

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+Teknologiak' ikerketa Taldea (GMT).

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

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

³ TECNALIA, Basque Research and Technology Alliance (BRTA)

LABURPENA: Banbuak, geometria tubularreko landareak, material sintetiko tradizionalen ordezkotz aukera interesgarriak aurkeztzen ditu eraikuntzaren sektorerako. Gainera, ingurumenaren aldetik jasangarria eta berriztagarria da. Hala ere, bere erabilera sustatzeko, beharrezkoa da banbuen propietate mekanikoak eta kimikoak ezagutzea. Lan honek gaur egun eraikuntzan ezezagunak diren baina tradizionaliki oso erabiliak izan diren hiru espezie aztertzen ditu, kimikoki eta mekanikoki: *Dendrocalamus strictus* (DS), *Arundinaria amabilis* (AA) eta *Phyllostachys aurea* (PA). Azterketa kimikorako, TAPPI arauak erabili dira, eta ezaugarri mekanikoak konpresioan eta dinamometroarekin makurdura hiru puntutan neurtuta aztertu dira. Propietate mekanikoen emaitzek erakutsi dute banbuaren dentsitateak eragin zuzena duela bai erresistentzian, bai zurruntasunean. Aztertutako hiru banbu-espezieetan, dentsitatea zenbat eta handiagoa izan, erresistentzia eta zurruntasuna orduan eta 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 of 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. 'Materialak+Teknologiak' ikerketa Taldea (GMT). Ingeniaritza Kimikoa eta Ingurumen Ingeniaritza Saila. Gipuzkoako Ingeniaritza Eskola. Euskal Herriko Unibertsitatea (UPV/EHU). Europa plaza, 1 (20018 Donostia). – asier.elejoste.tesis@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. (2022). «Banbuaren karakterizazio mekanikoa eta kimikoa»; *Ekaia*, ale berezia 2022, 173-191. (<https://doi.org/10.1387/ekaia.23049>).

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

ISSN 0214-9001 - eISSN 2444-3255 / © 2022 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 haien lana eraikuntzan eta elementu mekanikoetan material jasangarriagoak garatu eta sustatzera. European eraikuntza-material erabilienetako bat zura izan den bezala, Txinan banbua izan da. Biak material lignozelulosikoak badira ere, bakoitzaren barne-egiturak propietate mekaniko ezberdinak ditu. Banbua-ren propietate interesgarriak ospea lortzen ari dira munduan [1-5]. 1988ko datuen arabera, ordurako 4.000 erabilera baino gehiago zituen [6].

Banbua, *Bambusoideae poaceae* edo gramineo-landare azpifamilia zabalena, familia botaniko garrantzitsuenetako bat da gizakiarentzat. 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 arrunt.

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

Asian bakarrik ez; banbua kontinente guztietan hazten da modu naturalean. Zenbatespenen arabera, munduan 22 milioi hektarea baino gehiago daude banbua-ren laborantzara bideratuta [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, Lurraren berotegi-efektuari modu eraginkorrago batean aurre eginez, eta lurzorua-ren higaduraren aurka ere babesten dute. Ekoizpen-prozesuetan ere banbuak hainbat onura dauzka egurraren aldean: azkarrago hazteaz gain, transformazio-prozesuan material gutxiago galtzen da errefus moduan [11, 12]. Gainera, aproposa da inguru degradatu eta ezegonkorak populatzeko, beste landareak hazi ezin daitezkeen lur azidoetan landa daitkeelako [7].

Banbuak erresistentzia espezifiko eta zurruntasun espezifiko handiak eskaintzen ditu. Egurrarekin alderatuz, erresistentzia handiagoa eta ura xurgatzeko ahalmen txikiagoa dauzka [13, 14]. Beste ohiko eraikuntza-materialen erresistentzia pisuarekin alderatuz gero, hala nola egurrezko konposatuak, hormigoia eta altzairua, garaile ateratzen da [15]. Banbu-produktuak altzarien, zoladuraren eta eraikuntzaren sektoreetan erabiltzen dira, baita ingeniari-tza zibilean ere [16]. Oro har, banbuak eraikuntzako material homogeneo gisa erabiltzeko saiakerak egin direnean, suntsitu egin behar izan da beren jatorrizko forma, laminak bereizteko, azpiproduktuak

edo bestelako prozesu konplexuagoak sortzeko eta gero artifizialki itsatsi ahal izateko [17-35].

Banbua eraikuntzan material gisa erabiltzeko, beharrezkoa da bere propietate mekanikoak eta iraunkortasuna ezagutzea. Espezieen artean dauden ezberdintasunak kontuan hartuta, garrantzitsua da bakoitza ondo karakterizatuta egotea. Horretarako, egurrekin gertatzen den bezala, espeziearen eta erabileraren arabera taula konparatiboak sortzeko beharra dago. Banbuen ezaugarrien hainbat taula daude, baina ez dituzte berezko forma tubularren ezaugarriak jasotzen [17-36].

Hori horrela, orain arte gutxi aztertu diren hiru banbu mota karakterizatzea da ikerketa honen helburua: 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 erlazionatuta ikuspuntu zabalagoa osatuz. Banbuaren propietateek, produktu naturala izaki, aldakortasun handia dute. Lan honen azken emaitza banbuak egituren diseinuan aplikatzeko eskaintzen duen segurtasuna ebaluatzea da, 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). Bambusa enpresak (Valentzia) hornitutako banbuek tratamendu egonkortzailea dute borax-gatzekin. Banbu-landarearen zazpigarren hazieran lortutako enborrak homogeneousat jo daitezke propietate morfologiko eta mekanikoei dagokienez. PA espeziea Anji Konderritik dator, Huzhou, Zhejiang, 200 eta 500 m arteko altueran, 18 °C-ko giro-tenperaturarekin, 28 °C maximoa eta -3 °C minimoa, % 5,47 ± 0,61 hezetasuna, 863 kg/m³-ko dentsitatearekin (362 kg/m³, zentro hutsa kontuan hartzen bada). AA espeziea Anji Konderritik dator, Huzhou, Zhejiang, 200 eta 500 m arteko altueran, 18 °C-ko giro-tenperaturarekin, 28 °C maximoa eta -3 °C minimoa, % 5,72 ± 0,15 hezetasuna, 940 kg/m³-ko dentsitatearekin (497 kg/m³, hutsunea kontuan hartzen bada). DS espeziea Kanchanaburitik dator, Thailandia, 400 eta 600 m arteko altueran, 10 eta 30 °C arteko giro-tenperaturarekin, % 6,6 ± 0,7 hezetasunarekin eta 624 kg/m³-ko dentsitatearekin. 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 esperimentalki neurtu dira, hala nola hezetasuna, disolbagarritasuna eta 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 arauari jarraituz, errauts-portzentajea 525 °C-ko konbustioaren bidez zehaztu da. TAPPI T 207 om-93 arauaren bidez, uretan disolbagarriak diren partikulen portzentajea kalkulatu da. Etanol-tolueno disoluzioan sortzen diren erauziak kuantifikatzeko, TAPPI T 204 cm-97 araua erabili da. Azido disolbaezineko lignina-portzentajea TAPPI T 222 om-98 erabiliz lortu da. Azkenik, Wise *et al.*-ek 1946an erabilitako metodologiari jarraituz kalkulatu da holo-zelulosaren portzentajea, eta α -zelulosa edukiaren kasuan Rowell *et al.*-ek 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:

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

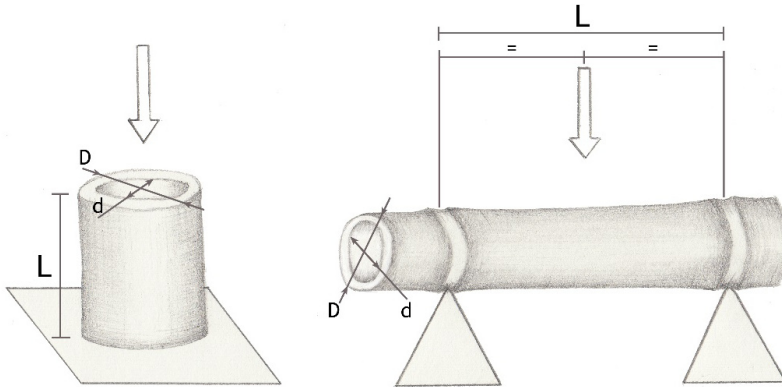
Non D banbuen kanpo-diametroa (mm), d banbuen barne-diametroa (mm), L luzera (mm) eta m pisatutako masa (g) diren (1. irudia).

Kulmoaren dentsitatea (ρ') kalkulatzeko, neurtutako masa (g) eta barra osoaren bolumena hartu dira 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 bakoitzeko 25 lagin aztertu dira saiakuntza mota bakoitzean. Laginen dimentsioak 1. taulan aurkezten dira. Lortutako datuak dinametroak 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) arabera zenbatetsi dira, UNE EN 789:2006 arauari 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, oinarri finko baten gainean posizio bertikalean ipintzen da lagina (1. irudia, ezkerrean). Konpresio-karga laginaren goiko muturrean kokatutako zapaltzailearen arabera da. Lagin guztiek luzera berdina dute: AAk eta DSk 180 mm, eta PAK 150 mm. PA banbuaren korapiloen arteko distantzia laburragoa da. 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 mm artekoa. Lortutako emaitzetatik abiatuta, erresistentzia σ (MPa) eta Young-en modulua E (MPa) kalkulatu dira, honako adierazpen hauen arabera:

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

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

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

Konpresio-saiakuntzetan inflexioa arrazoitzeko, banbu-hormek konpresio-kargen aurrean duten osotasuna ebaluatu da, banbu-lagin bateko bi nodo ondoz ondoko luzera duten zatiak erabiliz. Helburua erresistentzia txikiagoa izan dezaketen eremuak detektatzea izan da, korapiloetatik hurbilago edo urrunago kokatuta, jakinda korapiloak direla banbuaren zatirik erresistenteena. Proba egiterakoan, kontuan hartu da laginen lerdentasuna, zenbait kasutan okertze-efektua ager zitekeela suposatuz, baina ez da laginaren nodoen arteko sekzioirik kendu nahi izan.

Materialak dimentsioaren aldetik aldakorrak direnez, hiru puntuko makurdura-proba aukeratu da makurdura aztertzeko: lagina bi korapiloaren parean kokatutako bi punturen gainean bermatuta dago, bien artean kulmo bat geratzen delarik; karga aplikatzen duen zapaltzailea, berriz, erdian kokatzen da. 1. irudiak makurdura-probaren diagrama aurkezten du; 1. taulak, berriz, aztertutako banbu mota bakoitzaren dimentsioak saiakuntzetan (L luzera, D kanpo-diametroa eta d barne-diametroa). DSren kulmoa barne-betea denez, ez du barne-diametrorik. Lortutako baloreak σ erresistentzia (MPa) eta E Young-en modulua (MPa) izan dira, honako adierazpen hauen arabera kalkulatuta:

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

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

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

3. EMAITZAK ETA EZTABAIDA

3.1. Azterketa kimikoa

Literatura berrikustean ez denez aurkitu lan honetako hiru banbu-espezieen osagai kimikoei buruzko informaziorik, beste 35 banbu-espezieren informazioarekin konparatu dira lortutako emaitzak [37-41]. Hezetasunaren emaitzek adierazten dute banbuak egonkortzean daukan ura % 5-6 dela. Errauts-balioei dagokienez, aztertutako espezieen artean DS banbuak du metal-portzentaje handiena (% 3,63). Balio horiek laborantza-lurren ezaugarri mineralen arabera aldatzen dira. Bestetik, erauziak aztertzean, ikusten da balio altuak direla, bibliografian aurkitutako balioekin alderatzean. Hala ere, DS eta AA espezieek ohikoak diren erauzi-balioak dauzkate (% 0,91-10,91). PAK, ordea, oso balio altua du (% $14,71 \pm 1,46$). Erauzien azterketan, hain-

bat konposatu agertzen dira: gantzak, gantz azidoak, molekula fenolikoak, terpenoak, erretxin azidoak eta beste hainbat molekula organiko. Konposatu horiek babes mikrobiologiko eta fungizida ematen diote landarearen kulmoari [42].

Bibliografiarekin konparatzean, ondoriozta daiteke aztertutako espezieen lignina- eta holozelulosa-portzentajeak ohikoak direla. 2. taulan ikusten den bezala, hiru banbu-espezieen artean, AA banbuak ditu lignina, hemizelulosa eta α -zelulosa ehuneko altuenak; baxuenak, berriz, DS banbuak. Ligninaren analisisa egitean, espezieen arteko desberdintasunak ikusi dira: PA banbuak AA eta DS espezieek baino % 10 lignina gutxiago du.

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

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

Erreferentzia modura pinua erabili da, bere konposizio kimikoa eta propietate mekanikoak oso ezagunak eta aztertuak direlako ohiko eraikuntza-material gisa [43]. Emaizen arabera (2. taula), hala pinuak nola banbuak holozelulosa eta lignina kantitate antzekoak dituzte. Ligninak egonkortasun termikoa ematen dio landareari. Lignina- eta zelulosa-edukiaren portzentajeak eta horiek sortzen duten morfologiak, besteak beste, eragin nabarmena dute egitura-portaeran [42].

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. Emaitez propietate horien 5. pertzentila ere erakusten dute. Material naturalen propietateek duten bezeko dispersioa saihesteko eta segurtasunaren alde jotzeko asmoz, zuzeko egituren diseinuan ohikoa da batez besteko balioak erabili beharrean 5. pertzentilari dagozkionak erabiltzea. Materialen haustura-tentsioa dentsitatearekiko aztertu ahal izateko, hots, erresistentzia espezifikoa, ρ dentsitateak ere aurkezten dira 3. taulan.

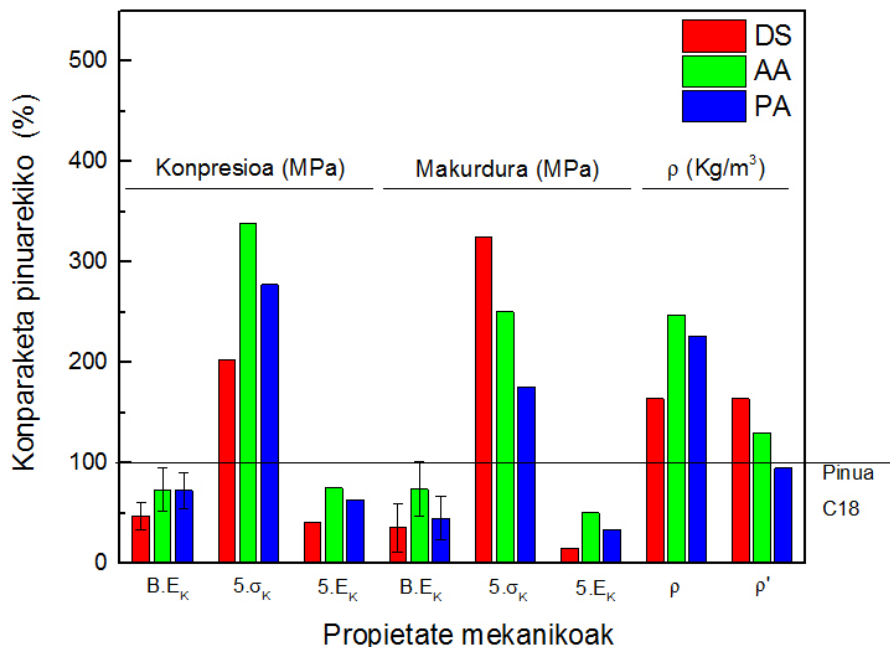
3. taula. DS, AA eta PA banbu-espezieen eta pinu gorriaren (PG) propietate mekanikoak eta dentsitatea.

Propietate mekanikoak		DS	AA	PA	Pinu gorria*	Pinu gorria**	
						C18	C30
Konpresioa	Batezbestekoa	σ_k (MPa) E_k (MPa)	50,4 ± 10,5 4249 ± 1180	78,2 ± 10,8 6645 ± 1605	71,4 ± 11,5 6555 ± 1605	42-47 8600-10000	— 12000
	5. pertzentila	σ_{k5} (MPa) E_{k5} (MPa)	36,6 2454	61,1 4513	50,0 3818	— —	23 8000
	Batezbestekoa	σ_M (MPa) E_M (MPa)	90,3 ± 27,2 3233,7 ± 2181,2	55,3 ± 7,7 6689,5 ± 2454,7	40,5 ± 7,0 4091,2 ± 1898,7	90-110 —	— 12000
Makurdura	5. pertzentila	σ_{M5} (MPa) E_{M5} (MPa)	58,5 921,3	45,1 3038,7	31,6 2042,4	— 8600-10000	30 8000
		ρ (kg/m ³) ρ^* (kg/m ³)	624,45 624,45	939,85 497,00	862,55 362,00	— —	470 470

* Tamaina txikiko probetei buruzko laborategiko datuak, inolako berezitasunik gabe hautatuak (korapiloak, fendak...), egiturazko erabilerarako ta-
maina errealeko laginetan errepikatu ezin den kalitatea.

** 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 C18 klaseko pinu gorria erreferentziazat hartuz (% 100) irudikatzen ditu 3. taulako erresistentzia-datuak. 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 horiek hala konpresioan nola makurduran irudikatu dira. Dentsitateak ezaugarri garrantzitsua dela erakutsi duenez, bere balioak ere gehitu dira (ρ eta ρ').



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

Bi dentsitate-blokeetan, banbuaren hormek oso dentsitate 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 trinkoak 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

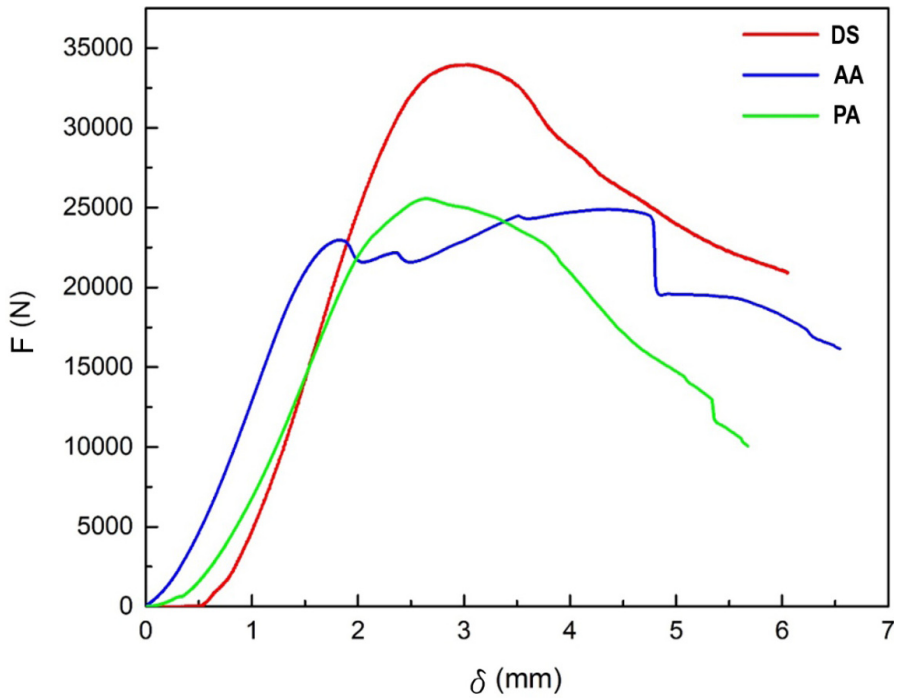
normal negatiboak (profilaren goialdean) eta positiboak (profilaren behealdean) sortzen ditu; balio berekoak dira biak, eta profilean zehar linealki aldatzen dira. Indar ebakitzailerak sekzioaren erdian kokatzen ditu sortutako tentsio ebakitzailerak maximoak. Makurduran, profilaren inertzia-momentuak eragin zuzena du tentsioen banaketan, eta, ondorioz, kalkuluak egiterakoan kontuan hartu behar da AA eta PA barne-hutsak direla. DS ohikoena, aldiz, barne-betea da (barne-diametroa: 0 eta 6 mm artean).

Haustura-tentsio ezberdinak lortu dira makurdura- eta konpresio-probetan. AAk eta PAK haustura-tentsio handiagoa erakusten dute konpresioan, makurduran baino; DSren kasuan, ordea, 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 ditu tentsio ebakitzailerak.

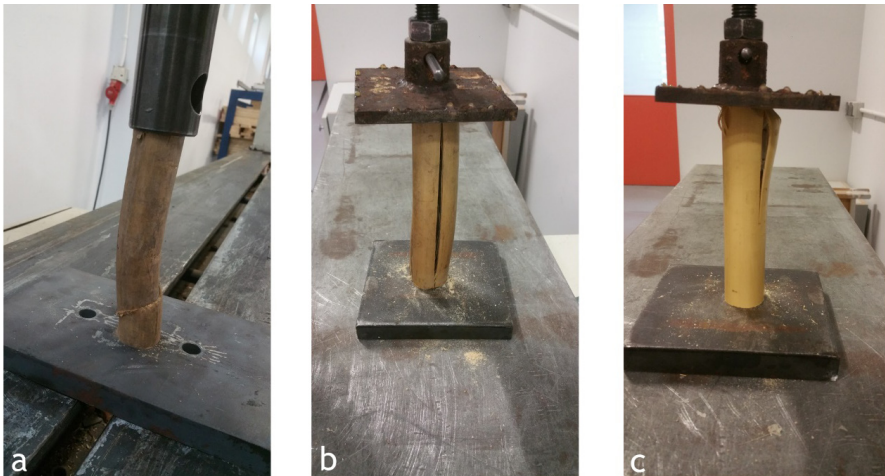
Nabarmena da banbuen elastikotasun-moduluak pinuarenak baino txikiagoak direla, eta hiru banbu-espezieen artean DSk ditu balio baxuenak. AAk PAK baino balio handiagoak ditu (% 30), baina pinuarenak baino % 25 txikiagoak hala ere. Ezaugarri hori garrantzitsua da egituren diseinuan, deformazioak gobernatzeko dituen eta.

3.2.1. Konpresioa

3. irudiak konpresio-probetan lortutako indar-desplazamendu diagramen adibideak erakusten ditu eta 4. irudian hiru banbuekin egindako saiakuntzen argazkiak aurkezten dira. Konpresio-proba jarraitua da DS eta AA banbuentzat; PAK, aldiz, zerra-hortz forma erakusten du. DSren kasuan, barne-betea denez, gilbordurako konpresio-aldean, puntu ahulenean, tolestura agertzen da. Bertan, banantzen hasten dira luzeratako zuntzak. Behin banantzen hasita, haustura era jarraituan gertatzen da, jausirik gabe, tolestura sekzioan 45°-tan zabaltzean. AAk, kulmo zirkular barne-hutsa duenez, hobeto jasaten du gilbordura. Zuntzak batuta mantentzen dituen materialaren tentsio ebakitzailerak gainditzean, pitzadura bat agertzen da zutabearen erdian. Pitzaduraren hazkunde gradualak indar-murritzeta jarraitua dakar grafikokan. PAKen kasuan, hainbat pitzadura sortzen dira berme-puntu batean zapaltzearen ondorioz: pitzadura sortu, eta luzera batera arte soilik hazten da, eta karga jasateko gaitasuna berreskuratzen da, ondorengo pitzadura agertu arte. Zikloa errepikatu egiten da, zutabea kolapsatu arte [44].

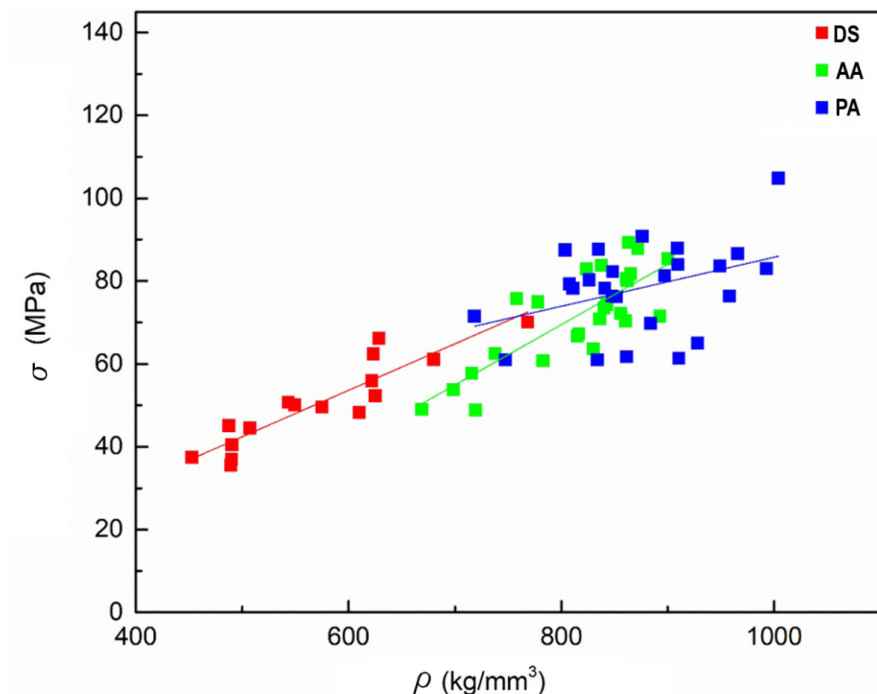


3. irudia. Hiru banbuen indar-deformazio kurbak konpresio-proban.



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

Aztertutako hiru banbu-espezieen haustura-tentsioaren eta dentsitatearen arteko erlazioa 5. irudian ikus daiteke. Grafikoan ikusten da dentsitateak baduela erlazorik konpresio-ko haustura-tentsioarekin: dentsitatea zenbat eta handiagoa izan, orduan eta haustura-tentsio handiagoa izaten du banbuak. 3. taula aztertuz, dentsitateak elastikotasun-moduluan ere antzera eragiten duela ondoriozta daiteke: dentsitate handiagoak zurrunagoa egiten du materiala. 4. irudiko grafikoan, propietateen dispersioa ere antzeman daiteke.

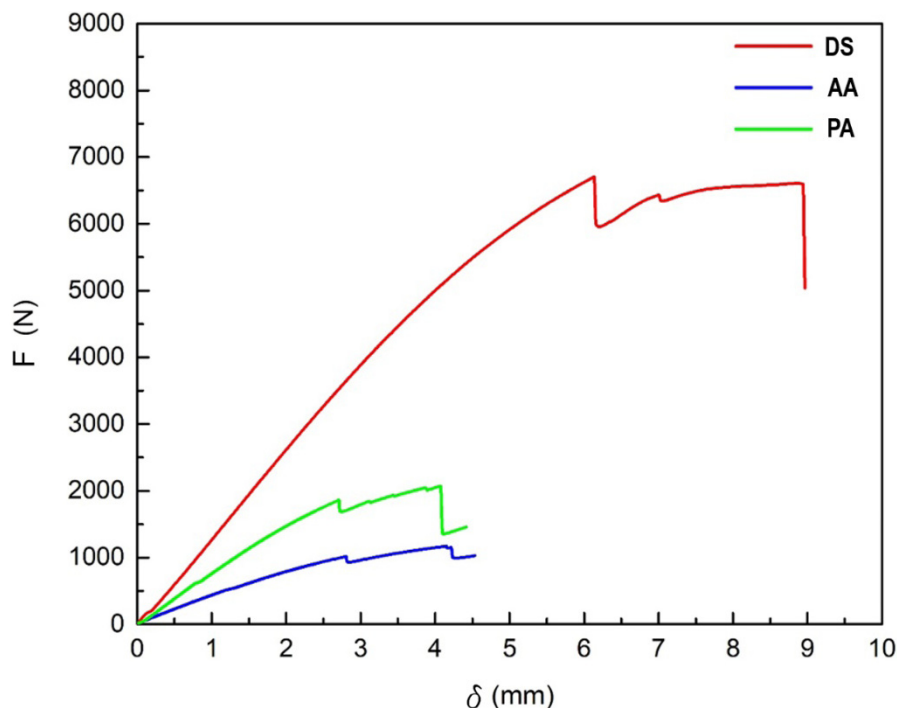


5. irudia. Hiru banbuen haustura-tentsioaren eta dentsitatearen arteko erlazioa konpresio-saiakuntzan.

Konpresio-analisian lortutako ondorioak karakterizazio kimikoko taularekin alderatzen badira, holozelulosak dirudi kantitateei dagokienez ordena bera mantentzen duen bakarra; pentsa daiteke, beraz, holozelulosa kantitatea zenbat eta handiagoa izan, orduan eta handiagoa izango dela konpresioarekiko erresistentzia [43]. Aitzitik, alderantzizko ordena bilatu behar bada, konpresio-saiakuntzaren erresistentzia-emaizak txikitu daitezkeen jakiteko, aztertutako substantzietako bat ere ez dator bat ordenan, eta ondorioztatu behar da substantzia horietako batek ere ez duela konpresioarekiko erresistentzia zigortzen, modu esanguratsuan behintzat.

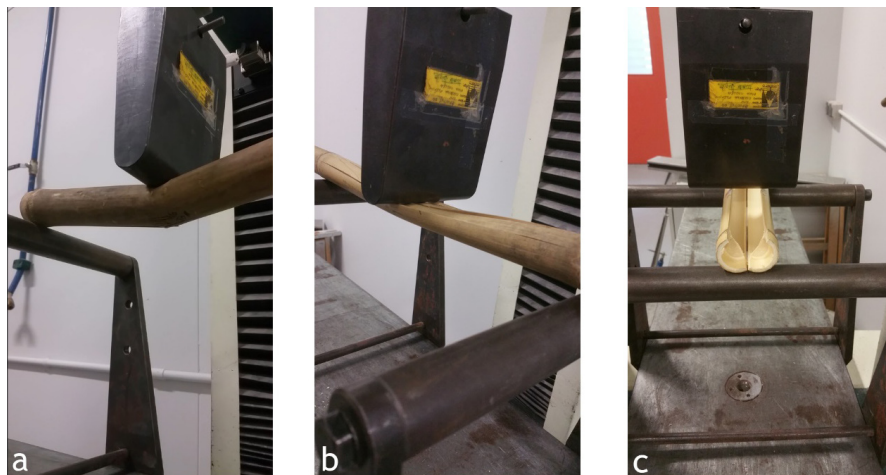
3.2.2. Makurdura

6. irudiak makurdura-proben karga-desplazamenduaren diagramen adibideak aurkezten ditu. 7. irudiak, berriz, hiru banbuekin egindako makurdura-probetako argazkiak erakusten ditu. DS da karga gehien jasaten duena, baina sekzio barne-betea dauka. Konpresio-probaren kasuan bezala, 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 aurrean. Makurdura-saiakuntzetan karga puntuala aplikatzeak eta probetaren berme-puntuak ere puntualak izateak pitzadurak eragin ditu banbuaren kontaktu-puntuak, eta azkartu egin du haustura. Pitzadurak luzeratako norabidean sortu dira barnealdean, konpresio-tentsioen aldean, zuntzen arteko kohe-sio-erresistentzia gainditzean [44]. Berriz ere, tentsio ebakitzailleak zuntzak banantzean, luzeratako pitzadurak sortu dira. 6. irudiko hiru diagramek ze-rra-hortz itxura daukate. Karga gorakorra da, eta, pitzadura bat hastean, barne-marruskaduragatik geldiarazi, eta hurrengo pitzadura sortu arte karga handitzeari berrekiten dio. 3. taulako tentsio maximoan lehenengo pitzadu-rarako karga-balioa erabili da, ez maximoa.



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

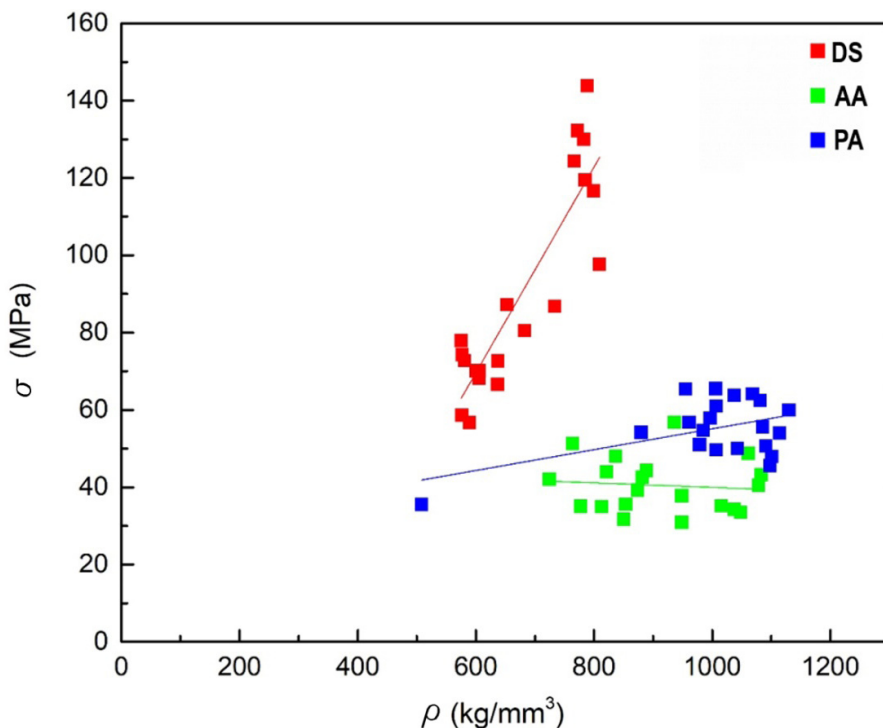
Makurdura-saiakuntzak benetako egoera simulatu behar du. Hainbat egitura-aplikaziotan kargak ez daude uniformeki banatuta, euskarri puntualen bidez aplikatzen baitira (adibidez, forjatuetan eta estalkietan arrastelak). Kasu horietan, arriskuan jar daiteke banbuaren osotasuna, egitura kolapsora eraman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



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

8. irudiak makurdura-probetan bildu diren laginen haustura-tentsioak eta dentsitateak erlazionatzen ditu. Konpresioan bezala, hemen ere dentsitateak eragina du haustura-tentsioan. DS da haustura-tentsio altuenak lotu dituen. Hala ere, emaitzak engainagarriak dira, kulmo barne-betea duenez ezberdina baita haustura-mekanismoa. Kulmo barne-hutsa duten AA eta PA konparagarriak dira, antzeko sekzio eta hausturak baitituzte. Antzeko dentsitateekin, AA erresistenteagoa da PA baino. 8. irudia ikusiz, berriz ere azpimarragarria da emaitzen dispersioa. Hiru banbuetan gertatzen bada ere, DSren emaitzak dira sakabanatze handiena dutenak. Etorkizuneko aplikazio batean 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 zenbat eta gehiago izan, orduan eta handiagoa izango dela makurdurarekiko erresistentzia [43]. Errauntsak ere ordena berean agertzen dira, baina ezin dira materialaren zurruntasunarekin erlazionatu.



8. irudia. Hiru banbuen haustura-tentsioaren eta dentsitatearen arteko erlazioa makurdura-proban.

4. ONDORIOAK

Banbuen konposizio kimikoa eta propietate mekanikoak aztertzean, egiaztatu da DS eta AA espezieetan ligninaren eta hemizelulosaren portzentajeak ebaluatutako zurak dituenen 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 horretan, PAk bakarrik ditu pinu gorriaren zuraren antzeko balioak.

Beraz, material lignozelulosikoen propietate mekanikoek ez dute materialaren konposizioan eta dentsitatean bakarrik eragiten. Zelula-hormetan zelulosak duen banaketarekin lotutako beste faktore batzuk ere kontuan hartu behar dira.

Pinuarekin eta oro har egurrarekin egiten diren laborategi-saiakuntzek materiala karakterizatzeko balio dute, baina ezin dira zuzenean erabili egi-

tura bat kalkulatzeko orduan. Haberik luzeenek zurruntasun eta erresistentzia txikiagoak izan ditzakete inperfekzioen ondorioz.

Banbuaren kasuan, hainbat faktore hartu behar dira kontuan: entsegua, mota, banbuaren morfologia eta, batez ere, korapiloek ematen duten erresistentzia. Ikerketa honetan, banbuen inperfekzioak eta korapiloak ez dira baztertu, eta laginak prestatzeko orduan ez dute jasan 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 ONAK

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, LONDONO X, M.J. 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. WÄLINDER, 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] J.F. 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. PENAVA. «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 diferent 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 São 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 Construcción - 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.