

Primljen / Received: 27.12.2022.

Ispravljen / Corrected: 18.4.2023.

Prihvaćen / Accepted: 5.5.2023.

Dostupno online / Available online: 10.9.2023.

Bambus kao armatura u betonskim konstrukcijama: pregled literature

Autori:



M Sadique Ameen, dipl.ing.građ.

Nacionalni institut Visvesvaraya za tehnologiju,
Indija

sadiqueameen007@gmail.com

Autor za korespondenciju



Izv.prof.dr.sc. **Debarati Datta**, dipl.ing.građ.

Nacionalni institut Visvesvaraya za tehnologiju,
Indija

debaratidatta@apm.vnit.ac.in

Pregledni rad

M Sadique Ameen, Debarati Datta

Bambus kao armatura u betonskim konstrukcijama: pregled literature

Proizvodnja konvencionalnih građevnih materijala kao što su čelik, beton i opeka uzrokuje značajno iskorištavanje prirodnih resursa i emisiju stakleničkih plinova. Stoga je potrebna primjena alternativnih, ekološki prihvatljivih, održivih i jeftinih građevnih materijala. Bambus je prirodni materijal koji može zamijeniti čelik u raznim konstrukcijama. U nekim istraživanjima razmatran je potencijal bambusa kao zamjene za čelik u konstrukcijama. Ovaj rad pruža pregled literature o uporabi betona armiranog bambusom u različitim zemljama.

Ključne riječi:

štapovi od bambusa, konstrukcijski elementi, predgotovljeni zidni paneli, kemijski tretmani, različite norme, veza bambus-beton

Research paper - subject review

M Sadique Ameen, Debarati Datta

Bamboo as reinforcing material in concrete structures: A literature study

The production of conventional building materials such as steel, concrete, and brick causes severe exploitation of natural resources and emission of greenhouse gases. Therefore, alternative eco-friendly, sustainable, and inexpensive building materials are required. Bamboo is a natural material which can replace steel in various structures. Several studies have evaluated the potential of bamboo as a steel replacement in structures. This paper provides a literature review on the use of bamboo-reinforced concretes (BRC) in various countries.

Key words:

bamboo splints, structural members, prefabricated wall panels, chemical treatments, different codes, bamboo concrete bond

1. Uvod

U posljednje vrijeme izgradnja je zgrada i infrastrukturnih projekata u značajnom zamahu. Zbog velikog porasta stanovništva u urbanim područjima, postoji velika potražnja za gradnjom kuća i zgrada, što je dovelo do iskorištavanja tradicionalnih prirodnih resursa. Beton ima široku primjenu kao građevni materijal u cijelom svijetu jer ima visoku tlačnu čvrstoću. Međutim, ima vrlo nisku vlačnu čvrstoću, koja iznosi samo 10 % njegove tlačne čvrstoće. Zbog niske vlačne čvrstoće i krтости, beton zahtijeva vlačnu armaturu, obično u obliku čelične armature. Iako čelik dobro funkcionira s betonom, ima poprilično nedostataka: veliku težinu, osjetljivost na koroziju, visoku cijenu i nije ekološki povoljno rješenje. Da bi prevladali te nedostatke, brojni istraživači razvijaju nove pristupe kako bi ponudili održive zamjene za konvencionalnu armaturu. Bambus je potencijalna zamjena za čelik u armiranom betonu zahvaljujući svojim mehaničkim svojstvima i pozitivnim ekonomskim, društvenim i ekološkim učincima, posebno za jeftine konstrukcije u ruralnim i urbanim područjima.

U samo nekoliko mjeseci bambus postiže svoj puni potencijal rasta, a s godinama postiže maksimalnu mehaničku čvrstoću. Poznato je da bambus ima 50 % manju uzdužnu maksimalnu vlačnu čvrstoću od mekog čelika i ima mnogo veću specifičnu vlačnu čvrstoću od lijevanog željeza, konstrukcijskog čelika, aluminijskih legura, drva i betona [1]. Bambus je korisna alternativa čeličnoj armaturi zahvaljujući svojoj maloj težini, visokoj vlačnoj čvrstoći i sposobnosti regeneracije, osobito na mjestima s lakim pristupom lokalno proizvedenom bambusu. Jedna od najznačajnijih prednosti uzgoja bambusa je njegova sposobnost apsorpiranja ugljičnog dioksida. Stoga je također poznat kao "spremnik ugljika" (engl. *carbon sink*). U današnje vrijeme, brzi porast globalnog zatopljenja izaziva veliku zabrinutost. Bambus može pomoći u smanjenju štetnih učinaka stakleničkih plinova i borbi protiv globalnog zatopljenja.

Široka primjena bambusa kao materijala za armiranje dovest će do povećane potražnje, što će posljedično povećati i proizvodnju, odnosno uzgoj bambusa. Živi bambus apsorbira velike količine CO₂ iz zraka i oslobađa kisik, čime pročišćava atmosferu. S druge strane, proizvodnja čelika negativno utječe na okoliš.

Zreli bambus može se rezati, sušiti i tretirati kako bi postao pogodan za upotrebu u građevinarstvu. Stoga, iako bambus kao drveni materijal nema učinak pročišćavanja atmosfere, njegova proizvodnja rezultira zelenijim okolišem. Prema Akwadi i Akinlabiju [2], bambus ima značajnu ulogu u ublažavanju globalnih klimatskih promjena. Kina ima jednu od najviših stopa sekvenciranja ugljika na svijetu. Bambus brzo raste i stoga proizvodi veću količinu kisika

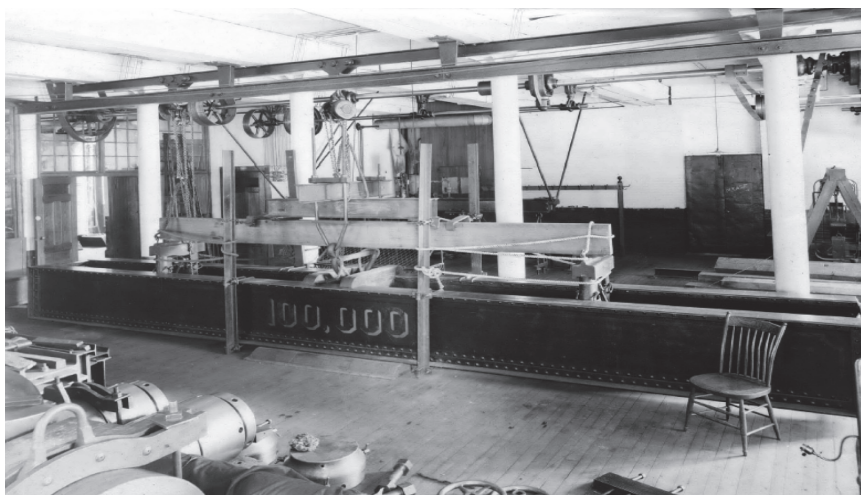
od drugih ekvivalentnih stabala. Prema izvješću Zaklade za okolišni bambus (2001.), bambus oslobađa 35 % više kisika od ekvivalentnih stabala i po hektaru sekvencira do 12 tona ugljičnog dioksida iz zraka.

Bambus može značajno smanjiti emisije stakleničkih plinova, stvarati radna mjesta i tako pružiti visoke prihode uzgajivačima. To je brzorastuća biljka sa snažnim korijenjem i rizomima koji poboljšavaju stabilnost tla. To pokazuje da može stabilizirati i obnoviti zemlju te tako spriječiti pojavu klizišta. Njegovi korijeni vrlo su učinkoviti u sprječavanju erozije tla jer korijenje čvrsto drži tlo.

Bambus ima nekoliko prednosti koje ga čine pogodnim građevnim materijalom. Međutim, također postoje i neka ograničenja. Bambus se brže razgrađuje od čelika jer je prirodni materijal. Postoji više vrsta bambusa, čija se svojstva znatno razlikuju. Nisu sve vrste pogodne za gradnju. Stoga je uzgoj odgovarajućih vrsta jednako važan kao i njihova upotreba u graditeljstvu. Osim toga, kao prirodni materijali, bambusi nisu jednoliki po veličini i obliku. Unatoč tim ograničenjima, bambus je već godinama popularna tema istraživanja. Ovaj rad kategorizira ta istraživanja i prikazuje njihove rezultate.

2. Rana istraživanja

Chow [3] je 1914. godine proveo prvo dokumentirano istraživanje primjene bambusa kao armature u betonu na MIT-u (*Massachusetts Institute of Technology*). Visoka vlačna čvrstoća bambusa potaknula je istraživače da razmotre ideju primjene bambusa u vlačnoj zoni grede. Pripremljene su četiri betonske grede, od kojih su dvije ispitane pod pojedinačnim koncentriranim opterećenjem na sredini grede, a druge su dvije ispitane 60 dana nakon njegovanja uzoraka u uređaju za ispitivanje greda pod opterećenjem u dvije točke, kako je prikazano na slici 1. Rezultati su pokazali da je maksimalno opterećenje pri kojem su kontrolne grede s čelikom i grede s bambusom otkazale iznosilo 19,57 kN odnosno 13,87 kN. Faktor sigurnosti za omjer stvarnog maksimalnog opterećenja i teoretskog opterećenja



Slika 1. Uređaj za ispitivanje betonskih greda [3]

iznosio je 3,2 za grede s čelikom i 2,3 za grede s bambusom s koncentriranim opterećenjem na sredini greda. U drugom ispitivanju, kad je greda bila izložena opterećenju u dvije točke, maksimalno opterećenje uslijed sloma greda s čelikom iznosilo je 30,69 kN odnosno 20,46 kN za grede s bambusom, a faktori sigurnosti za stvarno opterećenje u odnosu na očekivano opterećenje bili su 3,37 za betonske grede s čelikom i 2,25 za betonske grede s bambusom.

Zaključeno je da se bambus u betonu ponaša slično kao čelik te se može koristiti umjesto čelika u manjim konstrukcijama. Međutim, potrebno je više eksperimentalnih ispitivanja i podataka da bi se betonske grede s bambusom mogle primjenjivati u svakodnevnoj praksi.

Osim Chowa [3], nekoliko drugih istraživača ispitivalo je održivost primjene bambusa kao alternativnog armaturnog materijala u armiranome betonu. Više od stoljeća, mnogi su istraživači koristili bambus za armiranje betonskih konstrukcija. U tim istraživanjima upotrebljavali su bambusove trake (poluokrugle trake) ili štapove (cijeli trupci umjerenih promjera). Godine 1950. Glenn [4] je vodio istraživanje koje je financirao američki War Production Board o betonu armiranom bambusom, a koje se odnosilo na izgradnju eksperimentalnih konstrukcija i ispitivanje mehaničkih svojstava. Na temelju rezultata, Glenn [4] je iznio mnoge zaključke koji su pomogli u razvoju smjernica za projektiranje bambusovih štapova kao armature u betonu.

Glenn [4] je primijetio nedostatak betonskih greda armiranih bambusom uslijed opterećenja, a to su velika deformacija, ograničena duktilnost i rani krati slom. Također, otkrio je probleme s vezom između betona i bambusa uzrokovane izraženim bubrenjem i pucanjem bambusa, manju maksimalnu nosivost grede u odnosu na grede armirane čelikom, i potrebu za dodavanjem asfaltnih emulzija. Na temelju maksimalnih vrijednosti naprezanja od 55 do 69 MPa za betonske grede koje u svom sastavu sadrže 3-4 % bambusa, Glenn [4] je predložio da vlačno naprezanje bude 34-41 MPa. Predloženo je da udio bambusa u uzorku bude 3-4 % kako bi se održala deformacija grede ispod $l/360$ raspona.

Izješće su priredili Brink i Rush [5] 1966. godine kako bi pomogli timu na terenu u projektiranju i izgradnji betona armiranog bambusom primjenjujući tehniku dopuštenih naprezanja, a to je metoda slična onoj opisanoj u ACI 318 [6] za beton armiran čelikom. Na temelju čvrstoće veze od 0,34 MPa i maksimalnog kapaciteta od 124 MPa, predložili su razumno vlačno naprezanje bambusa od 28 MPa. Za kriterij uporabljivosti, predložen je elastični modul bambusa od 17,2 GPa.

Nakon toga, izgrađen je savojni betonski element armiran bambusom kao betonski element bez armature, s maksimalnim vlačnim naprezanjem od $0,67 \sqrt{f'_c}$ (vlačna čvrstoća betona u MPa), prema hibridnoj tehnici projektiranja koju su predložili Geymayer i Cox [7] 1970. godine. Utvrdili su to da se s udjelom bambusa u betonu od 3 do 4 % može postići ukupni sigurnosni faktor od 2 do 2,5. Brojna istraživanja koja opisuju savojne elemente armirane bambusom pružaju dokaze koji podržavaju metode projektiranja koje su predložili Geymayer i Cox [7]. Osim

toga, kod optimalnih omjera uzdužne armature bambusa od 3 do 5 %, betonski savojni element koji bi inače bio nearmiran pokazao je povećanje kapaciteta od barem 2,5 puta.

U jednom od ranijih istraživanja u Indiji, Kurian i Kalam [8] ispitivali su konstrukcijske elemente izrađene od zemlje i cementa, armirane bambusom. Glavni cilj tog istraživanja bio je identificirati ekonomičnu alternativu za ruralno stanovanje u Indiji. Riječ je o mješavini usitnjene zemlje s malim količinama (4-10 % prema težini zemlje i vode) portlandskog cementa. Taj materijal bio je široko primijenjen za izgradnju posteljica cesta i zračnih luka sredinom tridesetih godina 20. stoljeća. U studiji su ispitivani temelji, zidovi i pločnici od mješavine zemlje i cementa armirane bambusom. Bambus je bio tretiran otopinom od 40 % kolofonija u alkoholu i premazan bijelom olovnom bojom kako bi postao vodootporan.

Zabilježeno je da mješavina zemlje s cementom armirana bambusom pokazuje značajno povećanje čvrstoće tijekom vremena. Bambus nije učinkovit kao tlačna armatura zbog svoje niske tlačne čvrstoće, koja proizlazi iz njegove vlaknaste prirode. Rezultati su pokazali da su takvi konstrukcijski modeli bili dobri u pogledu otpornosti na savijanje. Osim toga, zaključeno je da armiranje mješavine zemlje i cementa bambusom daje značajnu krutost fleksibilnim kolnicima. Nadalje, utvrđeno je da obična mješavina zemlje i cementa armirana bambusom bez pokušaja smanjenja visine presjeka, dobro funkcionira u pogledu savojne otpornosti. Zaključeno je da takav materijal ima potencijal za upotrebu u ruralnoj gradnji, posebno za gradnju zidova, temelja i pločnika.

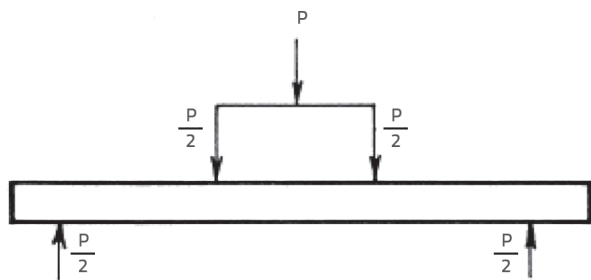
Mansur i Aziz [9] proveli su eksperimentalno istraživanje održivosti primjene pletene bambusove mreže kao armature za cementni mort. Mreža od bambusa povećala je vlačnu čvrstoću, čvrstoću na savijanje, i čvrstoću morta uslijed udara, kao i njegovu duktilnost i žilavost. Istraživanja su pokazala da betonske grede s 2-3 % armature od bambusa znatno bolje podnose opterećenja negoli obične betonske grede tijekom ispitivanja čvrstoće na savijanje [10].

3. Armiranje bambusom u različitim konstrukcijskim elementima

Prethodna ispitivanja pokazuju da je područje istraživanja betona armiranog bambusom još u razvoju. Potrebna su daljnja eksperimentalna istraživanja prije nego što će se donijeti bilo kakav zaključak. Provedena su različita eksperimentalna ispitivanja o primjeni bambusa kao armature u konstrukcijskim elementima, a neke od armatura opisane su ovdje.

3.1. Bambus kao armatura u ploči

Kankam i Odum-Ewuakye [11] proveli su ispitivanja na 13 jednostavno oslonjenih ploča nosivih u jednom smjeru koje su armirane šipkama od babadua (lat. *Thalia geniculata*). Ploče su opterećene u četiri točke. Shematski prikaz opterećenja u četiri točke prikazan je na slici 2.



Slika 2. Shematski prikaz opterećenja u četiri točke [11]

Rezultati su pokazali da su ploče otkazale zbog prevelike deformacije, savojnog otkazivanja štapova od bambusa u vlaku ili drobljenja betona. Kratkoročni faktor sigurnosti od približno 2 za pukotine i 3 za otkazivanje postignut je za omjere raspona i efektivne debljine ploče između 12,5 i 9,3 te omjere posmičnog raspona i efektivne debljine ploče između 4,2 i 6,44.

Ploče su imale izuzetno duktilno ponašanje te su imale značajan progib prije sloma. Kankam i Odum-Ewuakye [12] upotrijebili su šipke od bambusa *babadua* (*Thalia geniculata*) kao armaturu u pločama nosivim u dva smjera koje su bile oslonjene na sva četiri kraja. Primijećeno je značajno poboljšanje čvrstoće na savijanje i čvrstoće na proboj uslijed monotonih i cikličkih opterećenja. Također je primijećeno da betonska ploča armirana bambusom ima odgovarajuću krutost uslijed progiba.

Godine 2005. Ghavami [13] istraživali su betonske ploče s trajnom oplatom koristeći bambus *Dendrocalamus giganteus*. Polovice bambusova debla, koje su korištene kao trajne oplate, bile su ispunjene betonom, kao što je prikazano na slici 3.

Na bambusovo deblo nanesen je gel Sikadur 32 kako bi se spriječilo upijanje vode iz betona. Ispitana je posmična otpornost za cijela debla bambusa *Dendrocalamus giganteus*, kao i za debla uzdužno prerezana popola. Polovice debla imale su posmičnu čvrstoću od 10,89 MPa, sa standardnom devijacijom od 2,56 MPa.

Perera i Lewangamage [14] upotrijebili su trake *Bambus vulgaris* za armiranje ploče dimenzija 600 × 60 × 100 mm. Istraživali su savijanje ploča pod ravnomjerno raspoređenim opterećenjem u središtu ploče. Prema rezultatima koje su dobili, ploče armirane čelikom i bambusom imale su bolja svojstva od kontrolnih ploča armiranih čelikom i ploča armiranih samo bambusom.

Muda i sur. [15] ispitivali su učinkovitost betonskih ploča armiranih bambusom koje su bile izložene udarnom opterećenju. Bambus je isprepleten u mrežu s razmacima od

50 mm, a trake su rezane na širine od 7,5 mm, 5 mm i 2,5 mm. U ovom eksperimentu korištene su ljuske palme uljarice u betonskoj mješavini kao alternativa tradicionalnim agregatima, a omjer ljuski i cementa iznosio je 0,45 i 0,6. Zaključili su da je širina bambusovih traka imala značajan utjecaj na udarnu otpornost kod pojave prve pukotine, a debljina ploče imala je još veći učinak. Godine 2016. Muda i sur. [16] ispitivali su ponašanje pri udaru jednostavno oslonjenih bambusom armiranih betonskih ploča nosivih u jednom smjeru dimenzija 300 mm × 300 mm. Armatura je pripremljena od bambusa Buloh kuning (*Bambus vulgaris schrad*). Rižina ljuska dodana je u beton koji se koristi za izradu ploča u omjerima od 5 % i 10 % u odnosu na obični portlandski cement koji je u skladu s ASTM tipom I [17]. Tijekom eksperimenta ispitana je otpornost ploča na udar u odnosu na promjer bambusa i debljinu ploče. Zabilježeno je to da za obje vrste betonskih mješavina, promjer bambusa i debljina ploče imaju linearni odnos s početnom i konačnom čvrstoćom pukotina. Potrebno je dodatno ispitati otpornost na udar betonskih ploča armiranih bambusom u odnosu na konvencionalne armiranobetonske ploče.

Chithambaram i Kumar [18] proučavali su ponašanje ploča izrađenih od ferocementa i bambusa s djelomičnom zamjenom cementa letećim pepelom, pri savijanju. Za armaturu su koristili žičanu mrežu za perad i trake od bambusa. Promatrani su rezultati djelomične zamjene cementa letećim pepelom i variranje debljine ploče. U sklopu eksperimentalnog programa ispitano je dvanaest ferocementnih panelastih ploča dimenzija 470 × 940 mm, debljine 40 i 50 mm, od kojih svaka sadrži po šest panela. Šest panela izrađeno je korištenjem tipične žbuke u omjeru 1:3, a drugih šest izrađeno je 15-postotnom zamjenom cementa letećim pepelom. Sve su ploče njegovane 28 dana u mokrim vrećama prije nego su ispitane pod ravnomjerno raspoređenim opterećenjem. Prema rezultatima ispitivanja, obje su ploče imale početne pukotine i čvrstoće pri sličnim opterećenjima. U usporedbi s eksperimentalnom nosivosti, trake od bambusa doprinijele su povećanju procijenjene konačne nosivosti ploče, koja je bila otprilike tri puta veća od one kod morta i žičane mreže.

Mali i Datta [19] istraživali su panelaste ploče armirane bambusom koristeći polukružne bambusove štapove s utorima (slika 4.). Upotrijebili su epoksidno ljepilo kako bi smanjili sposobnost upijanja vode bambusovih traka iz okolnog betona. Ispitano je petnaest betonskih ploča dimenzija 600 × 600 × 100 mm koje su u skladu s pravilima Eurocoda EN-14488-5 (2006) [20].

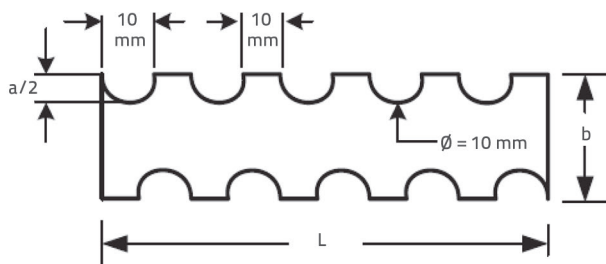
Učinci potpune zamjene primarne čelične armature bambusom ispitani su s obzirom na oblik sloma, uzorke pukotina, kapacitet apsorpcije energije i karakteristike odnosa opterećenja i deformacije.

Usporedbom uzoraka obične betonske i armiranobetonske ploče, otkriveno je da betonske ploče armirane bambusovim trakama sa žljebovima imaju značajno



Slika 3. Trajne oplate od bambusa za betonske ploče [13]

veću nosivost i sposobnost deformiranja. Osim toga, otpornost ploče na savijanje znatno je poboljšana te je samo neznatno lošija u odnosu na armiranobetonske ploče s armaturnim šipkama od mekog čelika.



Slika 4. Polukružne bambusove trake [19]

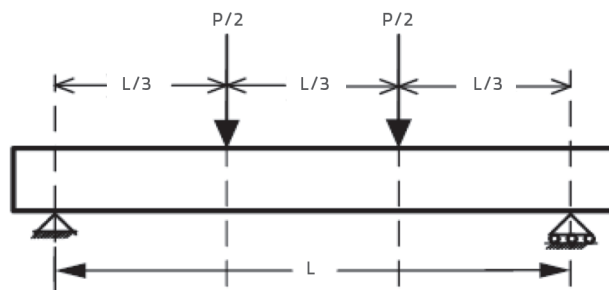
Nedavno su Haryanto i sur. [21] ispitivali ponašanje betonskih temeljnih ploča armiranih bambusom izloženih koncentriranom opterećenju. Izgrađene su i ispitane tri različite betonske ploče armirane bambusom i jedna ploča izrađena od betona armirana čelikom, svaka dimenzija $600 \times 600 \times 70$ mm. Kako bi se utvrdila prednost korištenja bambusa umjesto čelika za armaturu, izmjereno je konačno opterećenje, krutost, karakteristike odnosa opterećenja i deformacije, uzorak pukotina, kapacitet apsorpcije energije i duktilnost betonskih ploča. Korišteno je deblo lokalno dostupnog bambusa (*Gigantochloa apus*) prosječne vlačne čvrstoće od 138 MPa. Trake od bambusa pažljivo su premazane kako bi se smanjila njihova sposobnost upijanja vode. Sastav mješavine i ispitivanje uzorka provedeni su prema kriterijima SNI 1974:2011 (BSN 2011). Volumen krupnog agregata podijeljen je u dvije različite frakcije kako bi se osigurala odgovarajuća veza bambusa i betona. Omjer frakcija promjera 20 mm i 10 mm bio je 70 : 30. Prema rezultatima, betonske ploče armirane bambusom mogu postići 82 postotnu čvrstoću betonskih ploča armiranih čelikom. Nadalje, duktilnost dviju vrsta uzoraka bila je gotovo usporediva (do 93%). Autori su zaključili da su mehanička svojstva ploča armiranih bambusom i čelikom slična.

Iz toga se može zaključiti da betonske ploče armirane trakama od bambusa imaju gotovo jednake rezultate kao i betonske ploče armirane čelikom. Kada se koriste kao armatura, trake od bambusa sa žljebovima imaju veću čvrstoću od običnih traka od bambusa. Osim toga, potrebna je obrada bambusa kako bi se smanjio njegov kapacitet upijanja vode iz betona i povećala njegova trajnost.

3.2. Bambus kao armatura u gredi

Grede su jedan od najvažnijih elemenata konstrukcije građevine. Prenose horizontalna i vertikalna opterećenja. Tradicionalno se čelik koristio kao armatura u gredama kako bi se povećala njihova nosivost. Provedeno je istraživanje kako bi se poboljšala mehanička svojstva običnog betona zamjenom čelika s prirodnim materijalima. Ispitane su betonske grede armirane bambusom

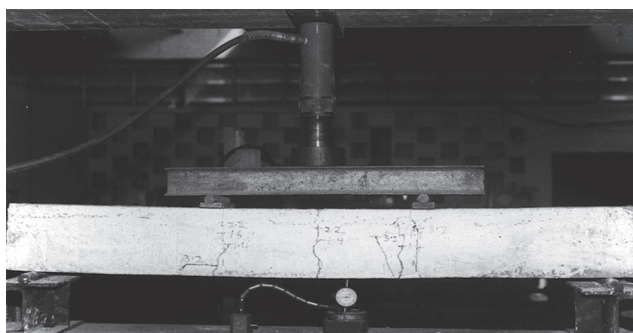
dimenzija $140 \times 150 \times 1100$ mm kako bi se razumjelo njihovo ponašanje pri savijanju. Mali i Datta [22] istraživali su ponašanje betonskih greda armiranih bambusom pri savijanju u četiri točke (slika 5.).



Slika 5. Dijagram ispitivanja s opterećenjem u četiri točke [22]

Eksperimentalna ispitivanja provedena su na tri različite vrste betonskih greda, i to na gredama s tradicionalnom armaturom od čelika, gredama s armaturom od bambusa i gredama od običnog betona (bez armature). Analizirani su kapacitet apsorpcije energije, opterećenje do sloma, čvrstoća na savijanje, posmična čvrstoća i linearna krutost greda, kako bi se bolje razumjelo njihovo ponašanje pri savijanju. Ispitivana su dva tipa bambuskih greda armiranih bambusom s uzdužnom i posmičnom armaturom (vilicama) od bambusovih traka. Betonske grede pripremljene su korištenjem 2,8 % i 3,8 % uzdužne armature od bambusa u odnosu na presjek grede.

Zaključeno je to da su grede armirane bambusom imale mnogo bolja svojstva negoli grede od običnog betona (bez armature), u pogledu opterećenja do sloma, pojave prve pukotine, duktilnosti i sposobnosti apsorpcije energije. Nadalje, utvrđeno je da je čvrstoća na savijanje betonskih greda armiranih bambusom s 3,8 % bambusove armature usporediva sa čvrstoćom armiranobetonske grede koja sadrži 1,23 % čelične armature. Kankam i Odum-Ewuakye [23] istraživali su čvrstoću na savijanje i ponašanje greda armiranih bambusom Babadua (*Thalia geniculata*) dimenzija $100 \times 180 \times 1500$ mm i $135 \times 235 \times 1800$ mm s različitim postocima vlačne armature (2,87 - 12,13). Vilice su napravljene od traka bambusa *Babadua* čija je debljina iznosila približno 8 mm. Grede su ciklički opterećene do sloma u četiri točke, kao što se može vidjeti na slici 6.



Slika 6. Eksperimentalno opterećenje grede u četiri točke [23]

Tablica 1. Nedavna istraživanja betonskih greda armiranih bambusom

Autor	Vrsta bambusa	Tretiranje bambusa	Dimenzije grede	Rezultati ispitivanja
Anto i suradnici (2023.) [25]	Dendrocalamus Strictus	Nije tretiran	140 x 150 x 1100 mm	Čvrstoća usporediva sa čvrstoćom grede armirane čelikom
Al-Fasih i suradnici (2022.) [26]	Bambusa Heterostachya (BH), Schizostachyum Brachycladum (SB) i Bambusa vulgaris Vittata (BV)	Nije tretiran	150 x 150 x 1000 mm	Vrste bambusa BV i BH mogu zamijeniti čeličnu armaturu
Budi i Rahmadi (2019.) [27]	Dendrocalamus Asper	Nije tretiran	110 x 150 x 1700 mm	Trake s utorima u obliku slova U poboljšavaju otpornost greda na savijanje
Awoyera i suradnici (2019.) [28]	Lokalno dostupni bambus	Bitumensko ljepilo	150 x 150 x 2000 mm	Čvrstoća na savijanje raste sa starenjem greda

Rezultati su pokazali da je do sloma greda došlo zbog savojnog sloma uzrokovanog drobljenjem betona ili dijagonalnog vlačnog sloma betona u posmičnom rasponu. Uz to, proveli su ispitivanje svojstava greda starih više od godinu dana. Čvrstoća na savijanje greda armiranih bambusom *Babadua* nije se promijenila, a bambusove trake nisu oštećene.

Za ruralne građevine, Mark i Russell [24] proveli su usporedno ispitivanje betonskih greda armiranih bambusom koristeći različite materijale za poprečnu armaturu. Koristili su trake *Bambusa vulgaris* za uzdužnu vlačnu armaturu, a bambus, trsku od ratana i čelik za poprečnu armaturu. Savojna ispitivanja opterećenjem u četiri točke vršena su do sloma greda. Koristeći model pripremljen u ovom istraživanju, ispitana je najjeftinija i najisplativija metoda za posmičnu armaturu u gredama armiranim bambusom. Pokazalo se da je čelična poprečna armatura najisplativija opcija na temelju indeksa svojstava grede (BPI), koji mjeri količinu energije apsorbirane po jedinici cijene grede.

Osim prethodno spomenute literature, provedeno je i mnogo drugih istraživanja betonskih greda armiranih bambusom, a neka novija istraživanja navedena su u tablici 1.

Iz rasprave je zaključeno to da se otpornost na savijanja grede povećava kada je armirana bambusovim trakama. S obzirom na poprečni presjek grede, udio od 3,8 % bambusove armature usporediv je s 1,23 % čelične armature u gredi. Osim toga, grede armirane bambusom s čeličnom poprečnom armaturom imale su bolja svojstva.

3.3. Bambus kao armatura u stupu

Stup je konstrukcijski element koji tlačno opterećenje gornje konstrukcije prenosi na donju konstrukciju. Leelatanon i sur. [29] ispitivali su duktilnost i tlačnu čvrstoću kratkih betonskih stupova (125 x 125 x 600 mm) s uzdužnom i posmičnom armaturom od bambusa izloženih koncentričnom opterećenju.

Trake od bambusa tretirane su vodoopornim premazom (Sikadur-31 CFN). U usporedbi s trakama koje nisu zaštićene premazom, a koje se koriste u stupovima, premaz je povećao čvrstoću i duktilnost stupova armiranih trakama s premazom. Zaključeno je da se u stupu 1,6 % armature od čelika može zamijeniti s 3,2 % armature od tretiranog bambusa, a dobit će se ekvivalentno ponašanje stupa, ista čvrstoća i elastičnost.

Da bi popravili i pojačali betonske stupove armirane tretiranim bambusom, kvadratnog presjeka, dimenzija 150 x 150 x 600 mm, Akinyemi i Omoniyi [30] ispitivali su upotrebu akrilnog polimera kao modifikatora betonske matrice i ferocementa kao dodatka betonu. Izgrađeno je trideset stupova, od kojih je deset izrađeno od mješavine konvencionalnog i modificiranog betona, te su izloženi opterećenju do sloma. Deset dodatnih betonskih stupova pripremljenih od obje spomenute mješavine bilo je unaprijed opterećeno sa 75 %, 50 % i 25 % opterećenja uslijed loma, pojačano ferocementnim slojem, a zatim podvrgnuto osnom ispitivanju. Zadnjih deset betonskih stupova bilo je obloženo ferocementnim slojem. Tijekom ispitivanja mjerile su se aksijalne i lateralne deformacije.

Utvrđeno je da je betonski stup s dodatkom cementa i polimera imao 60 % veću otpornost na slom u odnosu na kontrolni betonski stup. Stupovi koji su pojačani ferocementom imali su najmanji bočni (93 %) i aksijalni progib (72 %). Uslijed sloma betonskih stupova, u pukotinama su bila vidljiva ispupčenja i ljuštenje morta. Čvrstoća stupova pojačanih ferocementnim slojem i akrilnim polimerom bila je gotovo jednaka čvrstoći kontrolnih stupova.

Agarwal i suradnici [31] proveli su ispitivanja o aksijalnoj kompresiji i poprečnom opterećenju na stupovima bez armature, stupovima armiranim čelikom i stupovima armiranim bambusom kako bi utvrdili njihov lateralni progib, sposobnost prenošenja opterećenja i vrste sloma. Stupovi su armirani bambusom *Melocanna bambusoides* smeđe boje starim 3-4 godine. Modul elastičnosti iznosio je 24,46 GPa, a prosječna vlačna čvrstoća

185,93 MPa. Bambus je premazan različitim kemijskim adhezivima, konkretno Tapcrete P-151, Anti Corr RC, Araldite i gel Sikadur 32, kako bi se ispitaio njihov utjecaj na vezu bambusa i betona. Za izradu 24 stupca dimenzija $150 \times 150 \times 1000$ mm korišten je beton klase M20. Izgrađena su tri stupa: jedan bez armature, jedan stup s 0,89 % armature od čelika, jedan s neobrađenim bambusom (s armaturom od 8 %, 5 % i 3 %) i jedan s tretiranim bambusom (s armaturom od 8 %, 5 % i 3 %).

Iz prethodnih rezultata može se zaključiti da je Sikadur 32 gel pružio najjaču vezu između bambusa i betona. Stup armiran s 8 % tretiranog bambusa mogao je podnijeti opterećenje koje je bilo usporedivo s opterećenjem koje podnosi stup s čeličnom armaturom. Stupovi armirani netretiranim bambusom, zbog loše veze između bambusa i betona, mogli su podnijeti značajno manje opterećenje od stupova armiranih tretiranim bambusom.

3.4. Bambus kao armatura u zidovima

Zidovi su jedni od najvažnijih elemenata građevnih konstrukcija. Obično zauzimaju većinu prostora u građevini, a grade se od različitih vrsta materijala. Najčešće se grade od opeke kako bi se povećala težina zgrade (mrtvo opterećenje). Međutim, opeka znatno povećava cijenu zidova i ima nepovoljan utjecaj na okoliš jer se izrađuje od plodne zemlje. Puri i suradnici [32] proučavali su predgotovljene zidne panele armirane bambusom, koji su korisni za pristupačnu stanogradnju. Izgradili su zidne panele duljine 2440 mm, širine 300 mm i debljine 50 mm. Trake bambusa *Balcoa* debljine 3-5 mm korištene su kao armatura u zidnim panelima. Trake su bile isprepletene, dimenzija otprilike 50×50 mm. Bambus sadrži celulozu, pa je tretiran vapnenom vodom kako bi se spriječilo njegovo propadanje zbog insekata i stvaranja gljivica. Da bi se smanjila sposobnost upijanja vode bambusa, korištena je Sikadur 32 LP epoksidna smola kao alternativa gelu Sikadur 32. U izradi zidnih panela upotrijebljena je smjesa morta s omjerom cementa i pijeska 1:2. Paneli su podvrgnuti ispitivanju udarnim čekićem i poprečnim opterećenjem. Rezultati su pokazali da je sustav zidnih panela značajno povoljniji, energetske učinkovitiji i lakši u usporedbi sa standardnim zidovima od opeke. U usporedbi sa zidovima od opeke, vlastita težina takvih zidova je 56 % manja, a cijena im je niža za 40 %.

Ganesan i suradnici [33] proučavali su čvrstoću i ponašanje zidnih panela od betona armiranog bambusom pod djelovanjem dvosmjernog opterećenja u ravnini. Za armiranje su korištene trake bambusa *Bambos*, širine 20 mm, debljine 8 do 15 mm, koje su premazane voodootpornim premazom. Trake su potom pjeskarene kako bi se postigla bolja veza s betonom. Pripremljena su tri prototipa zidnih panela, s omjerima širine i visine 1,667, 1,818 i dva s omjerima debljine 12,5, 13,75 i 15. Svi uzorci imali su konzistentan omjer vitkosti od 25. Za ispitivanje sloma zidnih panela s različitim omjerima visine i debljine primijenjeno je jednoliko raspodijeljeno opterećenje u ravnini primijenjeno na ekscentričnost od $t/6$.

Rezultati ispitivanja pokazali su da zbog dvosmjernog djelovanja zidnih ploča dolazi do dvoosnog savijanja u ravninama paralelnim i okomitim na os opterećenja, uzrokujući stvaranje dijagonalnih pukotina koje se protežu od uglova do središta zidnih panela. S povećanjem omjera širine i visine progib zidnog panela se povećavao. Zidni paneli od betona armiranog bambusom s omjerima stranica u rasponu od 1,667 do 2 i omjerima debljine u rasponu od 12,5 do 15 mogli su izdržati težine do 630 kN.

Može se zaključiti to da su zidni sustavi armirani bambusom pristupačniji i lakši od tradicionalnih zidnih sustava. Imaju veću nosivost od tradicionalnih zidova od opeke. Bambusove trake treba tretirati odgovarajućim premazima kako bi se spriječilo njihovo propadanje. Konačno, može se zaključiti da su zidni paneli od betona armiranog bambusom dobra zamjena za tradicionalne zidove od opeke.

4. Svojstva konstrukcija armiranih bambusom pri dinamičkom opterećenju

Beton armiran bambusom je popularan kompozitni materijal zahvaljujući svojoj čvrstoći, izdržljivosti i niskoj cijeni. Učinak dinamičkog opterećenja na elemente armirane bambusom važan je čimbenik koji treba uzeti u obzir pri projektiranju konstrukcija koje su izložene seizmičkoj aktivnosti. Jedno od ograničenja takvog betona je njegova ograničena duktilnost, što je problem u seizmičkim područjima u kojima konstrukcije moraju izdržati velike deformacije tijekom potresa kako bi se izbjeglo njihovo urušavanje. Provedeno je nekoliko istraživanja o učincima dinamičkog opterećenja na betonske elemente armirane bambusom.

Kako bi se razumjelo seizmičko ponašanje kuća izgrađenih korištenjem bambusa kao armature, Kaushik i suradnici [34] istražili su svojstva konstrukcija tijekom potresa u Sikkimu koji se dogodio 14. veljače 2006. Taj je potres bio umjerene jačine, magnitude 5,7 stupnjeva po Richteru. Povijesne građevine, zidane konstrukcije i zgrade od armiranog betona imale su velika oštećenja tijekom potresa, a tradicionalno građene drvene/bambusove kuće ostale su iznimno dobro. Jedan takav tradicionalni sustav stanovanja koji se obično primjenjuje u Sikkimu jest sustav stanovanja "Ikra", kao što je prikazano na slici 7.



Slika 7. Tipična "Ikra" kuća [34]

Kuće "Ikra" su jednokatne građevine sa zidanim zidovima od opeke ili kamena koji se protežu do otprilike jednog metra iznad nadtemeljne grede. Ta opeka služi kao oslonac ožbukanim zidovima od bambusa upletenog u drvene okvire. Obično se koriste GI krovne ploče poduprte rešetkama od bambusa. Utvrđeno je da nije bilo značajnih oštećenja na takvim kućama, pa se stoga može zaključiti da tradicionalno izgrađene konstrukcije od bambusa za stanovanje dobro funkcioniraju tijekom potresa. González i Gutiérrez [35] istraživali su svojstva Bahareque zidova od bambusa u uvjetima cikličkog opterećenja. Bahareque zidovi sadrže cementnu žbuku s obje strane drvenog okvira s rascijepljenim bambusom u sredini. Primarni cilj istraživanja bio je izvršiti eksperimentalnu procjenu krutosti i deformacijskih svojstava montažnih "bamboo bahareque" posmičnih zidova koje je u Kostariki razvila Zaklada Bambus (eng. *Bamboo Foundation - FUNBAMBU*), izloženih horizontalnim cikličkim opterećenjima koja simuliraju potres. Eksperimentalno je ispitano sedam zidnih panela duljine 2,7 m, visine 2,4 m i debljine od 40 do 60 mm. Rezultati su pokazali da zidovi armirani bambusom *Bahareque* imaju dovoljnu otpornost da izdrže opterećenja uzrokovana potresima većih magnituda. Tijekom cikličkog opterećenja pokazali su duktilno ponašanje. Bambus ima visok omjer čvrstoće i težine, što znači da može izdržati velika opterećenja, a da ne postane pretežak. Osim toga, bambus ima visoku sposobnost prigušivanja koja mu omogućuje apsorpiranje i raspršivanje energije u obliku topline. Ova svojstva čine bambus idealnim materijalom za konstrukcije otporne na potres.

Moroz i suradnici [36] istraživali su svojstva posmičnih zidova od betona armiranih bambusom. Izgrađena su dva različita tipa zidova: jedan armiran konvencionalnom čeličnom armaturom, a drugi armaturom od bambusa *Tonkin Cane*, vertikalno i horizontalno, u veznim gredama. Zabilježeno je da zidovi armirani bambusom pokazuju povećani posmični kapacitet duktilnosti u usporedbi s betonskim blokovima od običnog betona bez armature. Osim toga, primijećeno je da su bambusom armirani posmični zidovi pokazali vrlo slično ponašanje onima armiranim čelikom. Međutim, potrebno je obratiti posebnu pozornost kako bi se spriječilo bambusovo upijanje vlage iz cementne matrice. Nakon ispitivanja zidova pri dinamičkom opterećenju, utvrđeno je da beton armiran bambusom ima dobru otpornost na zamor i udarna opterećenja. Međutim, potrebna su daljnja istraživanja kako bi se u potpunosti razumjela dinamička svojstva takvog betona i njegovo ponašanje pod različitim vrstama opterećenja. Općenito, korištenje betona armiranog bambusom u protupotresnim konstrukcijama zanimljivo je područje istraživanja s potencijalom revolucioniranih dostignuća u građevnoj industriji.

5. Različite norme za bambus

Desetljećima su istraživači provodili nekoliko ispitivanja kako bi istražili potencijal bambusa kao materijala za armiranje konstrukcijskih elemenata. Ta su istraživanja pomogla u razvoju

normi za bambus, kako bi se bolje razumjela njegova svojstva. Norma IS 8242:1976 [37] navodi različite metode za ispitivanje rezanog bambusa. Ta je norma primjenjena za procjenu fizikalnih i mehaničkih karakteristika rezanog bambusa, kao što su udio vlage, specifična težina, čvrstoća na savijanje, tlačna i vlačna čvrstoća. Na sličan način, norma IS 6874:2008 [38] navodi različite metode ispitivanja za određivanje fizikalnih i mehaničkih svojstava okruglog bambusa. Ta norma također sadrži metode za određivanje gustoće, skupljanja i vlačne čvrstoće bambusa.

Tretiranje bambusa je važno kada se koristi u građevne svrhe. U normi IS 9096:2006 [39] navedeni su konzervansi i postupci tretiranja bambusa koji se upotrebljava za gradnju konstrukcija, za skele, kuće, zidove, rešetke i stupove. Osim toga, navedeni su prijedlozi najboljih postupaka na temelju brojnih primjena bambusa. Neke od kemikalija koje se preporučuju za tretiranje bambusa su ugljeni katran, bakar cink-naftat, bakar-krom-arsen, bakar-krom-bor i borna kiselina.

Norma IS 15912:2018 (Projektiranje konstrukcija primjenom bambusa - Pravila struke) [40] važna je za projektiranje konstrukcija od betonskih elemenata armiranih bambusom. Što se tiče mehaničke otpornosti, stabilnosti i izdržljivosti konstrukcije, ta norma nudi koncepte projektiranja betonskih ploča armiranih bambusom u zgradama. To se odnosi na projektiranje ploča armiranih bambusom koji je spojen mehanički ili ljepilom, bez obzira na to je li riječ o deblu bambusa, rezanim bambusovim trakama ili laminiranom lijepljenom bambusu te na konvencionalne spojeve bambusa za kontrolu kvalitete, podatke o minimalnoj čvrstoći, kriterije ocjenjivanja i dimenzijskoj stabilnosti. U normu su uključeni i faktori koji utječu na gradnju konstrukcija armiranih bambusom, kao što su rad na gradilištu, proizvodnja predgotovljenih elemenata u tvornici i njihova montaža na gradilištu.

Prema toj normi, Indija ima više od 100 različitih vrsta bambusa, od kojih neke imaju puno deblo, ali većina ima šuplje deblo. Ispitano je 20 vrsta bambusa, a 16 vrsta je preporučeno za primjenu u konstrukcijama. Neka fizikalna i mehanička svojstva vrsta navedena su u tablici 2.

Deblo bambusa staro najmanje četiri godine može se koristiti za gradnju konstrukcija. Bambusi koji su čvrsti ili čije su stijenke relativno debele i obično imaju pravilno razmaknuta zadebljanja na kori debila smatraju se korisnima u gradnji konstrukcija. Oštećeni, slomljeni ili srušeni bambus treba odbaciti. Također treba izbjegavati mrtvi ili nezreli bambus, bambus koji ima promijenjenu boju i udubine od 3 mm. Ne preporučuje se upotreba zelenih bambusovih debila u zgradama. Spojevi takvih bambusa mogu olabaviti nakon samo nekoliko tjedana jer je zeleni bambus sklon skupljanju. Osim toga, insekti i mikroorganizmi češće napadaju zeleni bambus nego osušeni bambus.

Prirodna trajnost bambusa je slaba, a iznosi uglavnom od 12 do 36 mjeseci, ovisno o vrsti i okolišnim uvjetima. Kada se koristi na otvorenom i u kontaktu s tlom, bambus se obično raspada nakon jedne ili dvije godine. Međutim, kada se koristi u zatvorenom

Tablica 2. Fizikalna i mehanička svojstva bambusa [40]

Vrsta		U uvjetima suhog zraka				U prirodnim uvjetima			
Svojstva		Maksimalna tlačna čvrstoća [N/mm ²]	Modul elastičnosti x 10 ³ [N/mm ²]	Modul sloma [N/mm ²]	Gustoća [kg/m ³]	Maksimalna tlačna čvrstoća [N/mm ²]	Modul elastičnosti x 10 ³ [N/mm ²]	Modul sloma [N/mm ²]	Gustoća [kg/m ³]
Grupa A									
1	Bambusa glancescens (Syn. B. nana)	-	-	-	-	53,9	14,77	82,8	691
2	Dendrocalamus strictus	69,1	15	119,1	728	35,9	11,98	73,4	631
3	Oxytenanthera abyssinica	-	-	-	-	46,6	14,96	83,6	688
Grupa B									
1	Bambusa balcooa	60,6	-	-	-	46,7	7,31	65,4	783
2	B. pallida	-	-	-	-	54	12,9	55,2	731
3	B. nutans	47,9	10,72	52,4	673	45,6	6,62	52,9	603
4	B. tulda	68	10,07	66,7	722	40,7	7,98	51,1	658
5	B. auriculata	54,3	21,41	89,1	670	36,7	15,01	65,1	594
6	B. burmanica	65,2	17,81	105	672	39,9	11,01	59,7	570
7	Cephalostachyum pergracile	49,4	19,22	71,3	640	36,7	11,16	52,6	601
8	Melocanna baccifera (Syn. M. bambusoides)	69,9	12,93	57,6	751	53,8	11,39	53,2	817
9	Thyrsotachys oliveri	58	12,15	90	758	46,9	9,72	61,9	733
Grupa C									
1	Bambusa arundinacea (Syn. B. bambos)	53,4	8,96	80,1	663	35,3	5,95	58,3	559
2	B. ventricosa	-	-	-	-	36,1	3,38	34,1	626
3	B. vulgaris	-	-	-	-	38,6	2,87	41,5	626
4	Dendrocalamus longispathus	61,1	6,06	47,8	684	42,1	5,51	33,1	711

okruženju, bez dodira s tlom, bambus može trajati vijek od dvije do pet godina. Kada započne propadanja sklerenhimskih vlakana zbog djelovanja gljivica (slika 8.), mehanička čvrstoća bambusa brzo opada. Stoga se bambus treba tretirati pravilnim zaštitnim slojem kako bi se povećala njegova trajnost.

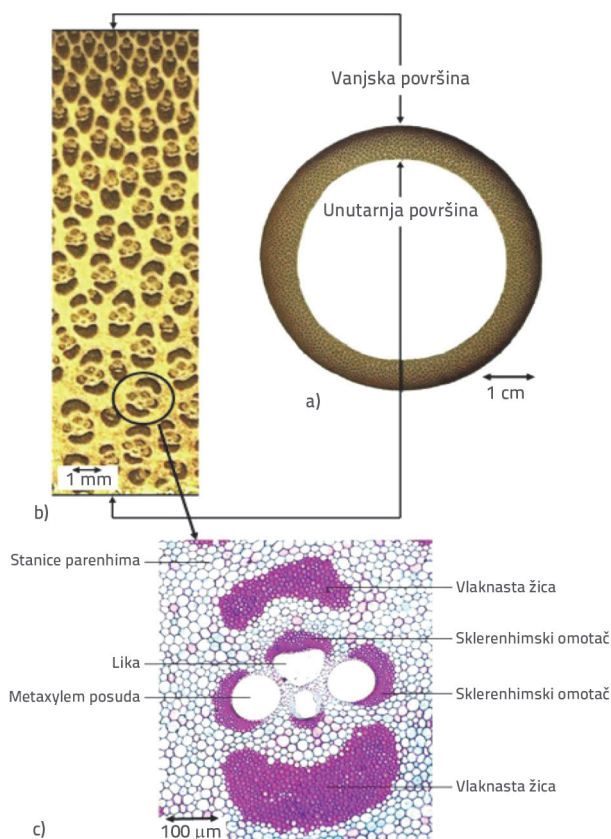
Norma IS 15912:2018 [40] propisuje sigurnost zaštite od požara za konstrukcije od bambusa. To pokazuje da, uz pomoć kemijskih tretmana, bambus može postati vatrootporan. U toj normi napominje se da bambus ima visoku vlačnu čvrstoću zahvaljujući svojoj vlaknastoj prirodi. U skladu s ograničenjima projektiranja konstrukcija, može poslužiti kao zamjenski materijal za armaturu u betonu. Maksimalne vlačne čvrstoće nekih vrsta bambusa gotovo su identične maksimalnim vlačnim čvrstoćama čelika, a vrijednost im je od 1400 do 2000 kg/cm². Smjernice za projektiranje betonskih konstrukcija s čelikom također su primijenjene na betonske elemente armirane bambusom.

Međunarodne norme dostupni su kao vodič projektantima i istraživačima. Norma ISO 22156 – 2004 [42] pruža informacije

o gradnji konstrukcija armiranih bambusom, a to se odnosi na konstrukcije armirane okruglim deblima bambusa, rezanog bambusa, lijepljenog lameliranog bambusa i panela od bambusa međusobno pričvršćenih ljepljivom ili mehaničkim spojnica.

U normi ISO 22156 – 2004 [42] navedene su informacije o upotrebi konstrukcija od bambusa, uključujući one izrađene od okruglog bambusa, cijepanog bambusa, lijepljenog laminiranog bambusa i panela izrađenih od bambusa međusobno pričvršćenih pomoću ljepljivog ili mehaničkih spojnica. Temelji se na svojstvima konstrukcije i graničnom stanju nosivosti konstrukcije, a pruža samo zahtjeve za uporabljivost, trajnost i mehaničku otpornost konstrukcija. Norma ISO 22157 – 1:2004 [43] navodi postupke ispitivanja čvrstoće i fizikalnih karakteristika bambusa, uključujući udio vlage, masu po volumenu, skupljanje, tlak, savijanje i vlak. Također uključuje ispitivanja na uzorcima bambusa koja se provode radi dobivanja podataka koji se mogu koristiti za definiranje karakterističnih funkcija čvrstoće i utvrđivanje dopuštenih naprezanja. Te informacije mogu se koristiti za uspostavljanje odnosa između

mehaničkih karakteristika i elemenata kao što su količina vlage, masa po volumenu, mjesto rasta, položaj bambusa i prisutnost čvorova u svrhu kontrole kvalitete.



Slika 8. Dijagram unutarnjeg presjeka bambusa [41]

U svijetu postoji nekoliko vrsta bambusa. Stoga je ocjenjivanje bambusa važan postupak za utvrđivanje njegove prikladnosti za gradnju konstrukcija. Za ocjenjivanje bambusa s okruglim ili stupičastim deblom, ISO 19624:2018 [44] navodi specifične mehaničke i vizualne postupke ocjenjivanja. Vizualno razvrstavanje provodi se na temelju vidljivih značajki uzorka bambusa. Mehaničko razvrstavanje uključuje nedestruktivnu procjenu kvaliteta za koje je poznato da su u korelaciji s karakterističnim vrijednostima koje definiraju ocjenu.

6. Veza bambusa i betona

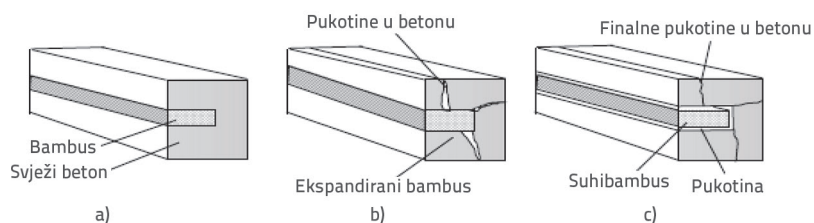
Veza između betona i armature omogućuje kompatibilnost naprezanja osiguravajući da se naprezanja iz armaturnog materijala primjereno prenose na beton. To jamči da nema klizanja između armaturne šipke i okolnog betona, što je nužno za njihovo kompozitno ponašanje. Uzorci kontrole sloma, krutost presjeka i sidrenje

armaturnih šipki pod utjecajem su mehanizma razvoja njihove veze. Na vezu betona i armature utječu brojni čimbenici: zaštitni sloj betona, razmak između armaturnih šipki, veličina armaturnih šipki, poprečna armatura, svojstva betona i čelika, stanje površine armaturnih šipki, položaj ugradnje betona i duljina preklopa armaturnih šipki [45]. Osim toga, duljina sidrenja armaturnih šipki određena je povećanjem čvrstoće veze između čelika i betona. Nedostatak odgovarajuće duljine sidrenja pridonosi raznim oštećenjima, posebno na preklopima, konzolama i spojevima grede i stupa u konvencionalnim konstrukcijama. Ovo naglašava važnost duljine sidrenja, jer ona ovisi o odgovarajućoj čvrstoći veze. Kada su krajnja sidrišta pouzdana, te veze u gredi su dovoljno jake da podnese nametnuto opterećenje čak i ako nema lokalnih veza u drugim dijelovima grede [46].

Na ponašanje betonskih elemenata armiranih bambusom značajno utječe veza između bambusa i betona, posebno uslijed njihovog sloma [47]. Mansur i Aziz [9] još su 1983. godine istaknuli važnost veze bambusa i betona. Tvrdili su da bambusova mreža značajno povećava duktilnost, žilavost te vlačnu čvrstoću, čvrstoću na savijanje i čvrstoću na udar betona. Međutim, unatoč tim poboljšanjima, posebno u slučaju tlačnog naprezanja, primijećeno je pucanje elemenata zbog slabe veze bambusa i betona. Jačina veze bambusa i betona značajno je pogođena varijacijama u dimenzijama bambusa uzrokovanih promjenom vlage i temperature. Bubljenje i skupljanje bambusa tijekom lijevanja i stvrdnjavanja betona veliki su problem [13], kao što je prikazano na slici 9.

Uslijed hidratacije betona tijekom njegova očvršćivanja, bambus u betonu zadržava i pohranjuje vlagu. Zato se bambus širi, a beton počinje pucati, kao što je prikazano na slici 9.b. Osim toga, hidratacija betona se nastavlja i nakon stvrdnjavanja, beton apsorbira vodu pohranjenu u bambusu, što dovodi do skupljanja bambusa. Iako se pukotine počinju smanjivati, šupljine slabe vezu bambusa i betona, kao što je prikazano na slici 9.c. Odgovarajuća veza između bambusa i betona ne može se stvoriti zbog neprekidnog procesa bubrenja i skupljanja bambusa, što ozbiljno ograničava njegovu upotrebu kao zamjene za čelik [13]. Čvrstoća veze ovisi o dva glavna faktora: bubrenju i skupljanju bambusa. Svojstva koje poboljšavaju prijanjanje cementa:

- stvaranje trenja na površini bambusa,
- posmična otpornost betona zbog konfiguracije površine i hrapavosti traka od bambusa [10].



Slika 9. Ponašanje bambusa tijekom stvrdnjavanja betona: a) bambus u betonu; b) bambus tijekom stvrdnjavanja betona (razvijene pukotine); c) vidljive šupljine i pukotine u očvrslom betonu [48]

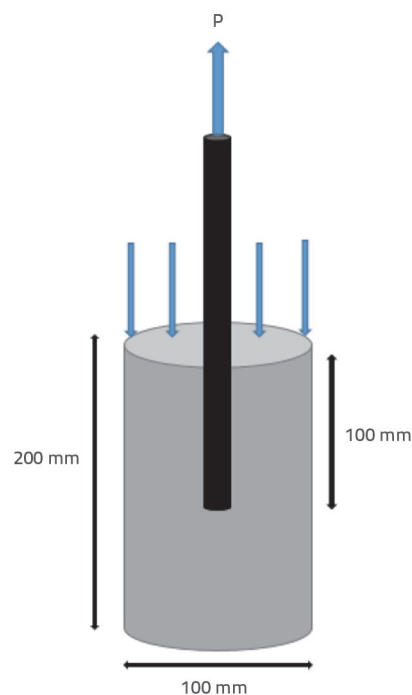
Prema Maliju i Dattiju [49], povećanje čvrstoće veze može poboljšati savojno ponašanje betonskih greda armiranih bambusom. Predložili su da se pravilnom obradom površine bambusa može smanjiti bubrenje i skupljanje bambusa u betonu. Istraživači su se koristili različitim kemikalijama kako bi smanjili sposobnost apsorpcije vode u bambusu. Tablica 3. prikazuje različite kemijske tretmane bambusa.

Tablica 3. Kemijski tretmani

Istraživači	Godina	Kemijski tretmani
Fang i Mehta [50]	1978.	Sulfur
Ghavami [10]	1995.	Negrolin
Ghavami [13]	2005.	Negrolin
		Negrolin s pijeskom
		Negrolin sa žicom i pijeskom
		Sikadur 32 gel
Terai i Minami [51]	2012.	Sintetička smola
		Sintetička guma
Sakaray i suradnici [52]	2012.	Vodootporni premaz
Kute i Wakchure [53]	2013.	Black Japan (Bitumenska boja)
		Black Japan s prahom zeolita
Agarwal i suradnici [31]	2014.	Araldite
		Araldite sa žicom
		Tapcrete P 151
		Anti Corr RC
		Sikadur 32 gel
Javadian i suradnici [54]	2016.	Epoxy premaz (na bazi vode)
		Epoxy premaz (na bazi vode) i sitni pijesak
		Epoxy premaz (na bazi vode) i krupni pijesak
		True Grip EP i BP
		Krupni pijesak sa True Grip EP i BP
		Exaphen
		Krupni pijesak i Exaphen
		Enamel
Nindyawati i Umniati [55]	2016.	Vodonepropusna boja s pijeskom
Puri i suradnici [32]	2017.	Sikadur 32 LP epoxy
Dey i suradnici [56]	2018.	Bambus uvaljan u pijesak s epoksidom
		Bambus uvaljan u kokosova vlakna s epoksidom
		G.I. uvaljani bambus s epoksidom
Mali i Datta [49]	2019.	Bond Tite kemijski adheziv
		Triflor PAUL premaz lakom
		Araldite
		Strepoxy
		Bitumen (VG-30)
		EPI Bond - 21

Ghavami [10] je 1995. proveo preliminarnu procjenu armiranja bambusom s različitim premazima. Janssen [57] je također 2000. primijetio da tretiranje bambusa koji se koristi kao armatura značajno produžuje njegovo trajanje. Kute i Wakchare [53] koristili su boju Black Japan na bazi bitumena kako bi smanjili sposobnost apsorpcije vode u bambusu. Otkrili su da ta boja smanjuje apsorpciju vode u bambusu za 75 %, a veza bambusa i betona je samo 10 % slabija.

Istraživači su proveli ispitivanja izvlačenja (pull out test) betona armiranog bambusom nakon tretiranja bambusa različitim kemijskim tvarima kako bi odredili čvrstoću veze bambusa i betona. Ispitivanja *pull out testa* prema normi IS 2770 (dio 1) [58] često se primjenjuju za procjenu jačanja veze između čeličnih šipki i betona. Takva se ispitivanja uglavnom koriste za procjenu čvrstoće između betona i armaturnih šipki. Uobičajene postavke *pull out testa* prikazane su na slici 10.

Slika 10. Postavke ispitivanja *pull-out testa*

Tablica 4. prikazuje detaljnu analizu čvrstoće veze betona i bambusa tretiranog različitim kemijskim postupcima.

Iz tablice 4. može se zaključiti da, u usporedbi s laganim gredama od konvencionalnog betona armiranog bambusom, tretiranje bambusa negrolinom s pijeskom i žicom povećava čvrstoću veze bambusa i betona za 90 % i nosivost grede za 400 % [10]. Utvrđeno je da je čvrstoća veze bambusa tretiranog gelom Sikadur 32, u usporedbi s bambusom tretiranim negrolinom s pijeskom i žicom, bolja, a njena vrijednost iznosila je 2,75 MPa [13]. Prema Maityju i sur. [48], veza bambusa i betona postaje bolja kada se na bambus nanese asfalt i pijesak kako bi se proizveo zid od betona armiran bambusom. Osim toga, razni epoksidni agensi, kao što su Tapcrete P-151, Sikadur 32 gel,

Tablica 4. Čvrstoće veze betona i bambusa tretiranog različitim kemijskim postupcima

Godina	Istraživač	Kemijski tretmani/Premazi	Čvrstoća veze [MPa]
1995.	Ghavami [10]	Bez tretmana	0,52
		Negrolin s pijeskom	0,73
		Negrolin sa žicom i pijeskom	0,97
2005.	Ghavami [13]	Bez tretmana	0,52
		Negrolin s pijeskom	0,73
		Negrolin sa žicom i pijeskom	0,97
		Sikadur 32 gel	2,75
2012.	Terai i Minami [51]	Premaz sintetičkom smolom kistom	1,34
		Premaz sintetičkom smolom u spreju	1,25
		Prskanje sintetičkom gumom u spreju	1,18
		Deformirane šipke	2,43
2012.	Sakaray i suradnici [52]	Vodootporni premaz (dubina ugradnje 150 mm)	1,45 - 1,95
		Vodootporni premaz (dubina ugradnje 200 mm)	1,07 - 1,25
		Vodootporni premaz (dubina ugradnje 260 mm)	0,95 - 1,05
2013.	Kute i Wakchaure [53]	Black Japan (Bitumenska boja)	0,66
		Black Japan s prahom zeolita	1,06
2014.	Agarwal i suradnici [31]	Obični bambus	0,127
		Araldite	0,232
		Araldite s mrežom	0,539
		Tapcrete P 151	0,315
		Anti Corr RC	0,159
		Sikadur 32 Gel	0,588
2016.	Javadian i suradnici [54]	Bez premaza	3,61
		Epoxy premaz (na bazi vode)	3,47
		Epoxy premaz (na bazi vode) i sitni pijesak	3,65
		Epoxy premaz (na bazi vode) i krupni pijesak	3,61
		True Grip EP	3,3
		Krupni pijesak i True Grip EP	3,45
		True Grip BP	2,42
		Krupni pijesak i True Grip BP	2,62
		Exaphen	3,36
		Krupni pijesak i Exaphen	3,46
		Enamel	3,4
2016.	Nindyawati i Umniati [55]	Vodootporna boja s pijeskom	0,41

Tablica 4. Čvrstoće veze betona i bambusa tretiranog različitim kemijskim postupcima

Godina	Istraživač	Kemijski tretmani/Premazi	Čvrstoća veze [MPa]
2016.	Mulyati i Arman [59]	Bambus Petung	0,62
		Bambus Petung (kvadratni presjek) s lakom	2,22
		Bambus Petung (kvadratni presjek) s namotanom žicom	1,9
		Bambus Petung (okrugli presjek) s lakom	1,7
		Bambus Petung (okrugli presjek) s namotanom žicom	1,49
		Bambus Wulung	0,62
		Bambus Wulung (kvadratni presjek) s lakom	1,33
		Bambus Wulung (kvadratni presjek) s namotanom žicom	0,95
		Bambus Wulung (okrugli presjek) s lakom	1,12
		Bambus Wulung (okrugli presjek) s namotanom žicom	0,98
2018.	Dey i Chetia [56]	Bambus uvaljan u pijesak i epoksid	5,96
		Bambus uvaljan u kokosova vlakna i epoksid	8,46
		G.I. bambus s epoksidom	9,71
2019.	Mali i Datta [49]	Triflor PAUL lak	1,04
		Bond Tite kemijski adheziv	2,35
		Araldite	1,44
		Streproxy	1,88
		Bitumen (VG-30)	0,97
		EPI Bond - 21	1,54

Araldite i Anti Corr RC, koriste se za tretiranje površine bambusa. Rezultati su pokazali da bambus tretiran gelom Sikadur 32 ima najbolju vezu s bambusom tretiranim epoksidom [31]. Javadian i suradnici [54] proučavali su vezu bambusa i betona, koristeći epoksidne premaze na bazi vode: TrueGrip EP, TrueGrip BP i Exaphen. Premaze su nanosili na bambus s pijeskom ili bez njega. Otkrili su da dodavanje pijeska pojačava vezu bambusa i betona zbog povećanja trenja između betona i čestica pijeska na površini bambusa. Uporabom epoksida na površini bambusa uvaljanog u pijesak, čvrstoća veze može se povećati na 3,65 MPa. Terai i Minami [51] proveli su *pull out testove* na bambusu koristeći različite sintetičke smole i sintetičke gume. Otkriveno je da se čvrstoća veze povećala s 0,60 MPa na 1,34 MPa nakon premazivanja bambusa.

Sakaray i sur. [52] proveli su *pull out test* 2012. godine, ali su upotrijebili bambusove stabljike okruglog presjeka. Prosječna čvrstoća veze smanjivala se kako je duljina ugradnje rasla. Osim toga, primijetili su da je smanjenje čvrstoće veze izraženije kod čeličnih šipki. Budući da je bambus anizotropan, djeluje u poprečnom smjeru, te ima veće utjecaje zaostajanja posmika, ova smanjenja su nužna [52]. Mulyati i Arman [59] ispitivali su bambus Petung i Wulung primjenom lakova i omatanjem žicama te su proučavali čvrstoće veza za oba bambusa. Utvrdili su da

je maksimalna čvrstoća veze bambusa Petung nakon premaza lakom iznosila 2,22 MPa. Nakon ispitivanja bambusa Apus koji je premazan vodootpornim premazom i posut pijeskom, čvrstoća veze iznosila je 0,41 MPa [55]. Dey i Chetia [56] usporedno su istraživali tri vrste traka od bambusa sa svojstvima trenja zbog tretmana traka s kokosovim vlaknima, pocinčanim željezom i pijeskom. Sve trake su bile premazane epoksidom. Najveća čvrstoća veze, 9,71 MPa, bila je uvaljanog bambusa s pocinčanim željezom (G.I.), dok je kod bambusa uvaljanog u pijesak iznosila 5,96 MPa, a kod bambusa uvaljanog u kokosova vlakna 8,46 MPa. Osim kemijskog tretmana, geometrijske i mehaničke prilagodbe bambusa mogu pomoći u jačanju veze bambusa i betona. Na primjer, čvrstoća veze povećana je na 4 MPa upotrebom mehaničkih postupaka poput urezivanja, omatanja bambusa žicama, valovitog oblikovanja bambusa i drugih sličnih metoda [60]. Bambus sa čvorovima imao je od 15 % do 22 % snažniju vezu u svim vrstama kemijskih tretmana [53].

7. Trajnost betona armiranog bambusom

Trajnost betona je vrlo važno svojstvo osobito kada se u betonu koriste prirodna vlakna, kako bi se razumjelo njihovo dugoročno ponašanje. Iako je bambus pokazao dobra kratkoročna svojstva u

betonskim konstrukcijama, važno je razumjeti njegovo ponašanje tijekom vremena. Mogući nedostatak bambusa u betonu je njegova osjetljivost na truljenje i oštećenja zbog napada insekata. Nekoliko istraživanja je pokazalo da pravilan tretman i zaštita mogu znatno smanjiti te rizike [61]. Na primjer, bambus se može tretirati borom kako bi postao otporan na insekte i truljenje. Osim toga, trajnost bambusa ovisi i o vrsti bambusa.

Još jedan važan čimbenik koji treba uzeti u obzir jest trajnost betona. Tijekom vremena beton može biti izložen različitim oblicima propadanja poput pucanja, ljuštenja i korozije armature od čelika. Ti procesi mogu oslabiti konstrukciju.

Lima i suradnici [62] analizirali su trajnost bambusa koji se koristi kao armatura u betonu. U tom istraživanju upotrijebljeno je ukupno 500 uzoraka bambusa vrste *Dendrocalamus giganteus*. Također je proučavan unutarnji poprečni presjek bambusa kako bi se razumjelo ponašanje bambusovih vlakana. Površinski sloj bambusa (kora) sastoji se od epidermalnih stanica s voskastim slojem (kutin).

Stabljike bambusa sastoje se od kompozitnog materijala, a dijafragme ili čvorovi ih dijele na segmente. Najdublji unutarnji sloj bambusa sastavljen je od stanica sklerenhima. Matrica slična tkivu poznata kao parenhim omotana je oko vlakana, vena i vodiča soka koji čine srednji sloj i nasumično su raspoređeni u poprečnom presjeku. Parenhim čini u prosjeku 30 % stabljike bambusa, vlakna 60 %, a provodljivost soka 10 %. Fizikalne i mehaničke karakteristike bambusa, koje se razlikuju ovisno o vrsti, izravno su pod utjecajem tih postotaka. Utvrđeno je da je većina bambusovih vlakana u potpunosti zatvorena unutar parenhima i nisu izravno izložena lužnatosti cementne matrice. Trajnost je procijenjena promjenom vlačne čvrstoće i Youngovog modula bambusa. Uzorci su potom njegovani u ciklusima namakanja i sušenja. Svaki uzorak je uronjen u vodu, a potom sušen 24 sata. Uzorci s betonom uronjeni su u običnu vodu iz slavine, a oni bez betona u otopinu kalcijevog hidroksida. Youngov modul i vlačna čvrstoća procijenjeni su nakon 7, 15, 30, 45 i 60 ciklusa. Nije bilo značajnih promjena u mehaničkim svojstvima bambusa.

Prema Mohu i Khatibu [61], otpornost bambusa na gljivice može se povećati zaštitnim obradama i premazima koji sprječavaju vlagu. Toplinska obrada još je jedna metoda za zaštitu bambusa od propadanja. Toplinska obrada povećava otpornost bambusa protiv gljivica i insekata. Awolusi i sur. [63] proučavali su savijanje i trajnost prizmi betona armiranog bambusom. Istraživali su otpornost takvog betona u izazovnim radnim uvjetima, kao što su vruća, kisela i slana okruženja. Za istraživanje su korištene pravokutne prizme od betona armiranog bambusom i od betona armiranog čelikom dimenzija $150 \times 150 \times 550$ mm, s betonom marke M 25. Nakon 60-dnevnog razdoblja njegovanja, tijekom kojeg su uzorci betona armiranog bambusom bili izloženi nepovoljnim uvjetima, procijenjena je čvrstoća na savijanje i gubitak težine betona. Utvrđeno je da su, u usporedbi s uzorcima betona armiranog čelikom, uzorci betona armiranog bambusom pokazali smanjeni nagib gubitka čvrstoće u ispitivanjima na visoke temperature, s gubitkom čvrstoće od $0,407$ N/mm² za

beton armiran bambusom i $5,5$ N/mm² za beton armiran čelikom. Uzorci betona armiranog bambusom koji su tretirani kiselinom i kloridom imali su sporiji gubitak težine i čvrstoće. Gubitak težine za beton armiran čelikom iznosio je $0,95$ kg, a za beton armiran bambusom $0,54$ kg. Uslijed djelovanja kiseline, gubitak težine iznosio je $0,893$ kg, a zbog djelovanja klorida gubitak težine bio je $0,087$ kg. Unatoč lošijim radnim uvjetima u odnosu na beton armiran čelikom, beton armiran bambusom općenito pokazuje nekoliko ohrabrujućih svojstava. Iako navedena istraživanja pružaju neke dokaze o dugoročnom djelovanju betona armiranog bambusom, potrebna su dodatna istraživanja kako bi se u potpunosti razumjelo njegovo ponašanje tijekom duljeg razdoblja. Čimbenici kao što su izloženost uvjetima okoline, vrste opterećenja i praksa održavanja mogu utjecati na dugoročna svojstva betona armiranog bambusom.

Ukratko, istraživanje dugoročnog ponašanja betona armiranog bambusom važan je aspekt ovog istraživanja. Iako su studije pokazale obećavajuće rezultate, potrebna su daljnja istraživanja kako bi se u potpunosti razumjela trajnost i učinkovitost betonskih konstrukcija armiranih bambusom tijekom duljega razdoblja.

8. Zaključak

Zbog trenutačne energetske krize, znanstvenici i inženjeri istražuju prirodne materijale koji mogu biti zamjena za čelik u građevnoj industriji. Jedan od najzanimljivijih takvih materijala je bambus, koji je lako dostupan u tropskim regijama diljem svijeta i ima jedinstvene kvalitete poput brzog rasta i visokog omjera vlačne čvrstoće i težine. Na temelju ovog pregleda literature može se zaključiti da je bambus učinkovit i prikladan materijal za zamjenu čelika u betonu. Stoga se može upotrebljavati kao materijal za armiranje konstrukcijskih elemenata. Lagan je, čvrst, svestran i isplativ. Rezultati su pokazali da je zid armiran bambusom 56 % lakši i 40 % jeftiniji od zida građenog opekom. Jedan od nedostataka bambusa je taj što se brže razgrađuje od čelika jer je prirodni materijal. Stoga se neobrađeni bambus ne smije koristiti kao materijal za armiranje. Za razliku od čelika, bambus zahtijeva dvije faze tretmana konzervansom prije nego što se može koristiti kao armatura: prvo, kemijski konzervans za zaštitu od napada insekata i gljivica, i drugo, epoksidni premaz kako bi bambus postao vodootporan.

Međutim, kad je riječ o očuvanju bambusa i njegovoj zaštiti od gljivica i insekata, potrebno je provesti daljnja istraživanja. Istraživanja su pokazala da mnogi kemijski tretmani mogu prevladati ovaj problem; ali su skupi. Stoga je nužan razvoj jeftinijih metoda. Trebalo bi provesti daljnja istraživanja kako bi se ispitala trajnost betonskih elemenata armiranih bambusom. Dakle, bambus može apsorbirati ugljični dioksid iz atmosfere što pomaže u ublažavanju globalnog zatopljenja. Smanjenje emisija ugljičnog dioksida važno je sredstvo borbe protiv klimatskih promjena. Osim toga, bambus je brzorastuća biljka sa snažnim korijenjem koja može pomoći u sprječavanju klizišta i smanjenju erozije tla. Općenito, bambus se zagovara kao najbolja, najpovoljnija i ekološki najprihvatljivija zamjena za čelik.

LITERATURA

- [1] Mondal, B., Maity, D., Patra, P.K.: Tensile characterisation of bamboo strips for potential use in reinforced concrete members: experimental and numerical study, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 53 (2020) 5.
- [2] Akwada, D.R., Akinlabi, E.T., Economic, Social and Environmental Assessment of Bamboo for Infrastructure Development, *Proceedings of the International Conference on Infrastructure Development in Africa*, 2016.
- [3] Chow, H.K.: *Bamboo as a material for reinforcing concrete*, Massachusetts Institute of Technology, 1914.
- [4] Glenn, H.E.: *Bamboo reinforcement in Portland cement concrete*, Bulletin No. 4, Engineering Experiment Station, Clemson Agricultural College, Clemson, South Carolina, 1950.
- [5] Brink, F.E., Rush, P.J.: *Bamboo reinforced concrete construction*, 1966.
- [6] American Concrete Institute (ACI): *ACI 318-56 Building code requirements for reinforced concrete*, American Concrete Institute (ACI), Detroit, 1956.
- [7] Geymayer, H.G., Cox, F.B.: *Bamboo reinforced concrete*, *J. Am. Concrete Inst.*, 67 (1970) 51, pp. 841-846
- [8] Kurian, N.P., Kalam, A.K.: *Bamboo reinforced soil-cement for rural use*, *Indian Concrete Journal*, 51 (1977) 12, pp. 382
- [9] Mansur, M., Aziz, M.: *Study of bamboo-mesh reinforced cement composites*, *Int. J. Cem. Compos. Lightweight Concr.*, 5 (1983) 3, pp. 165-171
- [10] Ghavami, K.: *Ultimate load behaviour of bamboo-reinforced lightweight concrete beams*, *Cement and Concrete Composites*, 17 (1995) 4, pp. 281-288
- [11] Kankam, C.K., Odum Ewuakye, B.: *Flexural behaviour of babadua reinforced one-way slabs subjected to third-point loading*, *Construction and Building Materials*, 15 (2001) 1, pp. 27-33
- [12] Kankam, C.K., Odum Ewuakye, B.: *Babadua reinforced concrete two-way slabs subjected to concentrated loading*, *Construction and Building Materials*, 20 (2006) 5, pp. 279-285. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2005.01.021>
- [13] Ghavami, K., *Bamboo as reinforcement in structural concrete elements*, *Cement and Concrete Composites*, 27 (2005) 6, pp. 637-649
- [14] Perera, S.J., Lewangamage, S.C.: *Experimental investigation on flexural behaviour of bamboo reinforced concrete slab panels*, *Proceedings of The IESL 108th annual Transactions*, Sri Lanka, 2015.
- [15] Muda, Z.C., Usman, F., Beddu, S., Alam, M.A., Thiruchelvam, S., Sidek, L.M., Basri, H., Saadi, S.: *Impact resistance performance of green construction material using light weight oil palm shells reinforced bamboo concrete slab*, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 16 (2013). 1, pp. 1-5
- [16] Muda, Z.C., Beddu, S., Syamsir, A., Ating, J.S., Mohd Kamal, N.L., Mustapha, K.N., Thiruchelvam, S., Usman, F., Alam, M.A., Birima, A.H., Zarog, O.S.: *Impact resistance behaviour of light weight rice husk concrete with bamboo reinforcement*, *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 32 (2016) 1, pp. 1-5
- [17] Designation: C150/C150M - 16'116'1 Standard Specification for Portland Cement 1, https://doi.org/10.1520/C0150_C0150M-16E01, 1.1.2021.
- [18] Chithambaram, S.J., Kumar, S.: *Flexural behaviour of bamboo based ferrocement slab panels with fly ash*, *Construction and Building Materials*, 134 (2017), pp. 641-648, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.205>
- [19] Mali, P.R., Datta, D.: *Experimental evaluation of bamboo reinforced concrete slab panels*, *Construction and Building Materials*, 188 (2018), pp. 1092-1100
- [20] SIST-EN-14488-5-2006: *Testing sprayed concrete Determination of energy absorption capacity of fibre reinforced slab specimens*, 2006.
- [21] Haryanto, Y., Wariyatno, N.G., Hu, H.T., Han, A.L., Hidayat, B.A.: *Investigation on structural behaviour of bamboo reinforced concrete slabs under concentrated load*, *Sains Malaysiana*, 50 (2021) 1, pp. 227-238.
- [22] Mali, P.R., Datta, D.: *Experimental evaluation of bamboo reinforced concrete beams*, *Journal of Building Engineering*, 28 (2019), 101071.
- [23] Kankam, C.K., Odum-Ewuakye, B.: *Flexural strength and behavior of babadua-reinforced concrete beams*, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 2000.
- [24] Mark, A.A., Russell, A.O.: *A comparative study of bamboo reinforced concrete beams using different stirrup materials for rural construction*, *International Journal of Civil and Structural Engineering*, 2 (2011) 1, pp. 407-423
- [25] Anto, A., Augustin, A., Ratheesh, R., Belarmin Xavier, C.S.: *Flexural behavior of the untreated plain bamboo reinforced concrete beam under four-point loading*, *Materials Today: Proceedings*, 2023., <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.543>
- [26] Al-Fasih, M.Y., Hamzah, S., Ahmad, Y., Ibrahim, I.S., Mohd Ariffin, M.A.: *Tensile properties of bamboo strips and flexural behaviour of the bamboo reinforced concrete beams*, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 26 (2022) 13, pp. 6444-6460, <https://doi.org/10.1080/19648189.2021.1945954>
- [27] Budi, A.S., Rahmadi, A.P.: *Flexural behavior of petung bamboo strip notched reinforced concrete beams*, *Journal of Physics: Conference Series*, 1153 (2019) 1, <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1153/1/012127>
- [28] Awoyera, P.O., Karthik, S., Rao, P.R.M., Gobinath, R.: *Experimental and numerical analysis of large-scale bamboo-reinforced concrete beams containing crushed sand*, *Innovative Infrastructure Solutions*, 4 (2019) 1, pp. 1-15, <https://doi.org/10.1007/s41062-019-0228-x>
- [29] Leelatanon, S., Srivaro, S., Matan, N.: *Compressive strength and ductility of short concrete columns reinforced by bamboo*, *Songklanakarin J. Sci. Technol*, 32 (2010) 4.
- [30] Akinyemi, B.A., Omoniyi, T.E.: *Repair and strengthening of bamboo reinforced acrylic polymer modified square concrete columns using ferrocement jackets*, *Scientific African*, 8 (2020), pp. 1-9
- [31] Agarwal, A., Nanda, B., Maity, D.: *Experimental investigation on chemically treated bamboo reinforced concrete beams and columns*, *Computers and Chemical Engineering*, 71 (2014), pp. 610-617
- [32] Puri, V., Chakraborty, P., Anand, S., Majumdar, S.: *Bamboo reinforced prefabricated wall panels for low-cost housing*, *Journal of Building Engineering*, 9 (2017), pp. 52-59
- [33] Ganesan, N., Indira, P.V., Himasree, P.R.: *Influence of opening on the behaviour of bamboo reinforced concrete wall panels under two way in-plane action*, *Journal of Structural Engineering (India)*, 45 (2019) 6, pp. 486-496

- [34] Kaushik, H.B., Dasgupta, K., Sahoo, D.R., Kharel, G.: Performance of structures during the Sikkim earthquake of 14 February 2006, *Current Science*, 91 (2006) 4, <https://about.jstor.org/terms>
- [35] González, G., Gutiérrez, J.: Structural performance of bamboo "bahareque" walls under cyclic load, *Journal of Bamboo and Rattan*, 4 (2005) 4, pp. 353-368
- [36] Moroz, J.G., Lissel, S.L., Hagel, M.D.: Performance of bamboo reinforced concrete masonry shear walls, *Construction and Building Materials*, 61 (2014), pp. 125-137, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.02.006>
- [37] Indian Standard Specifications for Method of Tests for Split Bamboo, I.S. 8242:1976, Bureau of Indian Standards, New Delhi, India, 1976.
- [38] Bureau of Indian Standards: Indian Standard Specifications for Method of Tests for Bamboo, I.S. 6874:2008, New Delhi, India, 2008.
- [39] Bureau of Indian Standards: Indian Standard Specifications for Code of Practice for Preservation of Bamboo for Structural Purposes, IS 9096:2006, New Delhi, India, 2006.
- [40] Bureau of Indian Standards: Indian Standard Specifications for Code of Practice for Structural Design using Bamboo, IS 15912-2018, New Delhi, India, 2018.
- [41] <https://ars.els-cdn.com/content/image/3-s2.0-B9780081009598000135-f13059780081009598.sml>
- [42] ISO: ISO 22156: 2004 (E), Bamboo – Structural design, Geneva Switzerland, 2004.
- [43] ISO: ISO 22157-1:2004 (E), Bamboo – Determination of physical and mechanical properties – part I: requirements, Geneva, Switzerland, 2004.
- [44] ISO: ISO 19624: 2018 (E), Bamboo structures — Grading of bamboo culms — Basic principles and procedures, Geneva, Switzerland, 2018.
- [45] Dixit, A., Puri, V.: Bamboo bonding in concrete: A critical research, *International Journal of Innovative Technology and Exploring Engineering*, 8 (2019) 11, pp. 323-334
- [46] Subramanian, N.: *Design of Reinforced Concrete Structures*, Oxford University Press, ISBN 13:978-0-19-808694-9, pp. 262-264
- [47] Archila, H., Kaminski, S., Trujillo, D., Zea Escamilla, E., Harries, K. A.: Bamboo reinforced concrete: a critical review, *Materials and Structures*, 51 (2018) 4.
- [48] Mondal, B., Maity, D., Patra, P.K.: Bond behavior between bamboo and normal-strength concrete: experimental and numerical investigation, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, 27 (2022) 3, pp. 1-11
- [49] Mali, P.R., Datta, D.: Experimental study on improving bamboo concrete bond strength, *Advances in Concrete Construction*, 7 (2019) 3, pp. 191-201
- [50] Fang, H.Y., Mehta, H.C.: Sulfur-sand treated bamboo rod for reinforcing structural concrete, *Advances in Chemistry Series*, 165 (1978), pp. 241-254
- [51] Terai, M., Minami, K.: Research and development on bamboo reinforced concrete structure, *WCEE*, 15 (2012)
- [52] Sakaray, H., Vamsi Krishna Togati, N.V., Ramana Reddy, I.V.: Investigation on properties of bamboo as reinforcing material in concrete, *International Journal of Engineering Research and Application*, 2 (2012) Jan-Feb, pp. 77-83
- [53] Kute, S.Y., Wakchaure, M.R.: Performance evaluation for enhancement of some of the engineering properties of bamboo as reinforcement in concrete, *Journal of The Institution of Engineers, Series A*, 94 (2013) 4, pp. 235-242
- [54] Javadian, A., Wielopolski, M., Smith, I.F.C., Hebel D.E.: Bond-behavior study of newly developed bamboo-composite reinforcement in concrete, *Construction and Building Materials*, (2016) 122, pp. 110-117.
- [55] Nindyawati, Umniati, B.S.: Bond strength of bamboo reinforcement in light weight concrete, *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 10 (2016), pp. 417-420
- [56] Dey, A., Chetia, N.: Experimental study of Bamboo reinforced concrete beams having various frictional properties, *Materials Today: Proceedings*, 5 (2018).
- [57] Janssen, J.A.: *Designing and Building with Bamboo*, Report No. 20, Beijing, INBAR, 2000.
- [58] Bureau of Indian Standards: Indian Standard Specifications for Methods of Testing Bond in Reinforced Concrete, IS 2770 (Part 1), New Delhi, India, 1997.
- [59] Mulyati, A.: The evaluation of bond strength of bamboo reinforcement in concrete, *Proceedings of the International Conference on Technology, Innovation and Society*, 2016.
- [60] Azadeh, A., Kazemi, H.H.: New approaches to bond between bamboo and concrete, *Key Engineering Materials*, (2014) 600, pp. 69-77
- [61] Moh', A., Khatib, A.: *An Investigation into the Use of Bamboo as Reinforcement in Concrete*, 2020.
- [62] Lima, H.C., Willrich, F.L., Barbosa, N.P., Rosa, M.A., Cunha, B.S.: Durability analysis of bamboo as concrete reinforcement, *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 41 (2008) 5, pp. 981-989, <https://doi.org/10.1617/s11527-007-9299-9>
- [63] Awolusi, T.F., Ayomikun, P.B., Oluwatobi, G.A.: An Evaluation of the Flexural and Durability Properties of Bamboo-Reinforced Concrete Prism, *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 46 (2022) 6, pp. 4343-4353