

Esne-gazura proteinaren erabilera argi bidezko 3D inprimaketan

(Use of whey protein in 3D digital light processing (DLP))

*Maialen Uribarrena, Pedro Guerrero, Koro de la Caba, Teresa Carranza**

BIOMAT ikerketa taldea, Ingeniaritza Kimikoa eta Ingurumenaren Ingeniaritza Saila,
Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola, Donostia (UPV/EHU)

LABURPENA: Argi bidezko 3D inprimaketan (DLP, *Digital Light Processing*) erabiltzen den erretxina biobateragarri (EB) bati propietate mekanikoak hobetzeko, esne-gazuraren proteina (EGP) gehitu zitzaion. Proteina hau gazta-prestaketa prozesuan eratzen den hondakinetik lortutako produktua da. Erretxina biobateragarria (EB) eta EGP hautsa % 5ean (bolumen/masa) nahastu ziren eta lortutako nahaste homogeneoari egin zitzaion karakterizazio erreologikoak inprimatzeko aproposa zela erakutsi zuen, inprimatzean egitura egonkorrak lortzen baitzituen forma-fideltasunean eragin zezakeen aldaketarik gabe. Errefortzu-sistema hobetzeko, tratamendu termiko bat aplikatu zitzaion laginei honela EGP hautsa zuten laginetan Maillard erreakzioa gerta zedin eta, beraz, haien propietate mekanikoak hobetzeko. Kolore-aldaketa nabariak ikusi ziren (horitasuna) tenperatura aplikatutako laginetan; Maillard erreakzioa gertatu zela baieztatu zuen horrek. Gainera, Maillard erreakziopean egon ziren egituren erresistentzia igo zen eta material zurrunago bat lortu zen horrela. Lan honek frogatzen du EGP gehigarri jasangarri moduan erabil daitekeela argi bidezko 3D inprimaketan, eta materialaren propietateak Maillard erreakzio bidez hobetu daitezkeela.

GAKO-HITZAK: DLP inprimaketa, esne-gazuraren proteina, Maillard erreakzioa, propietate mekanikoak.

ABSTRACT: A biocompatible resin used in digital light processing (DLP) printing was combined with whey protein (EGP) to enhance its mechanical properties. This protein is derived from the by-product of the cheese-making process. The biocompatible resin (EB) and EGP powder were mixed at a ratio of 5% (volume/mass), which was found to be optimal for achieving suitable rheological properties for printing. The printed structures containing EGP showed no significant differences compared to those made with EB alone, suggesting that no changes occurred that would affect shape fidelity. To further improve the reinforcement system, a thermal treatment was applied to induce the Maillard reaction, aimed at enhancing the mechanical properties of the material. The samples treated with heat exhibited a yellowish color, confirming that the Maillard reaction took place. Moreover, the reaction led to an increase in the strength of the printed structures, resulting in more rigid material. This study demonstrates that EGP can serve as a sustainable additive in DLP printing, and its properties can be further improved through the Maillard reaction.

KEYWORDS: DLP printing, whey protein, Maillard reaction, mechanical properties.

* **Harremanetan jartzeko/Corresponding author:** Teresa Carranza, Gipuzkoako Ingenieritza Eskola (Donostia).  <https://orcid.org/0000-0002-7454-9771>, teresa.carranza@ehu.eus

Nola aipatu/How to cite: Uribarrena, Maialen; Guerrero, Pedro; De la Caba, Koro; Carranza, Teresa (2025). «Esne-gazura proteinaren erabilera argi bidezko 3D inprimaketan», *Ekaia*, 48, 2025, DOI: <https://doi.org/10.1387/ekaia.27005>

Jasoa: urriak 07, 2024; Onartua: martxoak 28, 2025

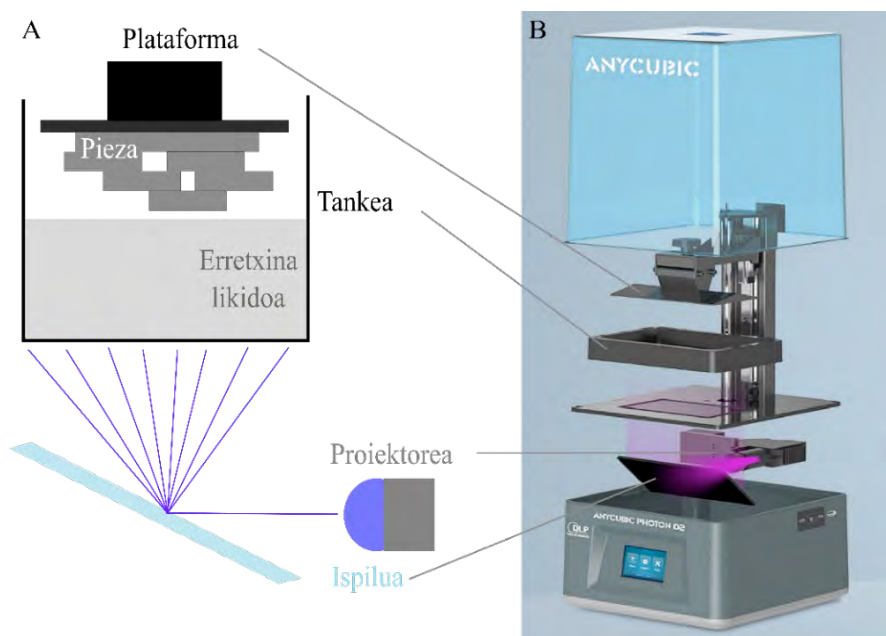
ISSN 0214-9001-eISSN 2444-3225 / © UPV/EHU Press



Lan hau Creative Commons Aitortu-EzKomertziala-PartekatuBerdin 4.0 Nazioartekoa lizentzia baten mende dago

1. SARRERA

Fabrikazio gehigarria, ISO/ASTM 52900:2021 arauak definitzen duen moduan, «3D ereduko datuetatik abiatuz piezak fabrikatzeko materialen bateratze-prozesua da, non normalean geruzaz geruza eratzen den» [1]. Teknologia gehigarriak sailkatzeko, erabiltzen duten printzipioa erabil daiteke oinarri gisa; horrela, teknologia horiek estrusioan, hautsaren fusioan, edota argian oinarrituak egon daitezke [2]. Argi bidezko 3D inprimaketa (DLP) oso teknika erabilgarria bihurtu da konplexutasun handiko egiturak denbora-tarte txikian sortzeko (1. irudia). Inprimaketa mota hau materialaren argi bidezko saretzean dago oinarrituta, eta teknika hori dela medio erretxina fotosentikorrak baliatuz eratzen dira geruzak argia ezarztean [3].



1. irudia. DLP teknologiaren irudi eskematikoa (A) eta erabilitako makinaren zatiak (B) [4].

Hau horrela izanik, DLPa erabilera desberdin askoko arloetan erabiltzen ari da: ehun-ingeniaritzan, medikuntza birsortzailean eta hortz-aplikazioetan, besteak beste [5]. Biomedikuntzan erabiltzen diren egituretatik interesgarrienak sare-egitura inter-konektatuak dira. Egitura horietan zelulek hazteko toki nahikoa dute, bai eta beren artean fisikoki zein kimikoki

konektatuak egoteko aukera; ehunen garapena bultzatzen du horrek. Tes-tuinguru honetan giroide-egiturak dira interesgarrienak, egitura horiek gu-txieneko azalera bat duen eta guztiz konektatua dagoen sare unitario bat sortzen dutelako [6]. Egitura hauen konplexutasunagatik, DLP bidezko tek-nologiak erabili ohi dira haiek sortzeko. Hala ere, egitura porotsuak sor-tzean, beren propietate mekanikoak ere aldatzen dira [7].

Erretxinei propietateak hobetzeari begira oso ohikoa izaten da errefor-tzuak gehitzea. Modu honetan, oso erabiliak izan dira beti errefortzu ez-or-ganikoak eta karbonoan oinarritutako egiturak, nanozuntzak adibidez [8-10]. Jakina da mota honetako errefortzuak sintetikoak direla eta haiek sortzeko ibilbideak kutsagarriak izan ohi direla. Egoera honen aurrean, errefortzu na-turalak ere erabiltzen hasi dira prozesu zein material jasangarriagoak lortu ahal izateko [11].

Esne-gazura albo-hondakin bat da gazta egiteko prozesuan erutzen dena, eta mundu mailan urteko 180-190 milioi tona ekoizten dira gutxi go-rabehera. Hondakin horri bigarren bizitza bat ematea lortu da hainbat ar-lotan: gehigarri moduan erabil daiteke jakietan, adibidez, edota ongarrri moduan, eta horrela ingurumenean izan dezakeen eragin kaltegarria mu-rriztu [12]. Irtenbide hauetaz gain, zientzia munduan ere eman zaio erabi-lera esne-gazuretatik erauzitako proteinari bioplastiko modura edo bioma-terialean errefortzu modura erabiliz, besteak beste materialaren propietate mekanikoak hobetzeko, eratutako elkarrekintzen eraginez [13]. Biopoli-meroek, gainera, aukera zabala ematen dute prozesu errazen bidez propie-tateak hobetu ahal izateko. Material batean saretze kimikoak gertatzen di-renean, aldatu egiten dira haren propietateak, esanguratsuenak direlarik propietate mekanikoak. Maillard erreakzioa naturan edota gure eguneroko sukaldean gertatzen den saretze-erreakzio bat da. Proteinen amino taldeen eta azukre erreduktoreen (egituran karboniloa duten azukreen) presentzian gertatzen den erreakzioa da, kolore hori ilun marroixkako materialak era-tzen dituen [14].

Lan honetan esne-gazura proteina erretxina biobateragarri batekin nahastu zen eta aztertu egin ziren nahastearen inprimatzeko ahalmena eta lortutako piezen ahalmen mekanikoak. Alde batetik, erretxinak hauspeatu gabe jasan zezakeen proteina kantitaterik handiena zein zen aztertu zen, eta ondoren nahasketaren inprimatzeko gaitasuna neurtu zen erreologia bidez. Bestetik, behin DLP bidez egiturak inprimatuta, tratamendu termiko bat aplikatu zitzairen, Maillard erreakzioa gerta zedin. Laginen kolore-propie-tateak aztertu ziren erreakzioa gertatu zen ala ez jakiteko, eta ondoren pro-pietate mekanikoak aztertu ziren, erreakzioaren ondorioz egiturek propieta-teak hobetu ote zituzten jakiteko.

2. MATERIALAK ETA METODOAK

2.1. Materialak

Tintak garatzeko, esne-gazuraren proteina (EGP) (Fortia, Frantzia) eta monomero gabeko eta shore A-10 gogortasuneko erretxina biobateragarria (EB) (3D Resyns, Espainia) erabili ziren. Inprimatutako laginak garbitzeko, alkohol isopropilikoa % 99,9 erabili zen (Ecosoluciones químicas, Espainia).

2.2. Tintaren prestaketa

Tinta prestatzeko, argi-babeseko anbar-botila erabili zen. Hartan, 250 mL erretxina isuri ziren eta 12,5 g (% 5 masa/bolumen) EGP gehitu zitzaizkion. Zenbait kontzentrazio probatu ondoren, ikusi zen % 5 masa/bolumen-eko EGP kantitate hau hauspeakinik sortu gabe gehitu zitekeen kantitate maximoa zela. Nahasketa 24 orduz irabiatu zen giro tenperaturan, irabiagailu magnetiko batekin tinta homogeneo bat lortu arte. Tintak EB (erretxina biobateragarria) eta EB-EGP (erretxina eta EGP) bezala identifikatu ziren.

2.3. Laginen prestaketa: 3D inprimaketa eta Maillard erreakzioa

Laginak diseinatzeko, MSLattice (Dr. Oraib Al-Ketan, Arabiar Emireri Batuak) programa erabili zen. Hartan, 30 mm × 10 mm × 5 mm-ko (luzera × zabalera × altuera) kuboide bat diseinatu zen giroide motako barne-egiturakoa eta % 50 material erabiliz. 3D eredu digitala (STL) lortuta, Anycubic Photon Workshop 3.3.2 programarekin (Shenzhen Anycubic Technology, Txinako Herri Errepublikak) 3D inprimagailuak irakur zezakeen fitxategia prestatu zen. Fitxategi hau Anycubic Photon D2 inprimagailuak (Shenzhen Anycubic Technology, Txinako Herri Errepublikak) inprimatu zuen 1. taulako fabrikazio-parametroekin, oinarrian isuritako tinta ezberdinak erabiliz (EB eta EB-EGP). Parametro hauek aukeratzeko, lehenik, hainbat argi-esposizio denboratan jarri zen erretxina biobateragarria, lortutako geruzaren lodiera neurtzeko eta, horrela, inprimatze-parametro egokiak zehazteko.

1. taula. 3D laginak lortzeko inprimaketa-parametroak.

Parametroa	Balioa
Geruza-altuera (mm)	0,1
Argi-esposizio denbora (s)	10,0
Lehen geruzen argi-esposizio denbora	80,0
Lehen geruza kantitatea	5,0
Argi gabeko denbora (s)	1,0

Laginak inprimatu eta gero, alkohol isopropilikoa zuen 1 L-ko bainuan garbitu ziren 90 minutuz, bainua irabiatzen zen bitartean. Laginak lehortzeko, argi ultramoredun lanpararen azpian utzi ziren 30 minutuz. Bi prozesu hauek Wash & Cure ekipoa (Shenzhen Anycubic Technology, Txinako Herri Errepublikan) eraman ziren aurrera.

Maillard erreakzioa aurrera eramateko, EB eta EB-EGP laginak 105 °C-an egon ziren 24 orduz labean.

Inprimatutako laginak identifikatzeko, gorago azaldutako notazio bera erabili zen, EB izanik erretxina biobateragarria eta EB-EGP, berriz, erretxina EGPdunarekin egindako laginak. T bat gehitu zitzaien tratamendu termikoa aplikatu zitzaien laginei (EB-T eta EB-EGP-T).

2.4. 3D laginen karakterizazioa

2.4.1. Karakterizazio erreologikoa

Ebakidura-abiadura kurbak lortzeko, Thermo Scientific Haake RheoStress1 erreometroa (IFI, Espainia) erabili zen. Haiek 21 °C-an egin ziren 35 mm diametrodun platera eta 2 °-ko kono-geometria erabiliz. Likatasun-balioak 0,001 eta 1.000 s⁻¹ ebakidura-abiadura tartean aztertu ziren.

Materialaren argi bidezko gurutzaketa aztertzeko, Ares G2 erreometroa (TA Instruments, AEB) erabili zen. Horretarako, 20 mm diametrodun plater berrerabilezina erabili zen aluminiozko plateraren gainean. Saio guztietarako, 0,3 mm-koa izan zen plateren arteko distantzia. Irakurketak 1 Hz-eko frekuentzian, % 1 deformazioaz eta 21 °C-an egin ziren. Horrela, biltegitarte- (G') eta galera- (G'') moduluak kalkulatu ziren 10 mW/cm² potentziadun irradiazio ultramorea (405 nm) erabiliz bi moduluen joera egonkortu zen arte. Argirik gabe egiten hasi zen irakurketa, eta 30 s ondoren aplikatu zen argia.

2.4.2. Forma-leialtasuna

Forma-leialtasuna aztertzeko, argi-mikroskopia erabili zen (DCORN, Txinako Herri Errepublikan) eta argazkiak ImageJ software bidez aztertu ziren [15].

2.4.3. Kolore-parametroak

Kolore-parametroak lortzeko, Konika Minolta CR-400 (Konika-Minolta, Espainia) ekipoa erabili zen. Laginak hiru puntu desberdinetan eta gutxienez hiru aldiz neurtu ziren, porositateak eragin zezakeen desbiderapena ekiditeko ($n = 9$). Kolore-balioak CIELab eskalaren arabera finkatu ziren: $L^* = 0$ -tik (beltza) $L^* = 100$ -era (zuria), $-a^*$ -tik (berdetasuna) $+a^*$ -era (gorritasuna), eta $-b^*$ -tik (urdintasuna) $+b^*$ -era (horitasuna). Filmen ar-

teko kolore-aldaketak (ΔE^*) Arregi eta kideek azaldu zuten bezala kalkulatzen ziren, 1. ekuazioa jarraituz [16]:

$$\Delta E^* = \sqrt{(L_{Er}^* - L_{Lag}^*)^2 + (a_{Er}^* - a_{Lag}^*)^2 + (b_{Er}^* - b_{Lag}^*)^2} \quad 1. \text{ ekuazioa}$$

non *Er* erreferentziaren (EB eta EB-T) parametroak diren eta *Lag* esne-gazura proteinadun laginena (EB-EGP eta EB-EGP-T).

2.4.4. Propietate mekanikoak

Propietate mekanikoak TA.XT plusC Texture Analyzer (Aname Instrumentación Científica, Espainia) ekipoarekin lortu ziren. Horretarako, 30 mm × 0 mm × 5 mm-ko (luzera × zabalera × altuera) neurria eta % 50eko barrubete-portzentajea zuten lagin kuboideak erabili ziren. Saiakera guztiak 5 kg-ko kargadun zelularekin eta 3 mm/s-ko abiaduran egin ziren, gutxienez bost lagin erabilita ($n = 5$). Datuak Exponent Connect 8.0.11.0 Lite software (Stable Micro Systems, Erresuna Batua) bidez tratatu ziren.

2.4.5. Analisi estatistikoa

Analisi estatistikoa egiteko SPSS Statistic 25.0 softwarea (IBM, AEB) erabili zen. Alde bakarreko bariantzen analisia (ANOVA) Tukey-ren *post-hoc* konparazio anizkoitza erabiliz egin zen, 0,05-eko adierazgarritasun mailarekin.

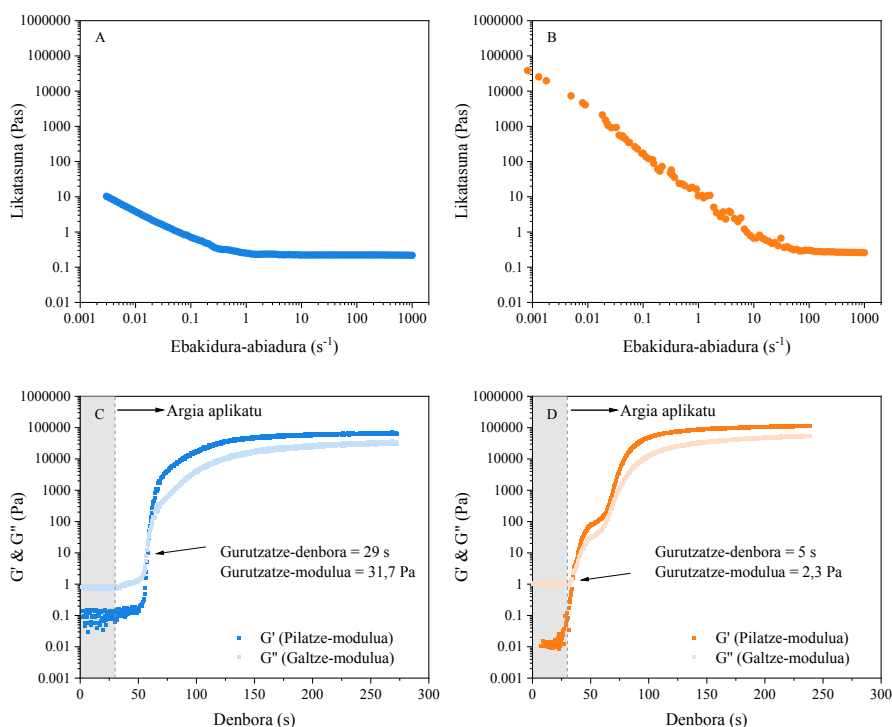
3. EMAITZAK ETA EZTABAIDA

3.1. Tinten propietate erreologikoak

Inprimatzekoak diren tintak formulatzeko garaian, garrantzitsua da haien fluxu-propietateak aztertzea [9, 17]. Zehatz esanda, argi bidezko teknologian erabili ahal izateko, tinten fluxu-propietate zehatzak azaldu behar dituzte, hala nola likatasun-balio txikiak (gehienez 3 Pa·s) [5] eta argi-erreaktibotasun handia izatea [18].

2A eta 2B irudiek EB eta EB-EGP laginen emaitzak erakusten dituzte, non likatasun-balioak apalagotzen zihoazen ebakidura-abiadura handitzen zen heinean, azkenik plateau puntura iritsi ziren arte, biek 1 Pa·s-ko balioetik beherako likatasuna erakutsiz. EB laginek 1 s⁻¹-eko ebakidura-abiaduratik aurrera azaldu zuten plateau puntua, eta EB-EGP laginak 50 s⁻¹-etik aurrera. Fluxu mota hau erakusten duten materialak pseudoplastiko bezala definitzen dira eta jokaera ez-newtondarra dutela esaten da. EB (2A irudia) eta EB-EGP (2B irudia) likatasun-kurbak konparatuz, ikus daiteke ebakidura-abiadura txikietan EB-EGParen likatasun-balioa igotzen zela. Efektu honen arrazoia erretxinan dispersatua zegoen EGPak agregatuak sor

tzakeela izan daiteke [19]. Ondo jakina da agregatuok erretxinaren argi-erreaktibitatean eragin dezaketela eta, beraz, horren efektua aztertzea komeni da [20]. Laginen argi-erreaktibitatea neurtzeko, biltegitratze- (G') eta galera-moduluak (G'') ere neurtu ziren denboran analisi dinamiko bat eginenez [21]. Test horretan, hasieran argi gabe jarri ziren laginak haien moduluak neurtzeko eta 30 s pasatakoan argia aplikatu zen argi bidezko saretzea gerta zedin. Gurutzatze-denbora eta gurutzatze-modulua bi moduluak elkartu ziren puntuan neurtu ziren argia aplikatu zen momentutik aurrera. Biltegitratze-modulua (G') galera-modulua (G'') baino handiagoa denean gelak jokaera solidoa duela esaten da; alderantziz denean, berriz, jokaera likidoa duela, eta, beraz, saretzea neurtzeko seinale ona eskaintzen du horrek [22]. EB laginak 29 s behar izan zituen argi bidezko saretzea egiteko (2C irudia); EB-EGP laginak, bere aldetik, 5 s behar izan zituen (2D irudia). Hala ere, bi laginek moduluen arteko joera desberdina erakutsi zuten; EBak igoera zuzena zuen eta, EB-EGP laginak, aldiz, bi pausuko igoera-joerako profila erakutsi zuen. Azkenik, G' eta G'' moduluen arteko desberdintasuna plateau puntuan eta puntu hartara iristeko beharrezko denbora oso antzekoa izan zen bi formulazioentzat.

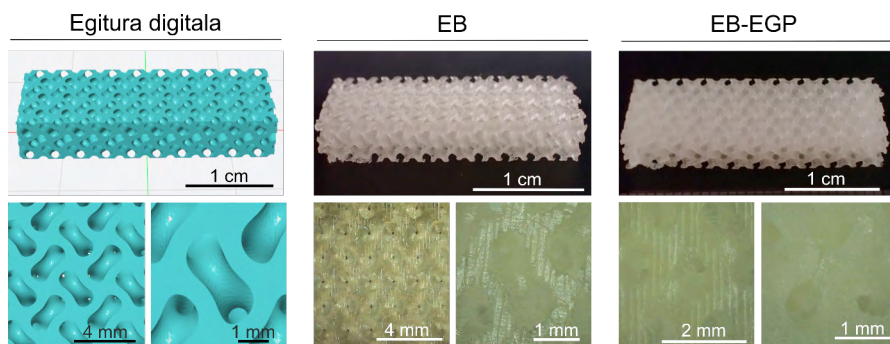


2. irudia. EBaren (A, C) eta EB-EGParen (B, D) ebaidura-abiadura eta argi-erreoologia testak.

Bi laginen arteko desberdintasuna EGP molekulen parte-hartzeagatik azal daiteke. Alde batetik, proteina eta erretxina arteko elkarrekintza fisi-koengatik (hidrogeno-zubiak) likatasun balioak aldatu daitezkeelako. Hau likatasun-balioak igotzearen bidez eta, beraz, plateau puntua lortzeko ebaki-dura-abiadura handitu behar izanaz azal daiteke. Efektu hau bat dator beste ikertzaile batzuek ikusitakoarekin [23]: akrilato difuntzional bati gehigarri zeramiko desberdinak gehitzea fluxu newtondarra zuen erretxina bate-tik fluxu ez-newtondarra zuen erretxina berri bat inprimatzea lortu zuten arte [9]. Bestetik, ikusitako elkarrekintzek molekulen arteko distantziak aldatzen dituztenez, argia ezingo litzateke berdin pasa molekulen artetik, eta horregatik azal daitezke ikusitako erreaktibitate-joera desberdinak. Hala ere, azkenik plateaura iristeko denbora antzekoa behar izanak erakutsi zuen po-limero guztiak —kasu honetan erretxina biobateragarriak— erreakzionatu zuela [18]. Azken denbora honi erreparatu, ondoriozta daiteke bi erretxinak inprimatzeko beharrezko parametroak ez liratekeela gehiegi aldatu beharko eta, beraz, bat inprimagarria bada besteak ere hala izan beharko lukeela.

3.2. 3D bidez inprimatutako laginen karakterizazio-prozesua

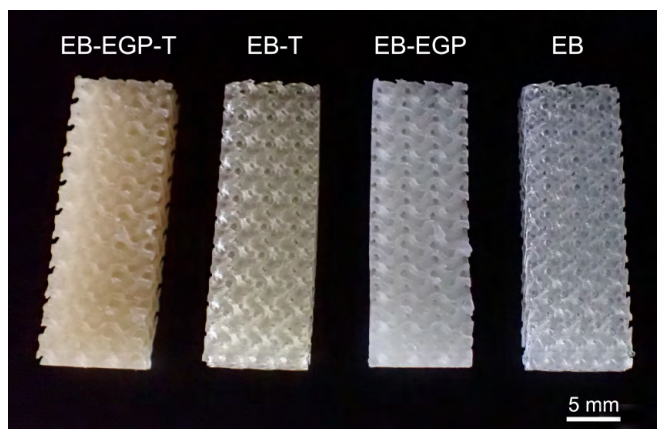
3D inprimaketa egiten denean garrantzitsua da diseinatu eta inprimatu diren solidoen arteko konparaketa egitea. Horrela, 3. irudia ikusita, bi la-ginen egitura digitalaren oso antzekoa dela ikus daiteke, egitura porodun berdina dutelarik eta softwarean markatutako dimentsioak ere berdinak. Erretxina biobateragarriari EGPa gehituta egitura ondo eta inolako ageriko arazorik gabe inprimatzea lortu da, eta erretxina berri hau inprimatzeko ba-liagarria dela erakusten du horrek.



3. irudia. EB eta EB-EGP laginen forma-fideltasunaren azterketa handipen des-berdinak erabiliz.

4. irudian antzeman daitekeen moduan, EB eta EB-EGP laginek an-tzeko kolorea erakutsi zuten. EB-EGPak zuritasun, berdetasun zein hori-

tasun handiagoa erakutsi zuen CIELAB parametroen arabera. Tratamendu termikoa aplikatu eta gero, oso agerikoa izan zen bi laginen arteko (EB-T eta EB-EGP-T) kolore-aldaketa ($\Delta E^* = 17,51 \pm 1,30$). EGPdun laginetan Maillard erreakzioa gertatu zela ondorioztatzera garamatza horrek, laginaren horitasuna (b^* balioa) asko igo baitzen [24] 4. irudian ikus daitekeen moduan. Erreakzioa gertatu ondoren, L^* balioek ere behera egin zuten, laginen iluntasun handiagoa adieraziz (2. taula).



4. irudia. Laginen kolorea eta itxura tratamendu termikoa-ren (T) eta EGParen arabera.

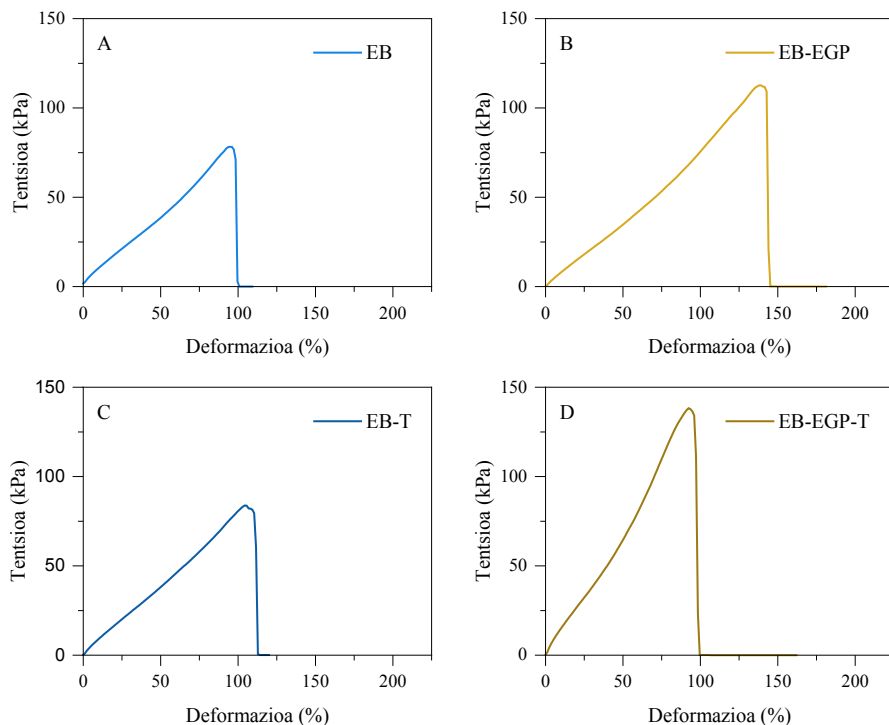
2. taula. Erretxina biobateragarriaren (EB), esne-gazur proteinadun erretxina biobateragarriaren (EB-EGP) eta tratamendu termikoa hartutako bi laginen (EB-T eta EB-EGP-T) L^* , a^* eta b^* kolore-parametroak.

Lagina	L^*	A^*	B^*
EB	$67,08 \pm 2,43^a$	$-1,74 \pm 0,28^a$	$8,21 \pm 0,98^a$
EB-EGP	$72,52 \pm 1,21^b$	$-2,06 \pm 0,20^b$	$10,12 \pm 1,04^b$
EB-T	$65,95 \pm 2,11^a$	$-1,74 \pm 0,3^{ab}$	$17,48 \pm 2,63^c$
EB-EGP-T	$65,81 \pm 1,65^a$	$1,62 \pm 0,28^c$	$34,62 \pm 1,33^d$

^{a-d} Zutabe bakoitzean zenbaki desberdina duten batez bestekoak estatistikoki desberdinak dira % 95eko konfiantza tartearekin ($p \leq 0,05$).

Laginen propietate mekanikoak neurtu ziren, Maillard erreakzioak haien trakzioarako erresistentzian (TE) izan zezakeen efektua neurtzeko. Izan ere, Maillard bidezko saretzea gertatzen denean, handitu egiten da materialaren zurruntasuna (Young-en moduluaren bidez adierazten dena), hura hausteko behar den indarrarekin batera, materialaren luzapen maxi-

moa (elongazio maximoa), berriz, apalagotu egiten da [25]. Modu honetan, 5. irudian azaltzen dira lagin mota bakoitzerako lortu ziren tentsio-deformazio kurbak.



5. irudia. EBaren (A), EB-EGParen (B), EB-Taren (C) eta EB-EGP-Taren (D) tentsio-deformazio kurbak.

EB eta EB-EGP (5A eta 5B irudiak) laginen datuak alderatzeko garaian, ikus daiteke EGParen presentzian materialaren erresistentzia handiagotu egin zela (3. taula); hura hausteko, beraz, indar gehiago behar izan zen eta pixka bat handitu zen elongazio maximoa ere. 5A eta 5C irudiko datuak begiratuta ikus daiteke EB eta EB-T laginen artean ez zela ezberdintasun handirik egon; beraz, lagin hauek ez zuten propietate mekanikoetan eragin zezakeen aldaketa edo saretzerik izan beroketaren ondoren. Maillard erreakzioaren ondoren EGPa duten laginekin lorturiko datuek erakusten dute nola EB-EGP-Tan tentsioak gora egin zuen (5D irudia) eta deformazioak, berriz, behera: saretzea egon izana adierazten duen ezaugarria (balio hauek 3. taulan adierazten dira). Izan ere, saretzea handiagoa izanda gora egiten du materialaren zurruntasunak, 3. taulan Young-en modulua-ren balioetan ikusten den moduan. Horrek erakusten du lagina hausteko

beharrezko indarra, hau da, materialak indarraren aurka duen erresistentzia, handiagoa dela.

3. taula. Erretxina biobateragarriaren (EB), esne-gazura proteinadun erretxina biobateragarriaren (EB-EGP) eta tratamendu termikoa jasandako bi laginen (EB-T eta EB-EGP-T) elongazio-maximoa (EM), trakzio-erresistentzia (TE) eta Young-en modulua (E).

Lagina	EM (%)	TE (KPa)	E (KPa)
EB	95,7 ± 13,3 ^a	78,8 ± 10,6 ^a	0,99 ± 0,13 ^a
EB-EGP	139,2 ± 21,1 ^b	112,6 ± 18,5 ^b	0,83 ± 0,08 ^a
EB-T	104,4 ± 9,8 ^a	83,8 ± 5,6 ^a	0,92 ± 0,07 ^a
EB-EGP-T	92,4 ± 11,7 ^a	138,3 ± 16,7 ^b	2,27 ± 0,19 ^b

^{a-c} Zutabe bakoitzean zenbaki desberdina duten batez bestekoak estatistikoki desberdinak dira % 95eko konfiantza tartearekin ($p \leq 0,05$).

4. ONDORIOAK

Esne-gazuraren proteina eta erretxina biobateragarria nahastu ziren, nahaste homogeneoa osatu arte. Likatasun-balioen gorakada txikiak eta erreaktibitatean ikusi ziren ezberdintasunak bi materialen arteko elkarrekintzaren eta EGParen agregatu txikien ondorio bezala ikusi ziren. Hala ere, ez zen inprimagarritasunean eragin zezakeen aldaketarik ikusi analisi erreologikoaren bidez, ondoren inprimatutako laginen forma-fideltasunaren bitartez baieztatu zen moduan. Kolore-emaizak eta tentsio-deformazio kurbak ikusiz ondoriozta daiteke beroketaren eraginez Maillard erreakzioa gertatu zela EGPdun laginetan, ondorioz kolorea horitu baitzen eta egitura zurrunagoak lortu baitziren. Hau horrela, erretxina biobateragarriaren propietate mekanikoak hobetzea lortu zen. Alegia, oso ugaria den albo-produktu batetik lortutako balio handiko material bati bigarren balio bat eman zitzaion naturan gertatzen den erreakzio bat printzipiotzat hartuz.

ESKER ONAK

Egileek Polymat institutoari eskerrak ematen dizkiote erabilitako argierreologia ekipamenduengatik. Eusko Jaurlaritzak emandako diru laguntza (Euskal Unibertsitate Sistemako ikerketa-taldeak, IT1658-22, eta ELIKALAB, PA24/02) eskertzen dute egileek. Maialen Uribarrenak (Ikertalent Programa) eta Teresa Carranzak (PRE_2024_2_0074) Eusko Jaurlaritzak emandako diru laguntza eskertzen dute.

BIBLIOGRAFIA

- [1] ISO/ASTM 52900:2021(en), Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary, <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso-astm:52900:ed-2:v1:en> (last time accessed: September 23, 2024).
- [2] TAORMINA, G., SCIANCALEPORE, C., MESSORI, M., BONDIOLI, F. 2018. «3D printing processes for photocurable polymeric materials: technologies, materials, and future trends». *Journal of Applied Biomaterials and Functional Materials*, **16**, 151-160.
- [3] PÉREZ, C., FERNÁNDEZ, A. V., PÉREZ-ÁLVAREZ, L. 2024. «Argiaren bidezko 3D inprimaketarako tinten garapena». *EKAIA EHuko Zientzia eta Teknologia aldizkaria* 209-228.
- [4] Anycubic Photon D2 - Consumer DLP 3D Printer | ANYCUBIC 3D Printing, https://uk.anycubic.com/products/anycubic-photon-d2?srltid=AfmBOoog2VVR-UFZyhDd7IGTud5cGulejsmDcwqYsXUtimcbHO_ylhkg#techspecs (last time accessed: September 23, 2024).
- [5] ESTEVES, A. V. M., MARTINS, M. I., SOARES, P., RODRIGUES, M. A., LOPES, M. A., SANTOS, J. D. 2022. «Additive manufacturing of ceramic alumina/calcium phosphate structures by DLP 3D printing». *Materials Chemistry and Physics*, **276**, 125417.
- [6] GERMAIN, L., FUENTES, C. A., VAN VUURE, A. W., DES RIEUX, A., DUPONT-GILLAIN, C. 2018. «3D-printed biodegradable gyroid scaffolds for tissue engineering applications». *Materials & Design*, **151**, 113-122.
- [7] AL-MAHARMA, A. Y., PATIL, S. P., MARKERT, B. 2020. «Effects of porosity on the mechanical properties of additively manufactured components: a critical review». *Materials Research Express*, **7**, 122001.
- [8] HADA, T., KANAZAWA, M., MIYAMOTO, N., LIU, H., IWAKI, M., KOMAGAMINE, Y., MINAKUCHI, S. 2022. «Effect of Different Filler Contents and Printing Directions on the Mechanical Properties for Photopolymer Resins». *International Journal of Molecular Sciences* 2022, Vol. 23, Page 2296, **23**, 2296.
- [9] LI, X., ZHANG, J., DUAN, Y., LIU, N., JIANG, J., MA, R., XI, H., LI, X. 2020. «Rheology and Curability Characterization of Photosensitive Slurries for 3D Printing of Si3N4 Ceramics». *Applied Sciences* 2020, Vol. 10, Page 6438, **10**, 6438.
- [10] LU, C., DENG, K., PORTER, A., FU, K. (KELVIN). 2023. «Top-down digital light processing 3D printing of composite structures using carbon fiber modified UV curable resin». *Advanced Composites and Hybrid Materials*, **6**, 1-8.
- [11] RAVICHANDRAN, D., XU, W., JAMBHULKAR, S., ZHU, Y., KAKARLA, M., BAWARETH, M., SONG, K. 2021. «Intrinsic Field-Induced Nanoparticle Assembly in Three-Dimensional (3D) Printing Polymeric Composites». *ACS Applied Materials and Interfaces*, **13**, 52274-52294.
- [12] URIBARRENA, M., ROVIRA-CAL, E., URBINA, L., SUÁREZ, M. J., AYMERICH, E., GUERRERO, P., DE LA CABA, K., ETXABIDE, A. 2024. «Valorization of

- cheese whey: closing the loop from protein extraction to whey protein film composting». *Green Chemistry*, **26**, 4103-4111.
- [13] ZHENG, F., YANG, Q., YUAN, C., GUO, L., LI, Z., ZHANG, J., NISHINARI, K., ZHAO, M., CUI, B. 2024. «Characterizations of corn starch edible films reinforced with whey protein isolate fibrils». *Food Hydrocolloids*, **147**, 109412.
- [14] ETXABIDE, A., URANGA, J., GUERRERO, P., CABA, K. DE LA. 2019. «Manufaktura metodoen eta saretze-erreakzioaren eragina gelatinazko materialen propietateetan». *EKAIA EHuko Zientzia eta Teknologia aldizkaria* 71-84.
- [15] SCHNEIDER, C. A., RASBAND, W. S., ELICEIRI, K. W. 2012. «NIH Image to ImageJ: 25 years of image analysis». *Nature Methods* 2012 9:7, **9**, 671-675.
- [16] ARREGI, M., GUERRERO, P., CABA, K. DE LA, ETXEBERRIA, A. E. 2023. «Esne-gazuratik eratorritako film biodegradagarriak». *EKAIA EHuko Zientzia eta Teknologia aldizkaria* 389-404.
- [17] DANG, M., YUE, X., ZHOU, G., HU, S. 2023. «Influence of resin composition on rheology and polymerization kinetics of alumina ceramic suspensions for digital light processing (DLP) additive manufacturing». *Ceramics International*, **49**, 20456-20464.
- [18] MELILLI, G., CARMAGNOLA, I., TONDA-TURO, C., PIRRI, F., CIARDELLI, G., SANGERMANO, M., HAKKARAINEN, M., CHIAPPONE, A. 2020. «DLP 3D Printing Meets Lignocellulosic Biopolymers: Carboxymethyl Cellulose Inks for 3D Biocompatible Hydrogels». *Polymers* 2020, Vol. 12, Page 1655, **12**, 1655.
- [19] SHAH, D. M., MORRIS, J., PLAISTED, T. A., AMIRKHIZI, A. V., HANSEN, C. J. 2021. «Highly filled resins for DLP-based printing of low density, high modulus materials». *Additive Manufacturing*, **37**, 101736.
- [20] ZATTERA, A. C. A., MORGANTI, F. A., DE SOUZA BALBINOT, G., DELLA BONA, A., COLLARES, F. M. 2024. «The influence of filler load in 3D printing resin-based composites». *Dental Materials*, **40**, 1041-1046.
- [21] BEAN, R. H., RAU, D. A., WILLIAMS, C. B., LONG, T. E. 2023. «Rheology guiding the design and printability of aqueous colloidal composites for additive manufacturing». *Journal of Vinyl and Additive Technology*, **29**, 607-616.
- [22] SANTAMARÍA IBARBURU, P. A., UNTZUETA, E., SANTAMARÍA IBARBURU, P. A., UNTZUETA, E. 1994. «Erreologia: teoria eta praktika». *Erreologia: teoria eta praktika*.
- [23] SOKOLA, P., KALINA, M., SMILEK, J., PTÁČEK, P., KROUSKÁ, J., SALAMON, D., SPUSTA, T. 2023. «Kinetic stability and rheological properties of photosensitive zirconia suspensions for DLP printing». *Ceramics International*, **49**, 18502-18509.
- [24] ECHAVARRÍA, A. P., PAGÁN, J., IBARZ, A. 2012. «Melanoidins Formed by Maillard Reaction in Food and Their Biological Activity». *Food Engineering Reviews*, **4**, 203-223.
- [25] ETXABIDE, A., KILMARTIN, P. A., MATÉ, J. I., GÓMEZ-ESTACA, J. 2022. «Characterization of glucose-crosslinked gelatin films reinforced with chitin nanowhiskers for active packaging development». *LWT*, **154**, 112833.