

Banbuaren karakterizazio mekanikoa eta kimikoa

(Mechanical and chemical characterization of bamboo)

A. Elejoste*¹, G. Mondragon¹, J.L. Osa², A. Arevalillo³, A. Eceiza¹, J.M. Abascal³,
A. Butron³, C. Peña-Rodríguez¹

¹ «Materialak + Teknologia» ikerketa Taldea (GMT).

Ingeniaritza Kimikoa eta Ingurumen Ingeniaritza Saila. Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola. Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU-Donostia)

² Ingeniaritza Mekanikoa Saila. Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola. Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU-Eibar.)

³ TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA) Azpeitia egoitza, Anardi 5, E-20730 Azpeitia-Gipuzkoa (Spain)

LABURPENA: Banbua, geometria tubularra duen landarea den aldetik, hautagai interesgarria da eraikuntzaren sektorerako material sintetiko tradizionalen ordezkotzako gisa erabiltzeko. Gainera, iraunkorra eta berriztagarria da ingurumenarekiko arretari dagokionez. Hala ere, haren erabilera sustatzeko, beharrezkoa da dituen propietate mekanikoak eta kimikoak ezagutzea. Lan honek kimikaren eta mekanikaren ikuspegitik aztertzen ditu gaur egun eraikuntzan ezezagunak diren baina tradizionalki oso erabiliak izan diren hiru banbu-espezietan: *Dendrocalamus strictus* (DS), *Arundinaria amabilis* (AA) eta *Phyllostachys aurea* (PA). Azterketa kimikorako TAPPI arauak erabili dira, eta ezaugarri mekanikoak konpresioan eta dinamometroa baliatuz makurdura hiru puntutan neurtuta aztertu dira. Propietate mekanikoen emaitzek erakutsi dute banbuaren dentsitateak eragin zuzena duela bai erresistentzian eta bai zurruntasunean. Aztertutako hiru banbu espezietan, dentsitatea zenbat eta handiagoa izan, erresistentzia eta zurruntasuna handiagoak direla ikusi da.

HITZ GAKOAK: banbua; analisi kimikoa; propietate mekanikoak; eraikuntza materialak.

ABSTRACT: *The bamboo, a tubular geometry plant, it is a promising replacement for traditional synthetic materials in the construction sector. In addition, it is renewable and environmentally sustainable. However, in order to promote its use, mechanical and chemical properties of bamboo must be known. This work analyses chemical and mechanical characteristics of three bamboo species not used in the construction sector, but widely used for other purposes: *Dendrocalamus strictus* (DS), *Arundinaria amabilis* (AA) and *Phyllostachys aurea* (PA). TAPPI standards have been used for the chemical analysis, while mechanical properties have been studied in compression and three-point flexion tests. The results have shown that the density of bamboo has a direct influence on mechanical properties, both in resistance and stiffness: for the analysed three bamboo species, the higher density the higher resistance and stiffness.*

KEYWORDS: bamboo, chemical analysis, mechanical properties, construction materials.

* **Harremanetan jartzeko / Corresponding author:** Asier Elejoste. Geologia Saila. Materialak+Teknologia¹ ikerketa Taldea (GMT). Ingeniaritza Kimikoa eta Ingurumen Ingeniaritza Saila. Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola. Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). – asier.elejoste.thesis@gmail.com – <https://orcid.org/0000-0003-4276-0326>

Nola aipatu / How to cite: Elejoste, A.; Mondragon, G.; Osa, J.L.; Arevalillo, A.; Eceiza, A.; Abascal, J.M.; Butron, A.; Peña-Rodríguez, C. (2023). «Banbuaren karakterizazio mekanikoa eta kimikoa». *Ekaia*, 43, 2023, 273-291. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.23049>).

Jasotze-data: 2021, irailak 6; Onartze-data: 2021, abenduak 28.

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2023 UPV/EHU



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

1. SARRERA

Azken hamarkadetan, ikerketa talde askok bideratu dute lana eraikuntzarako eta elementu mekanikoetarako material iraunkorragoen garapenera eta sustapenera. Zura eraikuntza-material erabilienetakoa izan den bezala Europan, banbua izan da Txinan. Biak material lignozelulosikoak badira ere, bien barne-egiturek propietate mekaniko ezberdinak erakusten dituzte. Banbuaren propietate interesgarriak ospea hartzen ari dira munduan [1-5]. 1988ko datuen arabera, urte horretarako 4.000 erabilera baino gehiago zituen landare horrek [6].

Banbua kide duen poazeo edo gramineo landare-familiako bambusoidae azpi-familia zabalak familia botaniko garrantzitsuenetakoa da gizakia-erentzat. Gramineoak landare belarkarak nahiz zurezkoak ditu. 126 genero hartzen ditu, gutxi gorabehera 970-1.200 espezie tropikal epelekin. Kulmoa zurezkoa denean (kanabera), banbua du izen arrunta.

Banbuen familian oso espezie desberdinak aurkitu daitezke: batzuk metro bateko luzera eta zentimetro erdiko diametroko zurtoinak (kulmoak) dituztenak, eta beste batzuk 25 metroko altuera eta 30 zentimetroko diametroa duten banbu erraldoiak. Lan honetan aztertuko diren hiru banbuak, erabilera antzekoa izan arren, fisikoki oso desberdinak dira zenbait aldetatik: akabera eta itxura, barruko egitura, zuntzen dentsitatea, elikagai-hodien kokapena, etab.

Asian bakarrik ez, banbua modu naturalean hazten da kontinente guztietan. Munduan 22 milioi hektarea baino gehiago banbu laborantzara bideratuta daudela estimatzen da [6]. Hala ere, mendebaldeko munduan oraindik ez da oso ezaguna [7, 8]. Brasilen dago banbu aniztasunik zabalena [9, 10]. Banbua landatzeak hainbat abantaila ditu. Besteak beste, banbuak azkar hazten dira eta, ondorioz, arbolek baino karbono gehiago xurgatzen dute. Hori horrela, esan daiteke Lurraren berotegi efektuari modu eraginkorragoan egiten diotela aurre. Horrez gain, lurzorua higaduraren aurka ere babesten du. Ekoizpen-prozesuetan ere banbuak hainbat alde on dauzka egurraren aldean: azkarrago hazteaz gain, transformazio prozesuan material gutxiago galtzen da errefusa moduan [11, 12]. Gainera, aproposa da inguru degradatu eta ezegonkorak populatzeko, beste landareak hazi ezin daitezkeen lur azidoetan landatu daitekeelako [7].

Banbuak erresistentzia eta zurruntasun espezifikoki handiak eskaintzen ditu. Egurrarekin alderatuz, erresistentzia handiagoa eta ura xurgatzeko ahalmen txikiagoa dauzka [13, 14]. Garaile ateratzen da pisu berearako ohiko eraikuntza-materialek duten erresistentzia neurtuz gero, hala nola egurrezko konposatuak, hormigoia eta altzairua [15]. Banbu-produktuak altzarien, zoladuraren eta eraikuntzaren sektoreetan erabiltzen dira, eta baita ingeniaritza zibilean ere [16]. Oro har, banbua eraikuntzako material homogeneo gisa erabiltzeko saiakerak egin direnean, suntsitu egin behar

izan da jatorrizko forma, haren laminak bereizteko, azpiproduktuak edo bestelako prozesu konplexuagoak sortzeko eta gero artifizialki itsatsi ahal izateko [17-35].

Banbua eraikuntza-material gisa erabili ahal izateko, beharrezkoa da haren propietate mekanikoak eta iraunkortasuna ezagutzea. Espezieen artean dauden ezberdintasunak kontuan hartuta, garrantzitsua da bakoitza ondo karakterizatuta egotea. Horretarako, egurrekin gertatzen den bezala, taula konparatiboak sortzeko beharra dago espeziearen eta erabileraren arabera. Badira hainbat taula banbuen ezaugarriez, baina ez dira berezko forma tubularren ezaugarriak erakusten [17-36].

Horrela, ikerketa honen helburua da orain arte gutxi aztertu diren hiru banbu mota karakterizatzea: kulmo hutsa duten PA (*Phyllostachys aurea*) eta AA (*Arundinaria amabilis*) banbuak, eta kulmo betea duen DS banbua (*Dendrocalamus Strictus*). Eraikuntza-material gisa erabili ahal izateko, karakterizazio mekanikoaz gain, banbuaren konposizio kimikoari buruzko azterketa egin da, propietate mekanikoen jatorria konposizioarekin erlazionatuz ikuspegi zabalagoa eskaintzeko. Banbuaren propietateek, produktu naturala izaki, aldakortasun handia erakusten dute. Lan honen azken emaitza da banbuak egituren diseinuan aplikatzeko eskaintzen duen segurtasuna ebaluatzea, bere ezaugarri minimoak zehaztuz.

2. MATERIALAK ETA METODOAK

2.1. Materialak

Aztertutako materialak egitura txikiak fabrikatzeko erabiltzen diren banbu ohikoenak izan dira: *Phyllostachys aurea* (PA), *Arundinaria amabilis* (AA) eta *Dendrocalamus strictus* (DS) banbua. Bambusa enpresak (Valentzia) hornitzen dituen banbuek tratamendu egonkortzailea dute, borax gatzekin lortua. Banbu landarearen zazpigarren hazieran lortutako enborrak homogeneousat jo daitezke propietate morfologiko eta mekanikoei dagokienez. PA banbua Anji konderritik dator: Huzhou, Zhejiang, 200 eta 500 m arteko altueran kokatua, 18 °C-ko giro tenperaturarekin, 28 °C maximoa eta -3 °C minimoa, eta % 5,47 ± 0,61 hezetasuna. 863 kg/m³-ko dentsitatea du PAk (362 kg/m³, zentro hutsa kontuan hartzen bada). AA banbua Anji konderritik dator: Huzhou, Zhejiang, 200 eta 500 m arteko altueran kokatua, 18 °C-ko giro tenperaturarekin, 28 °C maximoa eta -3 °C minimoa, eta % 5,72 ± 0,15 hezetasuna. 940 kg/m³-ko dentsitatea du AAk (497 kg/m³ hutsunea kontuan hartzen bada). DS banbua Kanchanaburi-tik dator, alegia Thailandiatik, 400 eta 600 m arteko altuera batetik, 10 eta 30 °C arteko giro tenperatura eta % 6,6 ± 0,7 hezetasuna dituena. 624 kg/m³-ko dentsitatea du. Azterketarako eta ondorengo proba guztietarako, kulmo osoa erabili da, azken helburua egituretan kulmo osoa erabiltzea delako.

2.2. Metodoak

2.2.1. Karakterizazio kimikoa eta fisikoa

Hiru banbuen hainbat ezaugarri kimiko neurtu dira esperimentalki, hala nola hezetasuna, disolbagarratasuna edo lignina-edukia. Lehenik, laginak TAPPI T 257 cm-85 araua erabiliz prestatu dira, ondoren hezetasuna neurtu ahal izateko TAPPI T 264 cm-97 erabiliz. TAPPI T 211 om-93 araua jarraituz, 525 °C-ko konbustio bidez zehaztu da errauts-portzentzajea. TAPPI T 207 om-93 bidez kalkulatu da uretan disolbagarriak diren partikulen portzentzajea. TAPPI T 204 cm-97 araua erabili da etanol-tolueno disoluzioan sortzen diren erauziak kuantifikatzeko. Azido disolbaezineko lignina-portzentzajea TAPPI T 222 om-98 erabiliz lortu da. Azkenik, Wise eta lankideek 1946an erabilitako metodologia jarraituz kalkulatu da holozelulosaren portzentzajea, eta α -zelulosa edukirako, Rowell eta lankideek 1983an aipatutako metodoa aukeratu da.

Materialen dentsitatea (ρ) eta kulmoaren dentsitatea (ρ') kalkulatu dira. Materialaren dentsitatea (ρ) kalkulatzeko, masa eta bolumena erabili dira, kulmoaren hutsunea kontuan hartuta:

$$\rho = \frac{4m}{\pi(D^2 - d^2)L} \quad (1)$$

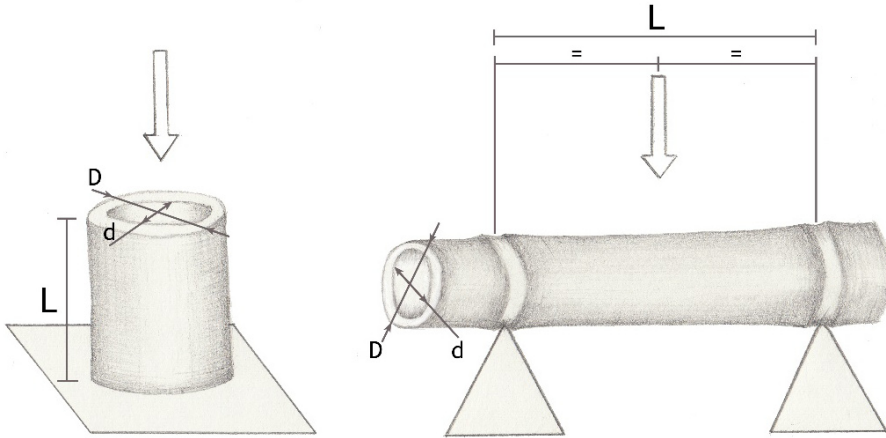
non D banbuaren kanpo diametroa (mm), d banbuaren barne-diametroa (mm), L luzera (mm) eta m pisatutako masa (g) diren (1. irudia).

Bigarrenik, kulmoaren dentsitatea (ρ'), neurtutako masa (g) eta barra osoaren bolumena hartu da kontuan, kulmoaren barruko zuloaren hutsunea kendu gabe.

$$\rho' = \frac{4m}{\pi D^2 L} \quad (2)$$

2.2.2. Karakterizazio mekanikoa

Banbuen propietate mekanikoak makurdura- eta konpresio-saiakuntzen bidez aztertu dira (1. irudia) Tinius Olsen H50 KN (zehaztasuna desplazamenduan $\pm 0,026$ mm) eta Metrotec MS-7M 260 KN (zehaztasuna kargan % 0,5 50 KN eta 260 KN artean; 0,5 klasea) ekipoak erabiliz. Banbu espezie bakoitzean 25 lagin aztertu dira saiakuntza mota bakoitzeko. Laginen dimentsioak 1. taulan erakusten dira. Lortutako datuak dinamometroak eskainitako grafiko eta tauletatik atera dira. Tentsio maximoak indar maximoekin kalkulatu dira. Young-en moduluak, berriz, indar maximoaren % 10ean (F_1) eta % 40an (F_2) lortutako deformazioen (u_1 eta u_2) funtzioan estimatu dira UNE EN 789:2006 jarraituz.



1. irudia. Saiakuntza mekanikoen eskemak: ezkerrean konpresio-proba; eskuinean makurdura-proba.

1. taula. Saiakuntzetako dimentsioak 1. irudiaren arabera.

Dimentsioa (mm)	Konpresioa			Makurdura		
	DS	AA	PA	DS	AA	PA
<i>L</i>	180	180	150	300-145	330-168	290-170
<i>D</i>	26-38	29-37	28-37	30-40	30-34	25-33
<i>d</i>	0	20-28	21-29	0	19-25	19-26

Konpresio-proban, lagina oinarri finko baten gainean ipintzen da, egoera bertikalean (1. irudia eskuinean). Konpresio-karga laginaren goiko muturrean kokatutako zapaltzailearen esku dago. Lagin guztiek luzera berdina dute: AAK eta DSk 180 mm, eta PAK 150 mm. Laburragoa da PA banbua-aren korapiloen arteko distantzia. Banbua produktu naturala denez, laginen diametroa eta lodiera aldakorrak izan dira: AAren diametroa 29 eta 37 mm artekoa, PArena 28 eta 37 mm artekoa eta DSrena 26 eta 38. Lortutako baloreak s erresistentzia (MPa) eta E Young-en modulua (MPa) izan dira.

$$\sigma_k = \frac{F}{A} \quad (3)$$

$$A = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2) \quad (4)$$

$$E_k = \frac{(F_2 - F_1)L}{(u_2 - u_1)A} \quad (5)$$

Konpresio-saiakuntzetan inflexioa arrazoitzeko, konpresio-kargen aurrean ebaluatu da banbu-hormen osotasuna, Aztertutako banbu-laginak internodotako ataletatik aukeratu ziren korapilorik ez izateko. Helburua erresistentzia txikiagoa izan dezaketen eremuak detektatzea izan da, korapiloetatik hurbilago edo urrunago kokatuta, jakinda korapiloak direla banbuaren zatirik erresistenteena. Proba egiterakoan laginen lerdentasuna hartu da kontuan, zenbait kasutan okertze-efektua ager zitekeela suposatuz, baina ez zen laginaren nodoen arteko sekziorik kendu nahi izan.

Materialak dimentsio aldetik aldakorrak direnez, hiru puntuko makurdura-proba aukeratu da makurdura aztertzeko: lagina bi korapiloen parean kokatutako bi bermapuntu gainean bermatua dago, kulmo bat bien artean geratzen delarik; karga aplikatzen duen zapaltzailea, berriz, erdian kokatzen da. 1. irudiak makurdura-probaren diagrama erakusten du. 1. taulak, berriz, aztertutako banbu mota bakoitzaren dimentsioak saiakuntzetan (L luzera, D kanpo-diametroa eta d barne-diametroa). DSren kulmoa barne-beteaenez, ez du barne-diametrorik. Lortutako baloreak s erresistentzia (MPa) eta E Youngen modulua (MPa) izan dira.

$$\sigma_M = \frac{M}{W} = \frac{FL/4}{2l/D} \quad (6)$$

$$E_M = \frac{(F_2 - F_1)L^3}{48(u_2 - u_1)t} \quad (7)$$

$$I = \frac{\pi}{16}(D^4 - d^4) \quad (8)$$

3. EMAITZAK ETA EZTABAIDA

3.1. Azterketa kimikoa

Literaturaren berrikuspenean informaziorik aurkitu ezenez lan honetako hiru banbuen osagai kimikoei buruz, beste 35 banbu espezieen informazioarekin konparatu dira lortutako emaitzak [37-41]. Hezetasunaren emaitzek adierazten dute banbuak daukan ura, egonkortzean, % 5-6 dela. Errautsen baloreen arabera, aztertutako banbuetatik metal portzentaje maximoa (% 3,63) DS banbuak erakusten du. Balio horiek laborantza-lurren ezaugarri mineralen arabera aldatzen dira. Bestetik, erauziak aztertzean ikus daiteke balore altuak direla bibliografian aurkitutako baloreekin alderatzean. Hala ere, DS eta AA espezieek ohikoak diren erauzi-baloreak daukate (% 0,91-10,91). PAK ordea, balore oso altua du (% 14,71 ± 1,46). Erauzien azterketan hainbat konposatu agertzen dira: gantzak, gantz azi-

doak, molekula fenolikoak, terpenoak, erretxin azidoak eta bestelako molekula organikoak. Konposatu horiek babes mikrobiologikoa eta fungizida ematen diote landarearen kulmoari [42].

Bibliografiarekin konparatzean, aztertutako espezieetan ligninaren eta holozelulosaren portzentajeak ohikoak direla ondorioztatu daiteke. 2. taulan ikusten den bezala, hiru banbu espezieen artean ligninaren, hemizelulosaren eta α -zelulosaren ehuneko altuenak AA banbuak erakusten ditu, eta eduki txikienak, berriz, DS banbuak. Ligninaren analisisian egiaztatu egin dira espezieen arteko desberdintasunak: PA banbuak AA eta DS espezieek baino % 10 lignina gutxiago du.

Pinua erreferentzia modura erabili da, konposizio kimikoa eta propietate mekanikoak oso ezagunak eta azertuak baititu ohiko eraikuntza material gisa [43]. Emaitzen arabera (2. taula), biek, pinuak eta banbuak, holozelulosa eta lignina kantitate antzekoak dituzte. Ligninak egonkortasun termikoa ematen dio landareari, eta lignina- eta zelulosa-edukiaren portzentajea eta osagaiok sortzen duten morfologia da, besteak beste, egitura-portaeran eragin nabarmenena [42].

2. taula. DS, AA eta PA banbuen konposizio kimikoak.

Konposizioa	DS	AA	PA	Bibliografia [37-41]	Pinu Gorria [43]
Hezetasuna (%)	6,60 ± 0,7	5,72 ± 0,15	5,47 ± 0,61	—	—
Errautsak 525°C (%)	3,63 ± 0,1	1,38 ± 0,05	0,77 ± 0,02	0,50-12,30	0,25
Erauziak etanol-tolueno (%)	12,12 ± 0,05	9,70 ± 1,34	14,71 ± 1,46	0,91-10,91	0,90
Lignina disolbaezina azidoan (%)	23,80 ± 5,5	28,85 ± 3,62	18,37 ± 1,55	22,66-24,11	25,48
Holozelulosa (%)	71,68 ± 4,66	81,42 ± 1,92	77,07 ± 0,65	60,40-83,75	77,18
α -celulosa (%)	64,07 ± 0,56	63,71 ± 1,82	60,35 ± 6,43	—	—

3.2. Propietate mekanikoak

Makurdura- eta konpresio-probetan lortutako emaitzak 3. taulan bildu dira. Besteak beste, haustura-tentsioak eta elastikotasun moduluak neurtu dira makurdura- eta konpresio-kargen pean. Emaitzek propietate horien 5. pertzentila ere erakusten dute. Material naturalen propietateek duten bezko dispersioa saihestu eta segurtasunaren alde jotzeko asmoz, zurezko egituren diseinuan ohikoa da batez besteko balioak erabili beharrean 5. pertzentilari dagozkionak erabiltzea. Materialen dentsitatearekiko haustura-tentsioa aztertu ahal izateko —hots, erresistentzia espezifiko—, ρ dentsitateak ere aurkezten dira 3. taulan.

3. taula. DS, AA eta PA banbu espezieen eta Pinu Gorriaren (PG) propietate mekanikoak eta dentsitatea.

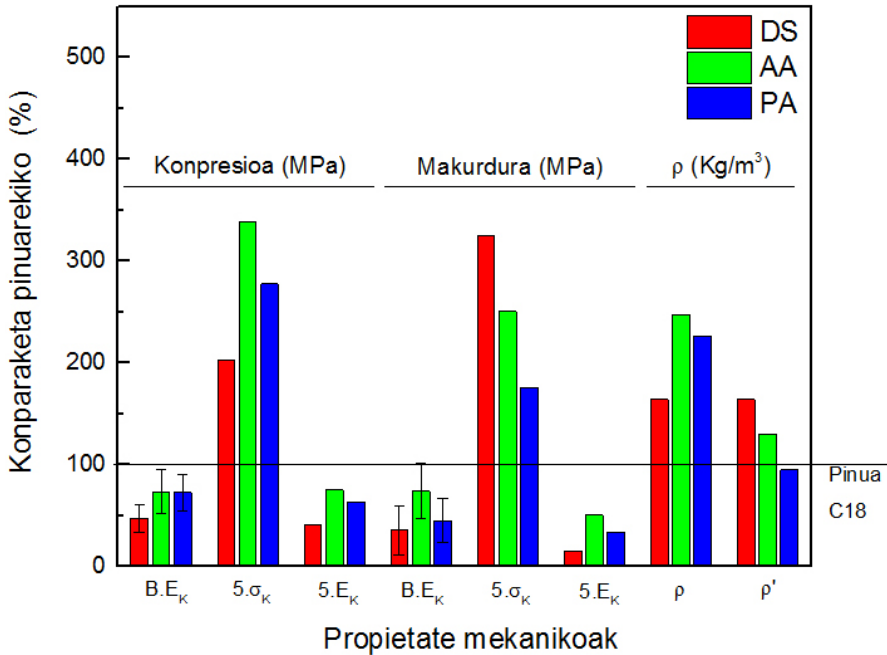
Propietate mekanikoak			DS	AA	PA	Pinu Gorria*	Pinu Gorria**	
							C18	C30
Konpresioa	Batez bestekoa	σ_k (MPa)	50,4 ± 10,5	78,2 ± 10,8	71,4 ± 11,5	42-47	—	—
		E_k (MPa)	4.249 ± 1.180	6.645 ± 1.921	6.555 ± 1.605	8.600-10.000	9.000	12.000
	5. Pertzentila	σ_{k5} (MPa)	36,6	61,1	50,0	—	18	23
		E_{k5} (MPa)	2454	4.513	3.818	—	6.000	8.000
Makurdura	Batez bestekoa	σ_M (MPa)	90,3 ± 27,2	55,3 ± 7,7	40,5 ± 7,0	90-110	—	—
		E_M (MPa)	3.233,7 ± 2.181,2	6.689,5 ± 2.454,7	4.091,2 ± 1.898,7	—	9.000	12.000
	5. Pertzentila	σ_{M5} (MPa)	58,5	45,1	31,6	—	18	30
		E_{M5} (MPa)	921,3	3.038,7	2.042,4	8.600-10.000	6.000	8.000
ρ (kg/m ³)			624,45	9.39,85	862,55	—	380	470
ρ' (kg/m ³)			624,45	497,00	362,00	—	380	470

* Tamaina txikiko probetei buruzko laborategiko datuak, inolako berezitasunik gabe hautatuak (korapiloak, fendak...), egiturazko erabilerarako tamaina errealeko laginetan erreplikatu ezin den kalitateak.

** C18 eta C30 erresistentzia motei buruzko datuak, espezie honentzat aurki daitezkeenak. Klase erresistente ohikoena C18 da, C30 lortzeko kalitate handieneko materiala aukeratu behar baita.

2. irudiak 3. taulako erresistentzia-datuak erakusten ditu, C18 klaseko pinu gorria erreferentziazat (%100) hartuta. C18 klasea definitzen duten

parametroak hurrengoak dira: batez besteko Young-en modulua ($B.E_k$), bosgarren pertzentilaren erresistentzia ($5\sigma_k$) eta bosgarren pertzentilaren Young-en modulua ($5.E_k$). Balio hauek bai konpresioan eta bai makurduran irudikatu dira. Dentsitateak ezaugarri garrantzitsua dela erakutsi duenez, haren balioak ere gehitu dira (ρ eta ρ').



2. irudia. DS, AA eta PA banbuen erresistentzia-datuak pinuaren aldean.

Bi dentsitate-bloketan banbuko hormek dentsitate oso handia duten arren, AA eta PA modu hutsean hazteak, hartzen duen bolumen globala kontuan hartuta, banbuaren dentsitatea hutsa ez balitz legokiokkeenaren erdia baino txikiagoa izatea eragiten du. Ondorioz, hain trinkoa izan arren, banbuzko kanaberak arinak izaten dira espezie gehienetan.

Karga- eta deformazio-balioak aztertzean aldagai askok hartzen dute parte (diametroa, luzera, lodiera...). Horregatik, konparaketak egiteko, egokiagoa da tentsio-egoera aztertzea, materialaren ezaugarriak adierazten baititu. Konpresio-proban konpresio-kargak tentsio normal negatiboak sortzen ditu. Makurdura-probak, berriz, makurdura-momentuak eta indar ebakitzailak sortzen ditu habean zehar. Makurdura-momentuak tentsio normal negatiboak (profilaren goialdean) eta positiboak (profilaren behealdean) sortzen ditu, biak balio berekoak eta profilean zehar linealki aldatzen

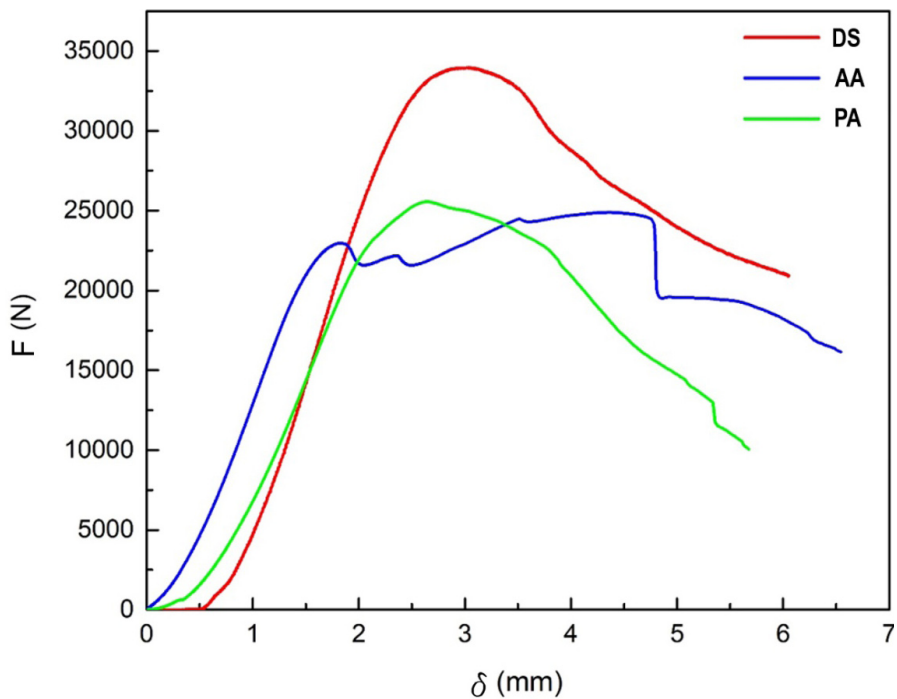
direnak. Indar ebakitzailleak sortutako tentsio ebakitzaille maximoak sekzioaren erdian kokatzen ditu. Makurduran profilarren inertzia-momentuak eragin zuzena du tentsioen banaketan eta, ondorioz, kalkuluak egiterakoan kontuan hartu behar da AAk eta PAk barne-hutsak direla. DSri dagokionez, aldiz, ohikoena barne-betea da (barne diametroa 0 eta 6 mm artean).

Askotariko haustura-tentsioak lortu dira makurdura- eta konpresio-probetan. AAk eta PAk haustura-tentsio handiagoa erakusten dute konpresioan makurduran baino; DSren kasuan alderantziz gertatzen da. DSk sekzio barne-betea duenez, azalera/inertzia-momentua erlazioa txikiagoa da eta, ondorioz, konpresioan okerrago egiten du lan. Makurduran, berriz, sekzio barne-beteak era egokiagoan eusten die tentsio ebakitzaillei.

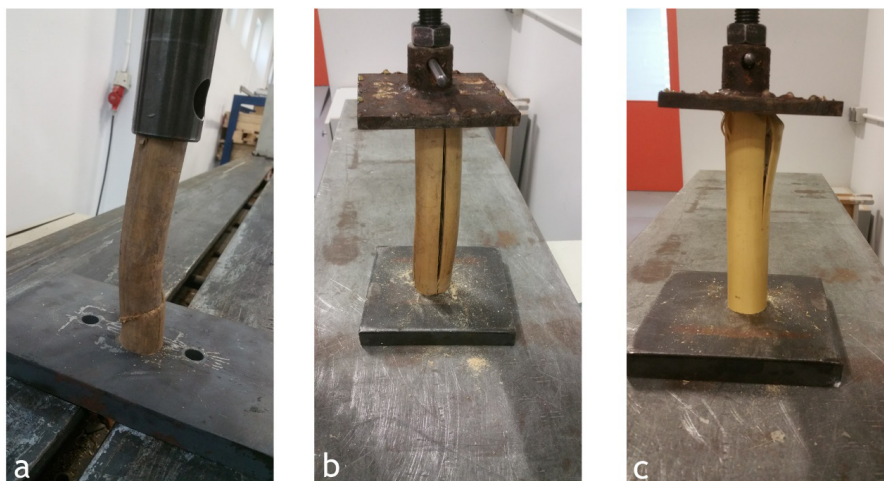
Nabarmena da banbuen elastikotasun-moduluak pinuarenak baino txikiagoak direla, eta hiru banbuen artean DSk ditu balio apalenak. AAk PAk baino balio handiagoak ditu (% 30), baina pinuarenak baino % 25 txikiagoak hala ere. Ezaugarri hau garrantzitsua da egituren diseinuan, deformazioak gobernatzen dituen baita.

3.2.1. Konpresioa

3. irudiak konpresio-probetan lortutako indar-desplazamendu diagramen adibideak erakusten ditu eta 4. irudian hiru banbuen saiakuntza horien argazkiak aurkezten dira. Konpresio-proba jarraitua da DS eta AA banbuentzat; PAk, aldiz, zerra-hortz forma erakusten du. DSren kasuan, barne-betea denez, tolestura agertzen da gilbordurako konpresio aldean puntu ahulenean. Bertan hasten dira banantzen luzeratako zuntzak. Behin banantzen hasita, haustura era jarraituan gertatzen da jauzirik gabe tolestura sekzioan 45°-an zabaltzean. AAk kulmo zirkular barne-hutsa duenez, hobeto jasaten du gilbordura. Zuntzak batuta mantentzen dituen materialaren tentsio ebakitzaillea gainditzean pitzadura bat agertzen da zutabearen erdian. Pitzaduraren hazkuntza gradualak indar murrizketa jarraitua dakar grafikoan. PAren kasuan, hainbat pitzadura sortzen dira berpuntu batean zapalkuntzaren ondorioz: pitzadura sortu eta luzera bateraino soilik hazten da, eta karga jasateko gaitasuna berreskuratutzen da ondorengo pitzadura agertu arte. Zikloa errepikatu egiten da zutabea kolapsatu arte [44].

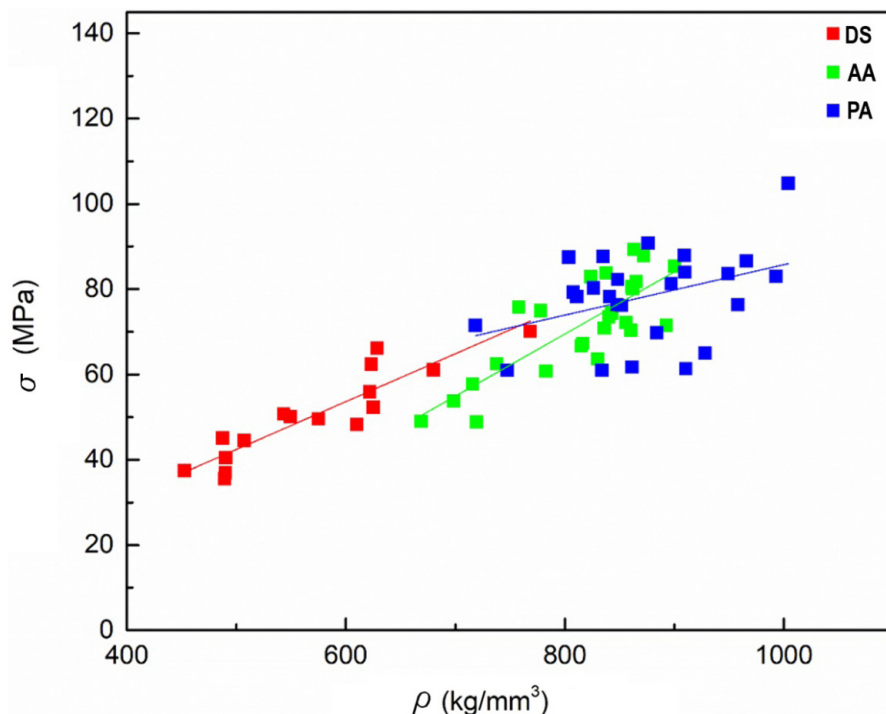


3. irudia. Hiru banbuen indar-deformazio kurbak konpresio-proban.



4. irudia. a) DS, b) AA eta c) PA banbuen konpresio-probako argazkiak.

Banbu espezie guztientzako haustura-tentsioaren eta dentsitatearen arteko erlazioa 5. irudian erakusten da. Grafikoan ikusten da dentsitateak badiela konpresioiko haustura-tentsioarekin erlazioa: dentsitatea zenbat eta handiagoa izan, orduan eta haustura-tentsio handiagoa izaten du banbuak. 3. taula aztertuz, dentsitateak elastikotasun moduluan ere antzera eragiten duela ondorioztatu daiteke: dentsitate handiagoak zurrunagoa egiten du materiala. 4. irudiko grafikoan propietateen dispersioa ere antzeman daiteke.

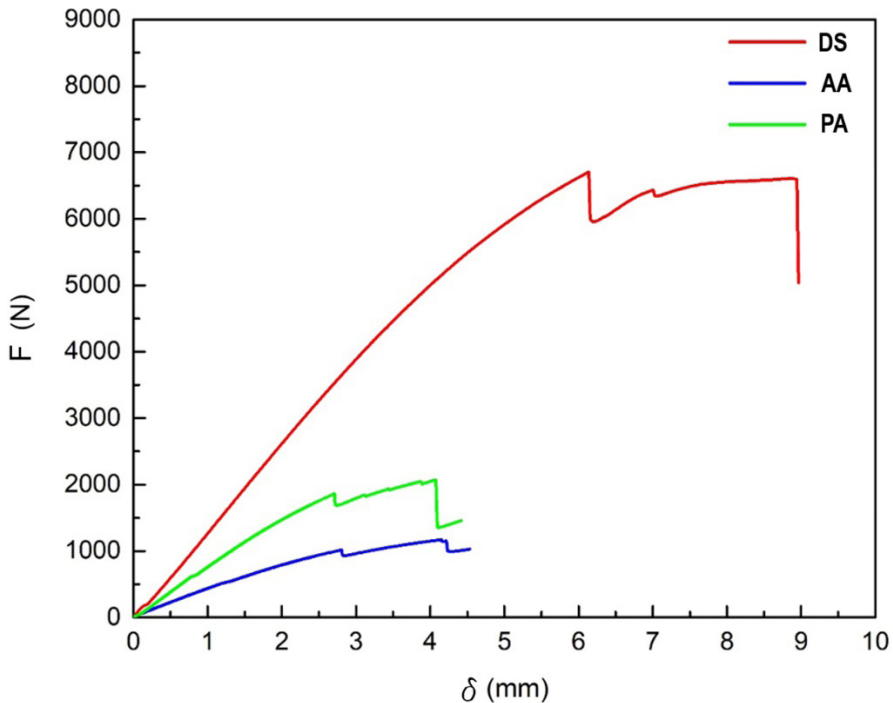


5. irudia. Hiru banbuen haustura-tentsioaren eta dentsitatearen arteko erlazioa konpresio-saiakuntzan.

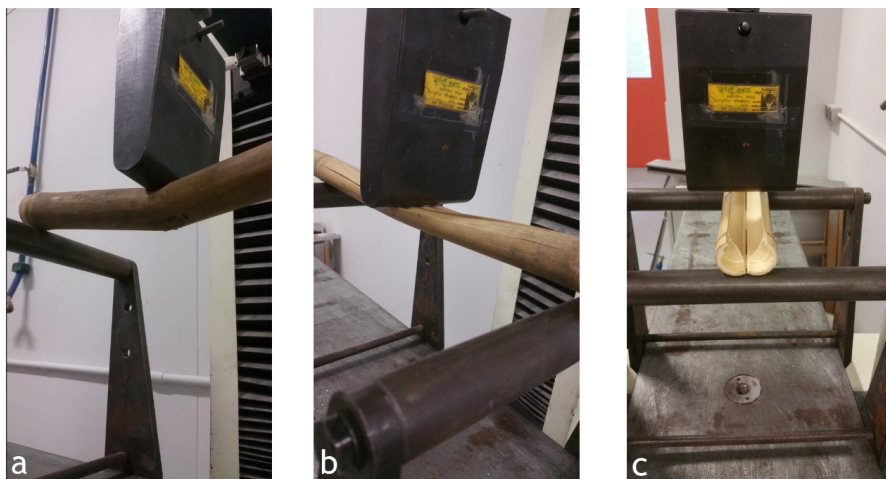
Konpresiozko analisisian lortutako ondorioak karakterizazio kimikoko taularekin alderatzen badira, holozelulosa dirudi kantitateei dagokienez ordena bera mantentzen duen bakarra, eta, beraz, zenbat eta holozelulosa kantitate handiagoa, orduan eta konpresioarekiko erresistentzia handiagoa izan daitekeela pentsa daiteke [43]. Aitzitik, alderantzizko ordena bilatu behar bada, konpresio-saiakuntzaren erresistentzia emaitzei zerk sortzen dien kalte aurkitzeko, aztertutako substantzietako bat ere ez dator bat ordenan, eta ondorioztatu behar da substantzia horietako batek ere ez duela konpresioarekiko erresistentzia zigortzen, modu esanguratsuan behintzat.

3.2.2. Makurdura

6. irudiak makurdura-proben karga-desplazamendu diagramen adibi-deak erakusten ditu. 7. irudiak, berriz, makurdura-probako argazkiak ditu hiru banbuentzat. DS da karga gehien jasaten duena, baina espezie honek sekzio barne-betea dauka. Konpresio-proban ikusitakoaren antzera, makurduraren konpresio aldean zuntzak lokalki banantzen dira tentsio ebakitzaille maximoaren muga gainditzean. DSk kulmo barne-betea izateak abantaila ematen dio kulmo barne-hutsa duten AAren eta PAren gainean. Makurdura-saiakuntzetan karga puntuala aplikatzeak eta probetaren berme-puntuak ere puntualak izateak banbuan pitzadurak eragin ditu kontaktu-puntuak eta azkartu egin du haustura. Pitzadurak luzetarako norabidean sortu dira barnealdean, konpresio-tentsioen aldean, zuntzen arteko kohesio-erresistentzia gainditzean [44]. Berriz ere luzetarako pitzadurak sortzen dira tentsio ebakitzailleak zuntzak banantzean. 6. irudiko hiru diagramek zerra-hortz itxura dute. Karga gorakorra da eta, pitzadura bat hastean, barne marruskaduragatik geldiarazi eta hurrengo pitzaduraren sorrera gertatu arte karga handitzeari berrekiten zaio. 3. taulako tentsio maximoetan lehenengo pitzadura-rako karga-balioa erabili da, ez maximoa.



6. irudia. Hiru banbuen indar-deformazio kurbak makurdura-proban.

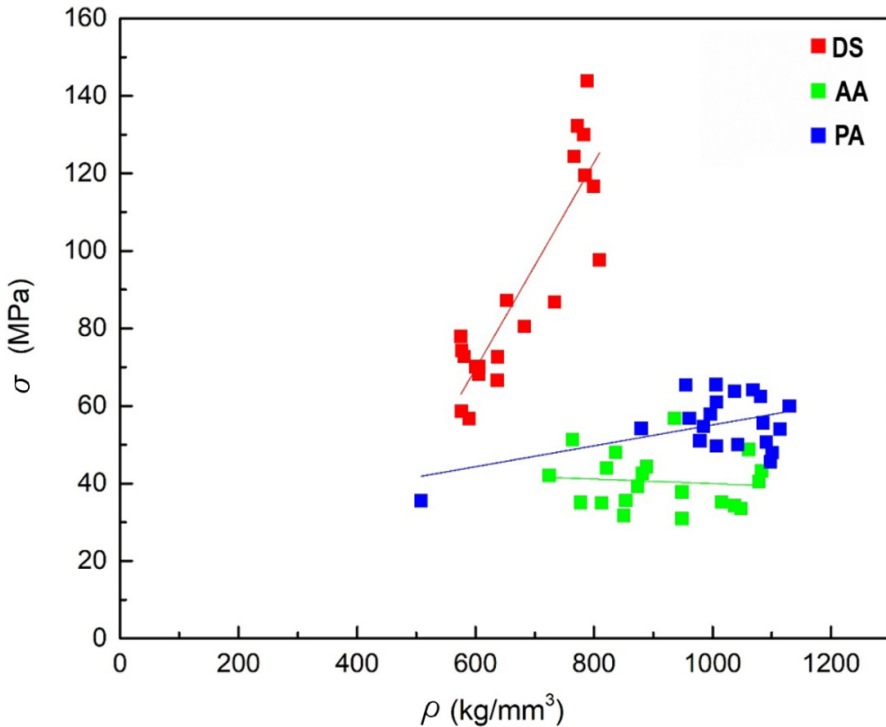


7. irudia. a) DS, b) AA eta c) PA banbuen makurdura-proba.

Makurdura-saiakuntzak benetako egoera simulatu behar du. Hainbat egitura-aplikaziotan kargak ez daude uniformeki banatuta, euskarri puntualen bidez aplikatzen baitira (adibidez, forjatuetan eta estalkietan arrastelak). Kasu horietan, banbuaren osotasuna arriskuan jar daiteke, eta egitura kolapsora eraman.

8. irudiak makurdura-probetan bildu diren laginen haustura-tentsioak dentsitatearekin erlazionatzen ditu. Konpresioan bezala, hemen ere dentsitateak eragina dauka haustura-tentsioan. DS da haustura-tentsio altuenak lortu dituenak. Hala ere, emaitzak engainagarriak dira, espezie honek kulmo barne-betea duenez ezberdina baita haustura-mekanismoa. Kulmo barne-hutsa duten AA eta PA konparagarriak dira, antzeko sekzioak eta hausturak baitituzte. Antzeko dentsitateekin, AA erresistenteagoa da PA baino. 8. irudia ikusiz, berriz ere azpimarragarria da emaitzen dispersioa. Sakabanatzea hiru banbuetan agertzen bada ere, DSren emaitzak dira sakabanatze handiena erakusten dutenak. Etorkizunean aplikazioa emango bazaio segurtasun gutxi eskaintzen du horrelako aldakortasunak elementuen diseinuan.

Makurdura-saiakuntzak karakterizazio kimikoko taularekin alderatzean, α -zelulosa eta hemizelulosa bat datoz hurrenkera berarekin kantitatei dagokienez, eta aditzera ematen dute kantitatea zenbat eta handiagoa izan, areago izango dela makurdurarekiko erresistentzia [43]. Errausak ere orden berdinean agertzen dira, baina ezin dira materialaren zurruntasunarekin erlazionatu.



8. irudia. Hiru banbuen haustura-tentsio/dentsitate erlazioa makurdura-proban.

4. ONDORIOAK

Banbuen konposizio kimikoa eta propietate mekanikoak aztertzean ikusi da DS eta AA espezieetan lignina eta hemizelulosaren portzentajeak ebaluatutako zuraren antzekoak badira ere banbuaren zurruntasuna txikiagoa dela kasu guztietan, bai makurduran, bai konpresioan. Ez da emaitza berdina lortu erresistentziarekin, non konpresioaren kasuan makurduran baino portaera hobea ikusten baita. Azken proba horretan, PAK bakarrik ditu Pinu Gorriko zuraren antzeko balioak.

Beraz, material lignozelulosikoen propietate mekanikoak ebaluatzean, ikusi da ez dutela materialaren konposizioan eta dentsitatean bakarrik eragiten. Zelulosaren banaketarekin zelula-hormetan lotutako beste faktore batzuk ere hartu behar dira kontuan.

Pinuarekin eta oro har egurrarekin egiten diren laborategiko saiakuntzek materiala karakterizatzeko balio dute, baina ezin dira zuzenean erabili egitura bat kalkulatzeko orduan. Inperfekzioen ondorioz, luzeagoak diren habeek zurruntasun eta erresistentzia txikiagoak izan ditzakete.

Banbuaren kasuan hainbat faktore hartu behar dira kontuan: proba mota, banbuaren morfologia eta, batez ere, korapiloek ematen duten erresistentzia. Ikerketa honetan ez dira baztertu banbuen inperfekzioak eta korapiloak, eta laginak prestatzeko orduan ez zaie egin egurrarekin egiten den sailkapena eta mekanizazioa. Ondorioz, hipotesi bat sortzen da: lan honetan erabilitako probetekin (145-330 mm) lortzen diren propietate mekanikoak 3 metroko probeten emaitzetatik gertu daude. Beraz, ikerketarako beste lerro bat ireki da, hipotesi hori egiaztatzen saiatuko litzatekeena.

ESKER ONA

Ikertzaileek EHU/UPV GIU 18/216 proiektuaren bitarteko laguntza eskertzen dute. Egileek, SGikerren (UPV/EHU/ FEDER, EU) laguntza teknikoa eta giza babesa eskertzen dituzte.

BIBLIOGRAFIA

- [1] L. ZOU, H. JIN, W.Y. LU, X. LI. «Nanoscale structural and mechanical characterization of the cell wall of bamboo fibers», *Mater. Sci. Eng. C* 29 (2009) 1375-1379.
- [2] Y. LI, L. YIN, C. HUANG, Y. MENG, F. FU, S. WANG, Q. WU. «Quasi-static and dynamic nanoindentation to determine the influence of thermal treatment on the mechanical properties of bamboo cell walls» *Holzforschung* 69 (2015) 909-914.
- [3] Y. JIAO, C. WAN, J. LI. «Synthesis of carbon fiber aerogel from natural bamboo fiber and its application as a green high-efficiency and recyclable adsorbent» *Mater. Des.* 107 (2016) 26-32.
- [4] S.C. LAKKAD, J.M. PATEL. «Mechanical properties of bamboo, a natural composite, *Fiber» Sci. Technol.* 14 (1980) 319-322.
- [5] S. AMADA, Y. ICHIKAWA, T. MUNEKATA, Y. NAGASE, K. SHIMIZU. «Fiber texture and mechanical graded structure of bamboo» *Compos. Part B* 28 (1997) 13-20.
- [6] HSIUNG W. «Prospects for bamboo development in the world» *Journal de La American Bamboo Society*, 8(1-2), 168 (1988).
- [7] PEREIRA Mar. «Bambu, espécies, características e aplicações» UNESP, Bauru (1999).
- [8] BERALDO AL, AZZINI A. «Bambu características e aplicações» Rio Grande do Sul: Guaíba, Editora gropecuária Ltda. (2004).
- [9] TERRA GRA. «Aspectos da história de vida de *Guadua tagoara* (Nees) Kunth (Poaceae: Bambuseae) na Serra dos Órgãos» 2007. Dissertação (Mestrado em Ecologia)- Programa de Pós Graduação em Ecologia e Recursos Naturais, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, SP (2007).

- [10] E.J. JUDZIEWICZ, L.G. CLARK, LONDOÑO X, MJ. STERN. «The American bamboos» Smithsonian Institution Press, Washington DC, U.S.A. 1999.
- [11] Q. CHUN, K.V. BALEN, J.W. PAN. «Experimental study on flexural performance of small fir and pine timber beams strengthened with near-surface mounted carbon-fiber-reinforced polymer plates and rods» *Int. J. Archit. Herit.* 10 (1) (2014) 106-117.
- [12] I. GLIŠOVIĆ, B. STEVANOVIC, M. PETROVIC. «Bending behaviour of glulam beams reinforced with carbon FRP plates» *J. Civ. Eng. Manag.* 21 (7) (2015) 923-932.
- [13] B. SHARMA, A. GATÓO, M. BOCK, M. RAMAGE. «Engineered bamboo for structural applications» *Constr. Build. Mater.* 81 (2015) 66-73.
- [14] B. SHARMA, A. GATÓO, M.H. RAMAGE. «Effect of processing methods on the mechanical properties of engineered bamboo» *Constr. Build. Mater.* 83 (2015) 95-101.
- [15] X. WANG, H. REN, B. ZHANG, B. FEI, I. BURGERT. «Cell wall structure and formation of maturing fibres of moso bamboo (*Phyllostachys pubescens*) increase buckling resistance» *J. R. Soc. Interface* 9 (2012) 988-996.
- [16] K. OKUBO, T. FUJII, Y. YAMAMOTO, «Development of bamboo-based polymer composites and their mechanical properties» *Compos. Part A Appl. Sci.* 35 (2004) 377-383.
- [17] B. SHARMA, A. GATÓO, M. BOCK, M. RAMAGE, «Engineered bamboo for structural applications» *Constr. Build. Mater.* 81 (2015) 66-73.
- [18] N. NURGROHO, N. ANDO. «Development of structural composite products made from bamboo: fundamental properties of bamboo zephyr board» *J. Wood Sci.* 46 (2000) 68-74.
- [19] N. NURGROHO, N. ANDO. «Development of structural composite products made from bamboo: fundamental properties of laminated bamboo lumber» *J. Wood Sci.* 47 (2001) 237-242.
- [20] Y. YU, X. HUANG, W. YU. «A novel process to improve yield and mechanical performance of bamboo fiber reinforced composite via mechanical treatments» *Compos. Part B-Eng.* 56 (2014) 48-53.
- [21] Y. YU, X. HUANG, W. YU. «High performance of bamboo-based fiber composites from long bamboo fiber bundles and phenolic resins» *J. Appl. Polym. Sci.* 131 (2014) 40371.
- [22] W. SHANGGUAN, Y. ZHONG, X. XING, R. ZHAO, H. REN. «2D model of strength parameters for bamboo scrimber» *BioResources* 9 (2014) 7073-7085.
- [23] W. SHANGGUAN, Y. GONG, R. ZHAO, H. REN. «Effects of heat treatment on the properties of bamboo scrimber» *J. Wood Sci.* 62 (2016) 383-391.
- [24] Y. WEI, X. JI, M. DUAN, G. LI. «Flexural performance of bamboo scrimber beams strengthened with fiber-reinforced polymer» *Constr. Build. Mater.* 142 (2017) 66-82.
- [25] Y. ZHONG, G. WU, H. REN, Z. JIANG. «Bending properties evaluation of newly designed reinforced bamboo scrimber composite beams» *Constr. Build. Mater.* 143 (2017) 61-70.

- [26] R. TOKORO, D.M. VU, K. OKUBO, T. TANAKA, T. FUJII, T. FUJIURA. «How to improve mechanical properties of polylactic acid with bamboo fibers» *J. Mater. Sci.* 43(2008) 775-787.
- [27] H. ZHANG, J. LIU, Z. WANG, X. LU. «Mechanical and thermal properties of small diameter original bamboo reinforced extruded particleboard» *Mater. Lett.* 100 (2013) 204-206.
- [28] C. JIN, Q. YAO, J. LI, B. FAN, Q. SUN. «Fabrication, superhydrophobicity, and microwave absorbing properties of the magnetic c-Fe2O3/bamboo composites» *Mater. Des.* 85 (2015) 205-210.
- [29] T. LI, D.L. CHENG, M.E. WÅLINDER, D.G. ZHOU. «Wettability of oil heat-treated bamboo and bonding strength of laminated bamboo board» *Ind. Crop Prod.* 69 (2015) 15-20.
- [30] S.A. BAHARI, W. GRIGSBY, A. KRAUS. «Thermal stability of processed PVC/bamboo blends: effect of compounding procedures» *Eur. J. Wood Prod.* 75 (2017) 147-159.
- [31] J.F. CORREAL, J.S. ECHEVERRY, F. RAMIREZ, L.E. YAMIN. «Experimental evaluation of physical and mechanical properties of Glued Laminated *Guadua angustifolia* Kunth» *Constr. Build. Mater.* 73 (2014) 105-112.
- [32] H.T. LI, J.W. SU, Q.S. ZHANG, A.J. DEEKS, D. HUI. «Mechanical performance of laminated bamboo column under axial compression» *Compos. Part B* 79 (2015) 374-382.
- [33] Y. XIAO, R.Z. YANG, B. SHAN. «Production, environmental impact and mechanical properties of glubam» *Constr. Build. Mater.* 44 (2013) 765-773.
- [34] JF. CORREAL. «Mechanical properties of Colombian glued laminated bamboo, in: Proceedings of 1st international conference on modern bamboo structures» *ICBS-2007, 2008*, p. 121-7.
- [35] W.J. YU. «Current status and future development of bamboo scrimber industry in China» *China Wood Industry* 26 (1) (2012), 11-14.
- [36] S JAKOVljeVIC', D LISJAK, Z ALAR, F PENA VA. «The influence of humidity on mechanical properties of bamboo for bicycles» *Construction and Building Materials Department for Material, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture, University of Zagreb, Ivana Lucić'a 5, 10002 Zagreb, Croatia.*
- [37] N. POTENCIANO MARINHO, S. NISGOSKI, U. KLOCK, A. SULATO DE ANDRADE, G. I. BOLZON DE MUÑIZ. «Chemical analysis of Giant Bamboo (*Dendrocalamus giganteus* Wall. ex Munro) at different ages» *Ciência Florestal, Santa Maria*, v. 22, n. 2, p. 417-422, abr.-jun., 2012.
- [38] W. FATRIASARI, E. HERMIATI, «Analysis of Fiber Morphology and Physical-Chemical Properties of Six Species of Bamboo as Raw Material for Pulp and Paper» *Jurnal Ilmu dan Teknologi Hasil Hutan* 1(2): 67-72 (2008).
- [39] W. LIESE. «Anatomy and Properties of Bamboo» *Institute of Wood Biology and Wood Preservation of the Federal Research Centre for Forestry and Forest Products, Leuschnerstr, 91, 2050 Hamburg, Federal Republic of Germany.*

- [40] A. LUIZ DE BARROS, J. O. BRITO M. TOMAZELLO. «Produção e caracterização do carvão vegetal de espécies e variedades de bambu» Depto. de Ciências Florestais 13400 - Piracicaba - SP, Seção de Plantas Fibrosas 13100 - Campinas - SPIPEF, n.36, p.13-17, ago.1987.
- [41] V. DA COSTA CORREIA. «Produção e caracterização de polpa organossolve de bambu para reforço de matrizes cimentícias» Universidade de Sao Paulo facultad de zootecnia e engenharia de alimentos, DOI10.11606/D.74.2011.tde-11052011-145742 Pirassununga, 2011.
- [42] Y. DESSALEGN, B. SINGH, A.W. VAN VUURE. «Morphological, chemical and physical characteristics of the ethiopian highland (yushania alpina) bamboo» Materials Today: Proceedings (2021).
- [43] P. XIMENA LONDOÑO. «Distribucion, morfologia, taxonomia, anatomia, silvicultura y usos de los bambúes del nuevo mundo» Catedra Maestria en Construccion - Modulo Guadua, Arquitectura, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Agosto (2002).
- [44] M. CHEN, L. YE, G. WANG, C. FANG, C. DAI, B. FEI. «Fracture modes of bamboo fiber bundles in three-point bending» Cellulose 26 (2019) 8101-8108.

