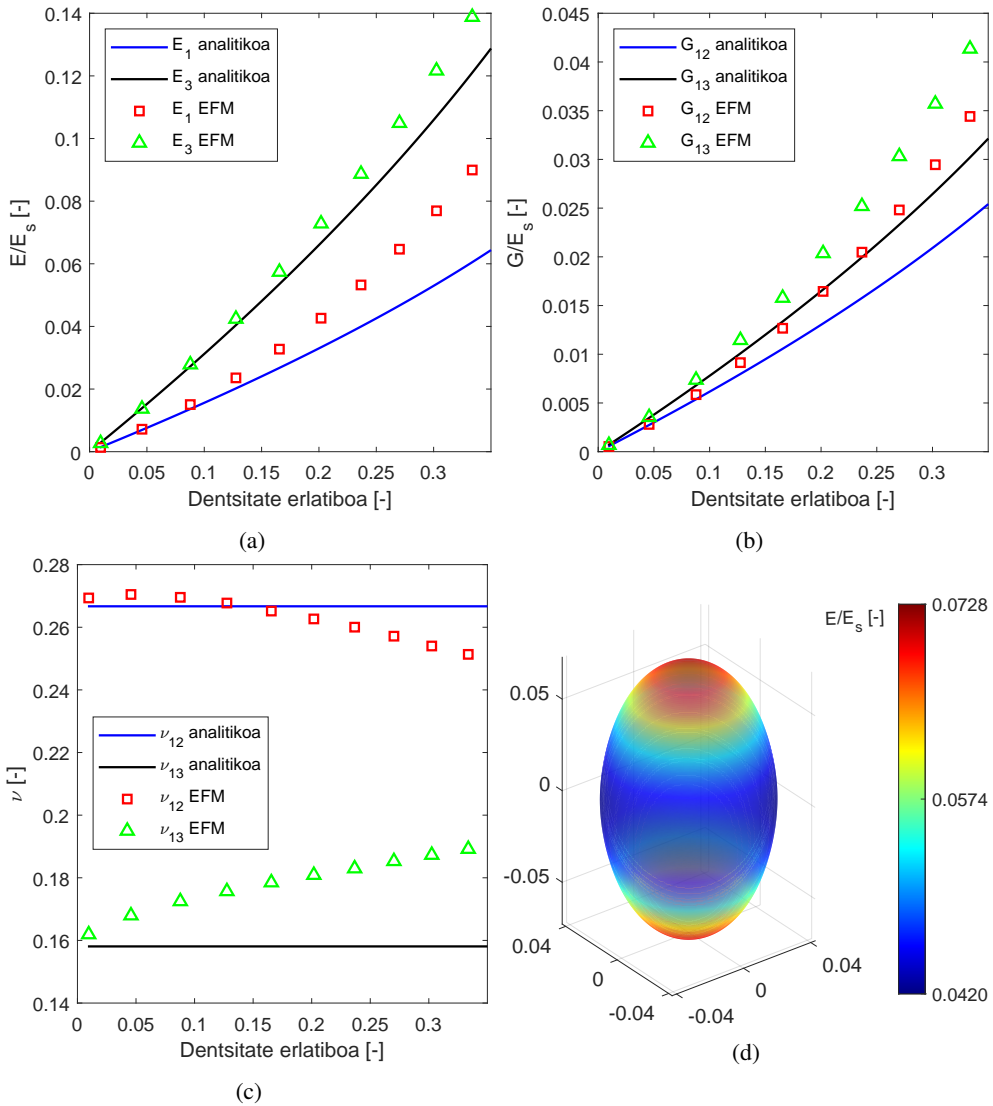
3.3. Zenbakizko baliozkotzea

Eredu analitikoaren baliozkotzea Elementu Finituen Metodoaren bitartez (EFM) egin da, Abaqus 2020 softwarea erabiliz. Honetarako, SC2FCC2 deituriko unitate-gelaxka bakarra aukeratu da, eta muga baldintza periodikoak

ezarri zaizkio Omairey *et al.* (2018)-ek garatutako pluginarekin. Muga-baldintza periodikoek kubo baten aurrez aurreko aldeetan ematen diren desplazamenduen arteko erlazioak definitzen dituzte, eta era honetara unitate-gelaxka soil batekin inguru infinitu bat simula daiteke, honek dakarren denbora aurrezpenarekin.

Behin muga-baldintza periodikoak ezarrita, 6 desplazamendu independente inposatu zaizkio SC2FCC2 unitate-gelaxkari, eta hortik ateratako indar eta desplazamenduetatik egituraren zurruntasun matrizea ebatzi da. Honela, eredu analitikoaren eta zenbakizko ereduaren arteko ezberdintasunak azter daitezke.

4. Irudia: Diseinuz $E_3/E_1 = 2$ erlazioa duen SC2FCC2 egituraren portaera elastikoa dentsitate erlatiboaren arabera: a) Young-en modulua 1 eta 3 norabideetan, b) G ebakidura moduluak, c) Poisson-en koefizienteak, d) EFM bidezko zurruntasuna norabide guztietan 0.2 dentsitate erlatiborako.



4 Irudian analitikoki lortutako balioen eta zenbakizko emaitzen arteko konparaketa ikus daiteke. Irudiak adierazten duenez, eredu analitiko oso zehatza da dentsitate erlatibo baxuetarako, eta dentsitatea handitu ahala zehaztasuna galtzen doa. 4a Irudian antzeman daitekeenez plano isotropikoan Young-en modulua nabarmenki aldentzen da eredu analitikotik dentsitate erlatiboa igo ahala. Ezberdintasun hau eredu matematikoan mesprexatutako makurduraren ondorioa da. Aldiz, E_3 -k zehaztasun altuagoa du dentsitate erlatibo guztietan. Ebakidura moduluei dagokienez, makurdurak era uniformeagoan eragiten die G_{12} eta G_{13} moduluei, eta zenbakizko ereduak zehaztasun antzekoa du bi kasuetan. Poisson-en koefizienteen kasuan ν_{12} -k %-6ko errore maximoa du, aldiz ν_{13} -ren kasuan errorea %16-ra heltzen da. 4d Irudiak zurruntasun direkzionala irudikatzen du, eta diseinuan inposatutako

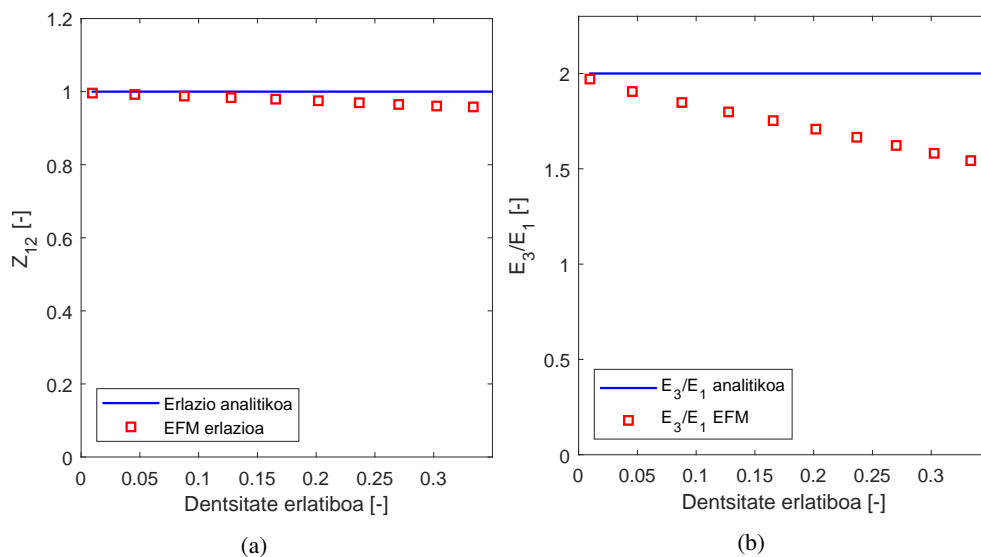
elipsoide forma duela antzeman daiteke.

Zurruntasun matrize baten isotropia maila Zener erlazioaren bitartez neur daiteke. 15 ekuazioan 1-2 planorako Zener erlazioa adierazten da, $Z_{12} = 1$ -ek isotropia perfektua adierazten duelarik. C_{66} , C_{11} eta C_{12} parametroek zurruntasun matrizearen osagaiak adierazten dituzte.

$$Z_{12} = \frac{2C_{66}}{C_{11} - C_{12}} \quad (15)$$

5a Irudian Zener erlazioa irudikatzen da. Nahiz eta eredu analitikoak zehaztasuna galtzen duen dentsitate erlatibo handitu ahala, 1-2 planoko zeharkako isotropia oso egonkor mantentzen da zenbakizko eredu ezberdinetarako, gehiengo errore erlatiboa %5 baino txikiagoa delarik. 4 Irudian agerikoa den balio absolutuen desbideraketa konpentsatu egiten da 1-2 planoan, eta horri esker zeharkako isotropia mantendu egiten da dentsitate erlatibo ezberdinetarako. Bestalde, E_3/E_1 erlazioa txikitzen doa dentsitate erlatibo handitzean, eta hau kontuan hartu beharko da egiturak diseinatzerakoan.

5. Irudia: a) Zener erlazioa eta b) E_3/E_1 proportzioa dentsitate erlatiboarekiko.



4. Ondorioak

Proposatutako eredu analitikoa gai da zeharka isotropikoak diren sare egituren portaera elastikoa deskribatzeko, hasierako diseinu-parametro gutxi batzuetatik abiatuta: ρ^* , E_s eta E_3/E_1 . Eredu analitikoaren zehaztasuna jaitsi egiten da dentsitate erlatibo handitzen den heinean, arbuatutako makurduraren eragina dela eta. Bestalde, energiaren adierazpena erabiliz, ezarritako murrizketak betetzen dituzten hainbat sare egitura ezberdin diseina daitezke.

SC2FCC2 egiturak zurruntasun tarte zabal bat har dezake dentsitate erlatiboaren arabera, hezuraren propietate mekanikoaren antzeko balioak lortuz. 4a Irudiko EFM E_3/E_s moduluak 0.0027 eta 0.139 balioen artean daude. Co-Cr aleaziozko egitura izatekotan ($E_s=210$ GPa) SC2FCC2 metamaterialak 0.57 GPa eta 29.2 GPa arteko edozein E_3 modulu izan dezake aztertutako ρ^* balioetarako. Aldiz, Ti-6Al-4V aleazioa aukeratuz gero ($E_s=110$ GPa), E_3 moduluak 0.3 eta 15.3 GPa artean egongo da. Era honetara, posible da hezur kortikalari dagozkion zurruntasun maila ugari ekoiztea, baita kokapenaren arabera zurruntasun aldakorreko inplanteak diseinatzea ere.

5. Etorkizunerako planteatzen den norabidea

Lan honen ildotik jarraituz, hurrengo pausoa egitura honen erresistentzia ikertzea eta egituraren kolapsorako formulazio analitikoa garatzea da. Ondoren, egitura hauek fabrikatu eta entseguak egin beharko lirake, eredu analitiko, zenbakizko eredu eta esperimenteren arteko ezberdintasuna aztertzeko. Honetaz gain, aipatutako hiru

unitate-gelaxken fabrikazioa bideragarria den aztertu beharko litzateke, zein materialekin eta zein eskalan. Azkenik, konpresio hutsaz gain beste karga mota batzuekiko erantzuna ere aztertzeke dago, hala nola, ebakidura edo konpresio ebakidura konbinaketa.

6. Erreferentziak

- Barba, Daniel, Enrique Alabort, eta Roger C. Reed. 2019. Synthetic bone: Design by additive manufacturing. *Acta Biomaterialia* 97.637–656.
- Currey, John D. 2013. *Bones: structure and mechanics*. Princeton University Press.
- Deshpande, Vikram S., Michael F. Ashby, eta Norman A. Fleck. 2001. Foam topology: Bending versus stretching dominated architectures. Technical report.
- Gibson, Lorna J., eta Michael F. Ashby. 1997. *Cellular solids structure and properties*. Pergamon Press.
- Maconachie, Tobias, Martin Leary, Bill Lozanovski, Xuezhe Zhang, Ma Qian, Omar Faruque, eta Milan Brandt, 2019. SLM lattice structures: Properties, performance, applications and challenges.
- Murr, Lawrence E. 2018. Additive manufacturing of biomedical devices: an overview. *Materials Technology* 33.57–70.
- Omairey, Sadik L., Peter D. Dunning, eta Srinivas Sriramula. 2018. Development of an ABAQUS plugin tool for periodic RVE homogenisation. *Engineering with Computers* 35.567–577.
- Perticarini, Loris, Giacomo Zanon, Stefano Marco Paolo Rossi, eta Francesco M. Benazzo. 2015. Clinical and radiographic outcomes of a trabecular titanium™ acetabular component in hip arthroplasty: Results at minimum 5 years follow-up. *BMC Musculoskeletal Disorders* 16.1–6.
- Tan, Seng C. 1994. *Stress Concentrations in Laminated Composites*. Lancaster, PA: Technomic Publishing Company.
- Tancogne-Dejean, Thomas, eta Dirk Mohr. 2018a. Elastically-isotropic truss lattice materials of reduced plastic anisotropy. *International Journal of Solids and Structures* 138.24–39.
- , eta —— . 2018b. Stiffness and specific energy absorption of additively-manufactured metallic BCC meta-materials composed of tapered beams. *International Journal of Mechanical Sciences* 141.101–116.
- Zhang, Min, Thomas Gregory, Ulrich Hansen, eta Cheng-Kung Cheng. 2020. Effect of stress-shielding-induced bone resorption on glenoid loosening in reverse total shoulder arthroplasty. *Journal of Orthopaedic Research* 38.1566–1574.