

Utjecaj drobljene opeke kao agregata na mehanička svojstva mikrobetona

Frntić, Milena

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University North / Sveučilište Sjever**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:122:068196>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-31**

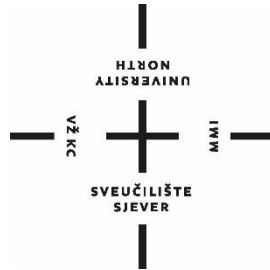


Repository / Repozitorij:

[University North Digital Repository](#)



SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN



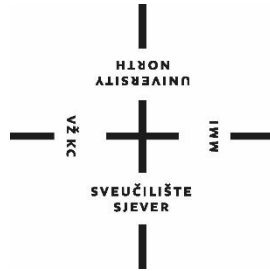
DIPLOMSKI RAD br.115/GRD/2024

**UTJECAJ DROBLJENE OPEKE KAO AGREGATA
NA MEHANIČKA SVOJSTVA MIKROBETONA**

Milena Frntić

Varaždin, listopad 2024.

SVEUČILIŠTE SJEVER
SVEUČILIŠNI CENTAR VARAŽDIN
Studij graditeljstvo



DIPLOMSKI RAD br.115/GRD/2024

**UTJECAJ DROBLJENE OPEKE KAO AGREGATA
NA MEHANIČKA SVOJSTVA MIKROBETONA**

Student:

Milena Frntić, 0231010562

Mentorica:

Prof. dr. sc. Ivanka Netinger

Grubeša, dipl.ing.grad.

Varaždin, listopad 2024.

Prijava diplomskog rada

Definiranje teme diplomskog rada i povjerenstva

ODJEL Odjel za graditeljstvo

STUDIJ diplomski sveu ilišni studij Graditeljstvo

PRISTUPNIK Milena Frntić

JMBAG 0231010562

DATUM 19.07.2024.

KOLEGIJ Betoni posebnih namjena

NASLOV RADA Utjecaj drobljene opeke kao agregata na mehanička svojstva mikrobetona

NASLOV RADA NA ENGL. JEZIKU Influence of crushed brick aggregate on the mechanical properties of microconcrete

MENTOR prof.dr.sc. Ivanka Netinger Grubeša

ZVANJE Redoviti profesor

ČLANOVI POVJERENSTVA

1. doc.dr.sc. Anđelko Crnoja

2. prof.dr.sc. Ivanka Netinger Grubeša

3. izv.prof.dr.sc. Aleksej Aniskin

4. izv.prof.dr.sc. Matija Orešković-zamjenski član

5.

Zadatak diplomskog rada

BRDI 115/GRD/2024

OPIS

U preglednom dijelu rada je potrebno napraviti pregled literature na temu uporabe drobljene opeke kao jedne od komponenata betona. U eksperimentalnom dijelu rada je potrebno osmisliti metodologiju istraživanja na temu primjene drobljene opeke kao agregata u mikrobetonu, provesti ispitivanja sukladno važećoj regulativi, obraditi rezultate ispitivanja te izvesti zaključke.

ZADATAK URUČEN 19.07.2024.

POTPIS MENTORA

SVEUČILIŠTE
SJEVER



LIBRARIJA
ALISBAINA

Sveučilište Sjever



SVEUČILIŠTE
SJEVER

IZJAVA O AUTORSTVU

Završni/diplomski/specijalistički rad isključivo je autorsko djelo studenta koji je isti izradio te student odgovara za istinitost, izvornost i ispravnost teksta rada. U radu se ne smiju koristiti dijelovi tuđih radova (knjiga, članaka, doktorskih disertacija, magistarskih radova, izvora s interneta, i drugih izvora) bez navođenja izvora i autora navedenih radova. Svi dijelovi tuđih radova moraju biti pravilno navedeni i citirani. Dijelovi tuđih radova koji nisu pravilno citirani, smatraju se plagijatom, odnosno nezakonitim prisvajanjem tuđeg znanstvenog ili stručnoga rada. Sukladno navedenom studenti su dužni potpisati izjavu o autorstvu rada.

Ja, MILENA FRNTIĆ (ime i prezime) pod punom moralnom, materijalnom i kaznenom odgovornošću, izjavljujem da sam isključivi autor/ica završnog/diplomskog/specijalističkog (obrisati nepotrebno) rada pod naslovom UTJECAJ DROBYČINE OPEKUC NA KOGREGACIJU NA MEH. SUOŠIVA MIKROBESIJU (upisati naslov) te da u navedenom radu nisu na nedozvoljeni način (bez pravilnog citiranja) korišteni dijelovi tuđih radova.

Student/ica:

(upisati ime i prezime)

Frntić M.

(vlastoručni potpis)

Sukladno članku 58., 59. i 61. Zakona o visokom obrazovanju i znanstvenoj djelatnosti završne/diplomske/specijalističke radove sveučilišta su dužna objaviti u roku od 30 dana od dana obrane na nacionalnom repozitoriju odnosno repozitoriju visokog učilišta.

Sukladno članku 111. Zakona o autorskom pravu i srodnim pravima student se ne može protiviti da se njegov završni rad stvoren na bilo kojem studiju na visokom učilištu učini dostupnim javnosti na odgovarajućoj javnoj mrežnoj bazi sveučilišne knjižnice, knjižnice sastavnice sveučilišta, knjižnice veleučilišta ili visoke škole i/ili na javnoj mrežnoj bazi završnih radova Nacionalne i sveučilišne knjižnice, sukladno zakonu kojim se uređuje umjetnička djelatnost i visoko obrazovanje.

ZAHVALA

Želim zahvaliti svojoj mentorici prof.dr.sc. Ivanki Netinger Grubeša na podršci i motivaciji tijekom pisanja ovog rada. Vaši savjeti i kritike uvelike su pomogli u izradi rada. Također, zahvaljujem svojim kolegama koji su mi pružili inspiraciju i pomoć u izazovnim trenucima tijekom studiranja te na kraju hvala mojoj obitelji koja me uvijek podržavala i vjerovala u mene.

SAŽETAK

Obzirom na sve brži razvoj i urbanizaciju, postoji povećana potreba za novim i poboljšanim vrstama betona. Potražnja potiče brojne istraživače da razviju inovativne materijale koji ne samo da zadovoljavaju propisane građevinske standarde, smanjuju utjecaj na okoliš te potrebu za prirodnim resursima već kako otpadni materijal koji je nastao iz proizvodnje opeke iskoristiti. U eksperimentu su ispitivani mortovi s različitim udjelima drobljene opeke (od 0 do 100%), pri čemu su rezultati pokazali da se s povećanjem udjela drobljene opeke smanjuje konzistencija morta/mikrobetona zbog veće sposobnosti upijanja vode ovog materijala. Unatoč smanjenju vlačnih i tlačnih čvrstoća s povećanjem udjela drobljene opeke, mortovi su zadržali dovoljnu čvrstoću za zidanje u seizmički aktivnim područjima. Ovaj pristup ne samo da pridonosi smanjenju ekološkog otiska građevinskih materijala, već i potiče održivost u građevinskoj industriji kroz iskorištavanje otpada.

Ključne riječi: beton, agregat, drobljena opeka, svojstva betona

ABSTRACT

Given the rapid development and urbanization, there is an increasing need for new and improved types of concrete. This demand has prompted numerous researchers to develop innovative materials that not only meet established construction standards but also reduce environmental impact and the need for natural resources, while utilizing waste material generated from brick production. The experiment examined mortars/microconcretes with varying proportions of crushed brick, ranging from 0 to 100%. The results indicated that as the proportion of crushed brick increased, the consistency of the mortar decreased due to the greater water absorption capacity of this material. Despite the reduction in flexural and compressive strengths with increasing crushed brick content, the mortars retained sufficient strength for masonry in seismically active areas. This approach not only contributes to reducing the ecological footprint of construction materials but also promotes sustainability in the construction industry through waste utilization.

Keywords: concrete, aggregate, crushed brick, properties of concrete

SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
2. POVIJEST BETONA I BETONSKIH GRAĐEVINA.....	2
2.1. POČECI ARMIRANOG BETONA.....	4
2.2. BETON U HRVATSKOJ.....	8
3. BETON.....	8
3.1. SASTAV BETONA.....	12
3.1.1. Hidraulička veziva.....	12
3.1.2. Agregat.....	13
3.1.3. Voda.....	15
3.1.4. Dodaci betonu.....	16
4. LAGANI I TEŠKI BETON.....	16
5. FIZIKALNO-MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA.....	17
5.1. GUSTOĆA.....	17
5.2. VLAČNA ČVRSTOĆA.....	19
5.3. TLAČNA ČVRSTOĆA.....	22
6. MIKROBETON.....	25
7. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA OPEKE.....	26
7.1. UPORABA DROBLJENE OPEKE KAO AGREGATA U BETONU.....	26
7.1.1. Učinci drobljenog glinenog agregata za opeku na trajnost betona.....	26
7.1.2. Utjecaj recikliranog agregata od gline i sadržaja drobljenih opeka na mehanička svojstva betona.....	29
7.1.3. Utjecaj tipa agregata na požarnu otpornost mikrobetona.....	35
7.2. UPORABA DROBLJENE OPEKE KAO VEZIVA U BETONU.....	41
7.2.1. Svojstva cementnih materijala s recikliranim agregatom i prahom iz otpada glinene opeke.....	41
7.2.2. Utjecaj fine gline na ponašanja samozbijajućeg betona.....	45
7.2.3. Ponovno korištenje otpada od glinene opeke.....	48
8. EKSPERIMENTALNI DIO.....	51
8.1. SVOJSTVA AGREGATA.....	51
8.2. IZRADA BETONSKIH UZORAKA.....	56

8.3. ISPITIVANJE MORTOVA.....	57
8.4. ANALIZA REZULTATA.....	64
9. ZAKLJUČAK.....	67
Reference.....	68
Popis slika.....	70
Popis tablica.....	72

1. UVOD

Beton je jedan od najznačajnijih materijala u građevinarstvu, a njegova povijest seže unazad do 27. godine prije Krista [1]. Tijekom stoljeća, beton je igrao ključnu ulogu u razvoju arhitekture, posebno u razdoblju Rimskog carstva, omogućavajući gradnju složenih struktura i dizajna koji nisu bili mogući isključivo upotrebom prirodnog kamena. U Hrvatskoj, upotreba betona započinje krajem 19. stoljeća [7], u vrijeme kada je zemlja bila dio Austro-Ugarske Monarhije. Rijeka je tada kao glavna pomorska luka tog doba, postala središte inženjerskih i građevinskih inovacija, a mnogi od najpoznatijih primjera betonskih konstrukcija mogu se pronaći upravo u ovom gradu. Među najistaknutijim primjerima ranih betonskih konstrukcija u Hrvatskoj je Brod na Savi, gdje su se već tada koristili inovativni pristupi u izgradnji.

Danas postoji značajna razlika između betona korištenog u rimskim građevinama i modernih betonskih konstrukcija, posebno u pogledu trajnosti i tehnoloških dostignuća. Ovaj rad istražuje razvoj betona kao građevinskog materijala, njegovu primjenu kroz povijest te suvremene trendove i izazove u njegovoj upotrebi.

2. POVIJEST BETONA I BETONSKIH GRAĐEVINA

Iskustva u dobivanju betona datiraju još iz razdoblja antičkih civilizacija. Vitruvije poznat kao rimski arhitekt opisuje beton kao umjetni kamen koji su Rimljani proizvodili i koristili pod nazivom „opus signium“ u svom djelu "O arhitekturi" koje datira iz 27. godine pr. Kr. Rimljani su u početku koristili samo gašeno vapno kao vezivo, a kasnije mu dodavali drobljenu opeku, koju su kasnije zamijenili vulkanskim pepelom odnosno pucolanom iz područja Pozzuolija. Uporabom betona kao građevinskog materijala arhitektura Rimskog carstva doživljava svoj najveći rast, stvarajući moguće strukture i dizajne koji se nisu mogli graditi koristeći samo kamen koji je bio glavni element rane rimske arhitekture. Zamjena drobljene opeke vulkanskim pepelom rezultirala je kvalitetnim i trajnim hidrauličnim vezivom koje može očvrnuti i u vodi, time su stvorili izdržljiv materijal koji se koristio za gradnju stupova, lukova, hramova i kupola, poput Rimskih toplica, Colossuma, slavne Kupole Panteona u Rimu (Slika 1) te most Pont du Gard u Francuskoj (Slika 2) koji je donosio vodu gradu Nimesu [1].



Slika 1. Kupola Panteona u Rimu [2]



Slika 2. Most Pont du Gard [3]

Rimske betonske konstrukcije, koje su izgrađene prije više od 2000 godina, i danas stoje na izvornim mjestima, prkoseći vremenskim uvjetima. Kvaliteta rimskog betona značajno se razlikuje od suvremenih betonskih mješavina. Prema istraživanju provedenom na Sveučilištu Utah, rimski beton izrađen je od specifične kombinacije vulkanskog pepela, vapna (kalcijev oksid), morske vode i vulkanskog kamenja. U usporedbi s današnjim betonom, ova jedinstvena mješavina korištena je za izgradnju lučkih konstrukcija, lukobrana i brana te je, prilikom kontakta s vodom, postajala sve čvršća. Znanstvenici objašnjavaju da je tajna u kemijskoj reakciji između morske vode te vulkanskih materijala, koja rezultira formiranjem novih minerala, dodatno učvršćujući strukturu betona [1].

Stare betonske građevine postoje u svim dijelovima svijeta, često kao razorene građevine izložene različitim vremenskim uvjetima. Takve građevine postoje i kod nas, na primjer u Polačama na otoku Mljetu i drugdje, no danas je najzanimljivija građevina stari rimski vodovod u Kölnu koji je djelomično još uvijek dobro očuvan obzirom da se nalazi u klimatsko nepovoljnom predjelu [4].

Padom Rimskog Carstva, znanje o betonu postepeno je nestalo do 14. stoljeća kada je počela ponovna uporaba živog vapna i pucolana, sve dok 1414. nije pronađen rukopis koji opisuje tu tehniku u detalj tako ponovo dolazi do interesa za proizvodnju betona. S razvojem moderne industrije, došlo do ponovnog otkrića i daljnjeg usavršavanja betonskih materijala [1].

Godine 1756. John Smeaton (britanski inženjer) izradio je prvi moderni beton (hidraulički cement) dodavanjem šljunka kao grubog agregata i miješanjem opeke u cement. Prilikom izgradnje svjetionika Eddystone primijetio je kako dodavanje glinenih materijala vapnu poboljšava njegovu otpornost na vodu [1].

Moderna znanstvena iskustva počinju 1818. godine, kad je Vicat otkrio uzroke hidrauličkih svojstava nekih vrsta vapna. Vicatova otkrića postavila su dobro temelje za daljnja znanstvena istraživanja hidrauličnih veziva, koja su danas vrlo razgranata. Iako je još uvijek dug put do konačnih spoznaja u ovom području, dosadašnja istraživanja omogućila su proizvodnju velikih količina cementa u standardiziranim kvalitetama [4] .

Potom, 1824. godine, Joseph Aspdin (engleski izumitelj) iz Leedsa izumio je novi materijal koji je bojom podsjećao na građevni kamen iz okolice Portlanda, nazvavši ga tako portland cement. Aspdin je stvorio prvi pravi umjetni cement spaljivanjem zemaljskog vapnenca i glina zajedno. Iako nije bio dovoljno pečen bio je jače vezivo od proizvedenog običnog zdrobljenog vapnenca, čime je postigao poboljšanje kemijskih svojstava materijala, što je rezultiralo znatno boljim mehaničkim svojstvima od prethodnih mješavina [1].

Francuzi Cointeraux i Lebrun izgradili su 1837. godine prvu poznatu stambenu zgradu od betona. Iste godine, G.A. Ward izgradio je betonsku kuću u Americi. Značajan napredak postignut je 1845. godine kada je Isaac Johnson, pečenjem mješavine gline i vapnenca do stvaranja klinkera, uspio proizvesti portland cement, nazvan prema boji očvrstlog cementa, koja je slična vapnencu iz okolice Portlanda. Ova vrsta cementa i danas se koristi. Godine 1849., Pettenkofer i Fuchs (njemački istraživači) proveli su i objavili prvu preciznu kemijsku analizu portland cementa, čime je započela njegova proizvodnja kao hidrauličkog veziva za betonske konstrukcije [5].

2.1. POČECI ARMIRANOG BETONA

Kao što je već navedeno, beton je umjetni kamen čija je vlačna čvrstoća značajno manja od tlačne čvrstoće. Tako je sredinom 19. stoljeća došlo do otkrića armiranog betona, što se smatra jednim od povijesnih koraka u razvoju građevinskih materijala [1].

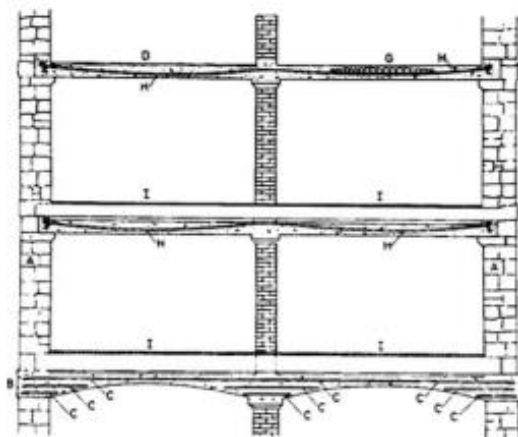
Godine 1848. Lambot, a nedugo nakon njega i Monier, otkrili su da se objekti od betona mogu znatno ojačati dodavanjem jeftinih željeznih žica ili mreža tijekom procesa betoniranja [2].

Francuz Lambot 1850. godine, izradio je čamac od žičane mreže obložene mortom (Slika 3), a prema nekim autorima, smatra se izumiteljem armiranog betona [6].

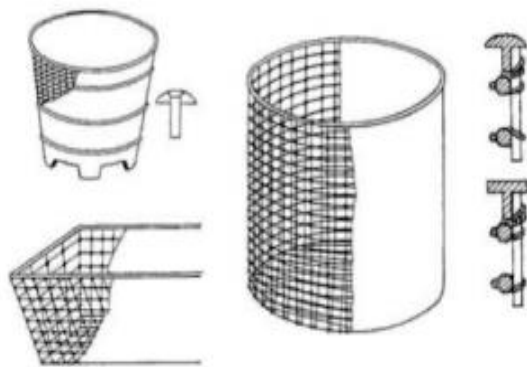


Slika 3. Lambotov čamac [6]

Nedugo nakon toga, armirani beton prvi put je primijenjen u građevinarstvu kada je W. Wilkinson izveo betonske stropove armirane šipkama i užadi od žica na zgradi u Newcastleu (Slika 4). U razdoblju od 1850. do 1880. godine, francuski graditelj François Coignet izgradio je nekoliko zgrada u Velikoj Britaniji i Francuskoj s betonskim stropovima armiranim užadima [6].



Slika 4. Betonski stropovi Wilkinsonsona [6]



Slika 5. Izgled betonskih lonaca Moniera [6]

Francuz Joseph Monier predstavio je 1876. godine na sajmu u Parizu lonce za cvijeće američkog proizvođača Williama Wanda, ojačane žicom, čime je uveo ideju željezne armature (Slika 5). Ubrzo nakon toga, patentirao je i manje rezervoare, cijevi, montažne ploče i svodove. Njemački graditelj G.A. Wayss otkupio je navedene patente 1879. godine i promovirao ih pod nazivom Wayss-Monier sistem, koristeći ih za izgradnju velikog broja objekata u Njemačkoj, Austriji, pa čak i u Americi. Ovaj sistem bio je široko primjenjivan, a naziv "monierka" često se koristi u praksi za tanke prefabricirane betonske ploče i danas [6].

Prva armiranobetonska zgrada izgrađena je 1875. godine u Port Chesteru, New York, izgradio ju je W.E. Ward (Slika 6). U isto vrijeme, francuski graditelj F. Hennebique započeo je s gradnjom armiranobetonskih objekata. Osim svojih početaka u gradnji, smatra se i začetnikom teorije i tehnologije primjene armiranog betona. Godine 1892. izveo je novi tip rebrastih stropova i uveo primjenu armiranobetonskih pilota u praksi. Svoje patente, poznate kao Hennebique beton sistem, provodio je sa svojim tvrtkama širom Europe i svijeta. Hennebique se može smatrati začetnikom razdoblja intenzivnijeg razvoja armiranog betona, tijekom kojeg su nastali razni sustavi armiranobetonskih konstrukcija i primjenjive metode proračuna istih [4].

Prva armirano-betonska zgrada u kojoj je novi materijal postao istovremeno konstrukcijski element i element pročelja izgrađena je 1903. godine. Riječ je o stambenoj zgradi Augusta Perreta u Parizu. A. Perret je projektirao i crkvu Notre Dame u Le Raincyju, gdje je po prvi put oblikovano pročelje

kao lagana filigranska betonska rešetka, dok je nosivost građevine postignuta izvedbom stupova unutar objekta [7].



Slika 6. Prva armirano-betonska zgrada [7]

Od važnijih metoda proračuna potrebno je istaknuti metodu proračuna armiranobetonskih konstrukcija prema dopuštenim naprezanjima, poznatu kao klasična metoda, koju je razvio Francuz De Tedeschi na prijelazu iz 19. u 20. stoljeće. Metoda se temelji na linearnom odnosu između naprezanja i deformacija u betonu i armaturi. U razdoblju od 1932. do 1936. godine, A.F. Lolejt i grupa stručnjaka uveli su u praksu tzv. prijelomnu metodu proračuna armiranobetonskih konstrukcija u bivšem SSSR-u, koja se smatra prethodnicom današnje metode graničnih stanja. Uz navedene graditelje i njihova otkrića, posebno mjesto zauzima i Francuz Eugène Freyssinet, koji je 1928. godine patentirao prednapeti beton i izveo prvu uporabivu konstrukciju od prednapetog betona. Smatra se začetnikom prednapetog betona i razvoja prednapetih konstrukcija velikog raspona [7].

Tijekom povijesnog pregleda razvoja betonskih konstrukcija može se zaključiti da su počeci istih zabilježeni u Francuskoj, gdje su prvi veliki graditelji ovakvih struktura bili upravo Francuzi. Francuska škola betonskog graditeljstva i danas je jedna od najpoznatijih u svijetu, s brojnim realiziranim građevinama koje se ističu svojom inovativnom statikom, oblikovanjem i velikim rasponima. Naravno, ne možemo zaboraviti ni njemačke i engleske izumitelje, kao i projektante suvremenih građevina izgrađenih od betona u Sjedinjenim Američkim Državama, Kini, Japanu i

drugim zemljama. Ovi stručnjaci značajno su doprinijeli razvoju i inovacijama u području betonskih konstrukcija, čime su oblikovali modernu arhitekturu i inženjerstvo [1].

2.2. BETON U HRVATSKOJ

Krajem 19. stoljeća, u skladu s europskim trendovima, započela je primjena betona i betonskih konstrukcija u Hrvatskoj. U tom su razdoblju izvedene su prve građevine od betona i armiranog betona. Među najistaknutijim primjerima ranih betonskih konstrukcija u Hrvatskoj je Brod na Savi, gdje su se već tada koristili inovativni pristupi u izgradnji. Najpoznatiji primjeri izvedenih građevina s početka primjene betonskih konstrukcija u Hrvatskoj nalaze se u Rijeci. Razlog je taj što je Hrvatska bila u sastavu Austro-Ugarske, a Rijeka je bila glavna pomorska luka s potrebama za suvremenim inženjerskim građevinama. Daljnja značajnija primjena armiranog betona odvijala se u gradnji raspona mostova, ne samo na prometnicama prema Rijeci, već i širom Hrvatske. Ova tehnologija omogućila je izgradnju mostova s velikim rasponima i visokom nosivošću, što je bilo od ključne važnosti za razvoj prometne infrastrukture. Armirani beton se pokazao kao idealno rješenje za stvaranje sigurnih i izdržljivih konstrukcija, koje su mogle izdržati velike opterećenja i nepovoljne vremenske uvjete [7].

3. BETON

Opće poznato je da je beton građevinski materijal koji se sastoji od cementa, agregata i vode, pri čemu agregat čini najveći postotak u mješavinama betona. Upravo agregat igra ključnu ulogu, jer različiti agregati mogu značajno utjecati na bitna svojstva betona, kao što su čvrstoća, otpornost i trajnost. U svježem stanju, beton se lako može oblikovati, lijevanjem u kalupe ili oplatu, a zadržava taj oblik trajno nakon očvršćavanja. Njegova povoljna konstrukcijska i druga svojstva učinila su beton najraširenijim građevinskim materijalom u današnjem građevinarstvu [8].

S obzirom na sve veći problem otpada u svijetu, uključujući otpad nastao rušenjem građevina, mnogi znanstvenici fokusiraju se na istraživanje mogućnosti korištenja tog otpada u proizvodnji betona. Ova istraživanja ne samo da doprinose ekološki prihvatljivijem pristupu građevinskoj industriji, već također nude potencijalne ekonomske koristi, osobito u urbanim područjima koja se suočavaju s ograničenim resursima. Ovaj rad istražuje utjecaj drobljene opeke na svojstva betona,

kao i mogućnosti recikliranja građevinskog otpada u cilju poboljšanja održivosti i isplativosti betonskih konstrukcija.

Agregat čini između 60% i 80% volumena betona i dijeli se u frakcije kako bi se postiglo optimalno pakiranje zrna s minimalnim šupljinama. Frakcija agregata predstavlja skup zrna određene veličine, kao što su 0–4 mm, 4–8 mm, 8–16 mm, 16–32 mm itd. Prije izrade betona, utvrđuje se granulometrijski sastav agregata, odnosno raspodjela različitih frakcija u ukupnom sastavu. U proizvodnji betona koriste se prirodni agregati (riječni ili drobljeni), umjetni agregati, sekundarne sirovine iz drugih industrija (poput zgure) te reciklirani materijali (npr. reciklirani beton, opeka, guma itd.). Neka od ključnih svojstava agregata koja utječu na primjenu u betonu uključuju oblik zrna, sadržaj sitnih čestica, čvrstoću, modul elastičnosti, otpornost na zamrzavanje i odmrzavanje te otpornost na abraziju [8].

Za izradu betona danas se najčešće koristi portland cement koji se sastoji od klinkera, mineralnih dodataka i sporednog sastojka (gips). Kada dođe u kontakt s vodom, cement započinje proces hidratacije, tijekom kojeg dolazi do postupnog vezivanja i očvršćivanja. Najzastupljeniji produkt hidratacije je kalcij-silikat-hidrat (C-S-H) gel, koji obično ima amorfnu strukturu. Osim njega, prisutni su i kalcijev hidroksid te etringit, koji se javlja u manjoj količini [8].

Kalcijev hidroksid pojavljuje se u obliku heksagonalnih kristala i, iako je u očvrsnuloj cementnoj matrici manje zastupljen od C-S-H gela, igra važnu ulogu u održavanju visoke pH vrijednosti betona, čime se osigurava pasivna zaštita čelične armature od korozije. Također, kalcijev hidroksid sudjeluje u pucolanskoj reakciji s određenim mineralnim dodacima, poput silicijske prašine ili letećeg pepela. Ovom reakcijom, struktura betona se obogaćuje novom količinom C-S-H gela, što dodatno povećava čvrstoću i trajnost betona [8].

Danas se u proizvodnji betona često koriste kemijski dodaci radi poboljšanja njegovih svojstava, kako u svježem, tako i u očvrsnulom stanju. Među najčešćim dodacima su aeranti, koji se primjenjuju za poboljšanje otpornosti betona na smrzavanje, te superplastifikatori, koji poboljšavaju obradivost betona. Također se koriste ubrzivači i usporivači, koji utječu na brzinu vezivanja i očvršćivanja [8].

U industriji betona koriste se različiti mineralni dodaci, kao što su leteći pepeo iz termoelektrana na ugljen, silicijska prašina koja se dobiva tijekom proizvodnje silicijskih i ferosilicijskih legura, te zgura koja potječe iz proizvodnje čelika. Variranjem vrste i količine cementa, agregata i dodataka, moguće je dobiti različite vrste betona. Obični betoni imaju gustoću od 2000 do 2600 kg/m³, tlačnu čvrstoću u rasponu od 10 do 60 N/mm², dok je vlačna čvrstoća obično oko 10% od tlačne čvrstoće [8].

Glinopor, ekspanzirani polistiren, perlit, vermikulit i plovuac kao lagane agregate moguće je koristiti odnosno njihovim korištenjem proizvesti lagane betone s gustoćom do 2000 kg/m³. Također se mogu dobiti korištenjem sredstva za proizvodnju plina ili pjene, pri čemu se stvara porozna struktura betona, naziva plinobetoni i pjenobetoni. Takvi betoni odnosno elementi od laganog betona imaju poboljšana toplinska svojstva i manju vlastitu težinu. Obzirom na njihova svojstva mogu se koristiti kod ispuna, kao izolacijski betoni, i konstrukcijski betoni gdje ovise o svojoj čvrstoći [8].

Osnovno je svojstvo betona tlačna čvrstoća. Razred tlačne čvrstoće označava karakterističnu tlačnu čvrstoću betona u N/mm² u starosti 28 dana, dobivenu na valjcima visine 30 cm i promjera 15 cm, odnosno kockama 15 x 15 cm.

U svježem stanju beton mora omogućiti jednostavno miješanje, prijevoz, ugradnju, zbijanje i završnu obradu, pri čemu treba voditi računa da ne dođe do segregacije ili izdvajanja vode. Segregacija je proces u kojem se izdvajaju krupnija zrna iz svježe betonske mješavine zbog čega dolazi do povećanja maksimalnog promjera zrna agregata iznad 25 mm, do veće količine krupne frakcije u odnosu na pijesak, udjela zrna neprikaldnog oblika te smanjenja cementa u mješavini i promjene u količini vode. Za sprječavanje segregacije važno je održavati optimalan omjer svih sastojaka betonske mješavine, čime se osigurava kvaliteta i trajnost konačnog proizvoda [8].

Ugrađeni svježi beton, kroz proces hidratacije cementa i očvršćivanja, prelazi u čvrsto stanje (Slika 7). Ovaj proces očvršćivanja traje određeno vrijeme, što znači da beton mora dostići određenu starost prije nego što preuzme projektirano opterećenje.

Za većinu mehaničkih svojstava betona, mjerodavna je 28-dnevna starost, pri kojoj se obično određuju i ispituju karakteristike betona. Ova starost se smatra standardnom za procjenu čvrstoće i drugih relevantnih svojstava betona [7].



Slika 7. Lijevanje i ravnanje svježeg betona te izgled stvrdnutog betona konstrukcije [7]

U projektiranju betonskih konstrukcija, analiziraju se i propisuju sljedeća glavna svojstva betona:

1. Vrsta očvrstlog betona - klasifikacija betona prema njegovim karakteristikama i primjenama.
2. Tlačna čvrstoća - sposobnost betona da izdrži kompresivna opterećenja bez lomljenja.
3. Vlačna čvrstoća - otpornost betona na vučna opterećenja, koja je obično znatno manja od tlačne čvrstoće.
4. Modul elastičnosti - mjera krutosti betona, koja ukazuje na njegovu sposobnost da se deformira pod opterećenjem.
5. Temperaturni koeficijent - promjena dimenzija betona uslijed temperaturnih varijacija.
6. Skupljanje i puzanje - promjene volumena betona tijekom vremena pod konstantnim opterećenjem.
7. Otpornost na smrzavanje - sposobnost betona da izdrži cikluse smrzavanja i odmrzavanja bez oštećenja.
8. Ostala dugotrajna svojstva - uključujući vodonepropusnost, tvrdoću i druga relevantna svojstva koja utječu na dugotrajnost betonskih konstrukcija [7]

3.1. SASTAV BETONA

3.1.1. Hidraulička veziva

Hidraulička veziva čine ključni dio građevinske industrije jer omogućuju stvaranje čvrstih spojeva među materijalima u prisutnosti vode. Njihova glavna karakteristika je sposobnost vezivanja i stvrdnjavanja čak i u vlažnim uvjetima, što ih čini neophodnima za mnoge građevinske projekte, osobito one koji uključuju beton. Osnovni sastojak svih hidrauličkih veziva je kalcijev oksid (CaO), poznat i kao živo vapno, koje je bez hidrauličkih svojstava u čistom obliku. Međutim, u kombinaciji s drugim oksidima, poput silicijeva dioksida (SiO_2), aluminijskoga oksida (Al_2O_3) i željeznog oksida (Fe_2O_3), kalcijev oksid postaje ključan za stvaranje složenih spojeva koji omogućuju proces hidratacije i očvršćavanja [4].

Uz navedene osnovne spojeve, u hidrauličkim vezivima prisutni su i manji udjeli magnezijeva oksida (MgO), kalijeva oksida (K_2O) i sumpornog trioksida (SO_3). Ovi oksidi reagiraju s vodom i omogućuju proces očvršćavanja, stvarajući materijal visokih mehaničkih svojstava i otpornosti na vodu. Hidraulička veziva, koja se upotrebljavaju za građevinske svrhe, možemo u grubo podijeliti na nekoliko skupina [4].

Hidraulička vapna, dobivaju se pečenjem vapnenca koji sadrži u sebi 12% do 30% gline na temperaturama između 850°C i 950°C . Mljevenjem se dobiva prah, koji se zatim koristi u malterima za zidanje i žbukanje [4].

Zidarski cementi, nastaju mješanjem vapnenca i gline (30-40%) na temperaturama od 1000°C do 1200°C . Koriste se za manje zahtjevne betonske konstrukcije [4].

Portland cementi, ova vrsta cementa proizvodi se umjetnim miješanjem vapnenca i gline, koji se sinteriraju na temperaturama od 1450°C , čime se dobiva klinker. Klinker se potom melje s dodatkom gipsa kako bi se kontroliralo vrijeme vezivanja cementa [4].

Metalurški cementi, ovi cementi se proizvode miješanjem topioničke šljake, klinkera i sadrovca u različitim omjerima. Koriste se za jeftiniju gradnju, ali zbog svojih svojstava nisu preporučeni za konstrukcije visoke otpornosti [4].

Aluminatni cementi, sastavljeni od mješavine vapnenca i boksita, aluminatni cementi peču se na temperaturama oko 1650°C. Njihova specifična svojstva čine ih korisnima u posebnim uvjetima, poput gradnje koja zahtijeva visoku otpornost na kemijske utjecaje i temperature [4].

Hidratacija je ključni proces koji omogućuje očvršćavanje hidrauličkih veziva. Kada cement dođe u kontakt s vodom, dolazi do kemijskih reakcija koje rezultiraju formiranjem novih kristalnih struktura, zvanih hidrati. Ove strukture daju materijalu čvrstoću i otpornost. Proces hidratacije ne završava brzo, on se može nastaviti godinama nakon početnog stvrdnjavanja, čime se poboljšava otpornost i trajnost materijala. Tijekom hidratacije dolazi do stvaranja mikroskopskih kristala različitih oblika (iglica, koničnih, kubičnih ili paralelopipednih struktura). Ovi kristali postaju ključni za stvaranje čvrste mreže u betonu ili mortu, omogućujući vezivanje svih čestica u kompaktnu cjelinu [4].

3.1.2. Agregat

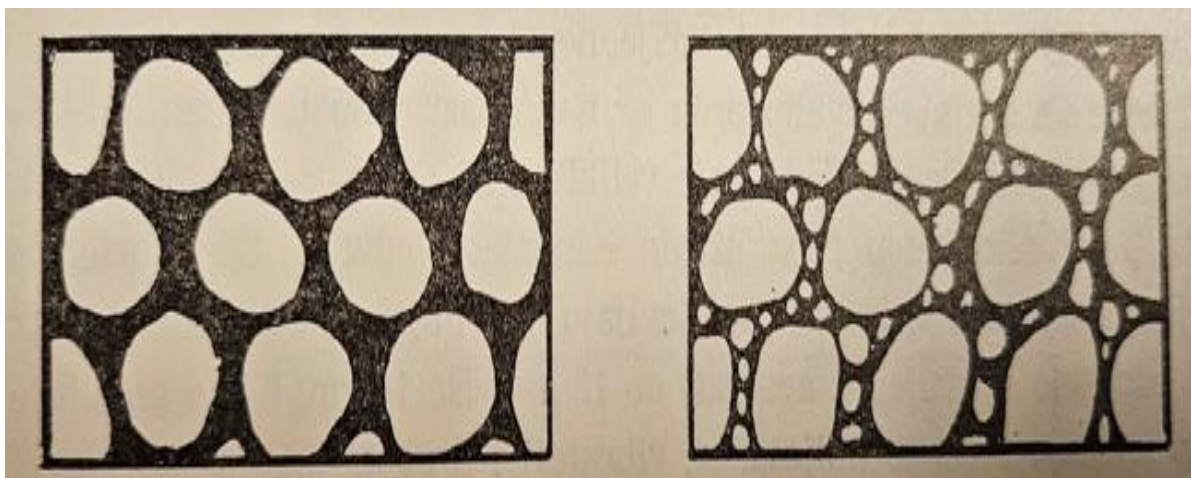
Nositelj čvrstoće betona, osim cementa, je i agregat, koji se mora sastojati od zrna različitih veličina kako bi se ispunile šupljine nastale slaganjem zrna iste veličine. Oblik zrna šljunka i pijeska ovisi o mineralnom sastavu zrna te načinu na koji su nastala. Prema porijeklu, agregat se dijeli na eruptivni agregat (dobiven od granita, bazalta i dijabaza), sedimentni agregat (dobiven od vapnenca, dolomita i škriljevca) te umjetni agregat (poput šljake visokih peći i pečene gline). Svaka od ovih vrsta koristi se u pripremi betona, pod uvjetom da ima dovoljnu čvrstoću, odgovarajuću granulaciju i da nije štetna za beton [4].

Beton se izrađuje koristeći razne vrste agregata, uključujući prirodne agregate poput riječnog i drobljenog kamenja, umjetne agregate, sekundarne materijale poput zgure iz drugih industrija, te reciklirane materijale kao što su reciklirani beton, opeka i guma. Bitna svojstva agregata za beton uključuju oblik zrna, količinu sitnih čestica, čvrstoću, modul elastičnosti, te otpornost na smrzavanje, odmrzavanje i abraziju [8].

Agregat je uvijek potrebno klasificirati prema obliku zrna. Francuski propisi pružaju dobru osnovu za klasifikaciju kroz uvođenje volumetričkog koeficijenta, koji se definira kao omjer zbroja

volumena svih zrna agregata prema zbroju volumena najmanjih kugli opisanih oko svakog zrna. Za pijesak je potrebno izmjeriti sva zrna unutar 1 cm^3 prosječne mješavine. Kod agregata za običan beton, taj koeficijent ne smije biti manji od 0,12, dok za betone koji moraju biti otporni ili nepropusni, koeficijent ne smije biti manji od 0,15. Ovaj kriterij osigurava kontrolu maksimalnog udjela pločastih i igličastih zrna unutar agregata. Zaobljena zrna su svakako povoljnija za beton jer omogućuju lakšu obradu betona s manjom količinom dodane vode, čime se smanjuje rizik od oštećenja uslijed lokalnih prenaprezanja koja mogu nastati uslijed slijeganja oštih bridova agregata [4].

Sastav agregata, odnosno omjer zrna različitih veličina, ima presudan utjecaj na čvrstoću betona. Prilikom odabira agregata uvijek treba voditi računa o tome da veličine zrna i njihova količina zadovoljavaju uvjet prema kojem sitnija zrna ispunjavaju šupljine između većih zrna. Ovim pristupom postiže se maksimalna ušteda cementa, budući da preostaje minimalna količina praznih prostora koje mora popuniti cementna pasta (Slika 8) [4].



Slika 8. Uloga sitnog pijeska u agregatu [4]

Volumen šupljina sadržanih u pijesku i šljunku nije konstantan i značajno varira ovisno o vrsti i obliku zrna. Na primjer, pravilno oblikovani šljunak s uniformnim zrnima može imati približno 38% šupljina, dok drobljenac pokazuje raspon šupljina između 40% i 50%. Grubozrni i jednakozrni pijesak obično sadrži oko 50% šupljina, dok miješani pijesak, koji se sastoji od zrna različitih veličina, može imati minimalnu ili čak nultu količinu šupljina. Jedan od glavnih izazova u teorijskom pristupu optimizaciji mješavina je taj što se u praksi ne koriste isključivo pravilna

okrugla zrna, već se susreću zrna raznih oblika i veličina. Ova raznolikost otežava postizanje idealnog rasporeda zrna, što dodatno doprinosi stvaranju praznog prostora unutar agregata. S obzirom na navedeno, važno je provesti eksperimentalne studije kako bi se utvrdio najpovoljniji omjer zrnatosti koji će rezultirati najvećim volumenom agregata u jedinici mjere. Ovaj pristup također ima za cilj optimizaciju gustoće betona, čime se doprinosi njegovoj ukupnoj čvrstoći i trajnosti. Istraživanje različitih kombinacija veličina zrna može dovesti do boljeg pakiranja i smanjenja količine šupljina. Eksperimentalne mješavine s različitim omjerima zrna omogućit će mjerenje ukupne gustoće betona i utvrđivanje optimalnog sastava [4].

3.1.3. Voda

Priprema betona zahtijeva korištenje što čišće tekuće ili bunarske vode. Vode koje sadrže mulj ili blato, kao i one koje su zagađene otpadnim vodama iz industrije ili kanalizacije, mogu imati ozbiljne negativne posljedice na kvalitetu betona. Prije upotrebe, neophodno je provesti kemijska ispitivanja kako bi se osigurala pogodnost vode za primjenu u betonskim mješavinama. Uzorci vode trebaju se uzimati tijekom ispuštanja otpadnih voda, jer se na taj način mogu dobiti precizni podaci o njihovoj kvaliteti. Ako se uzorci uzimaju u različitim vremenskim intervalima ili u razdobljima bez ispuštanja otpadnih voda, može doći do netočnih rezultata koji neće odražavati stvarno stanje vode [4].

Količina vode potrebna za hidrataciju cementa relativno je mala, obično iznosi oko 20% težine cementa. U većini slučajeva, normalna kapilarna vlaga agregata dovoljna je za teoretsku hidrataciju. Količina vode u svježem betonu često se izražava kroz vodocementni faktor, koji opisuje omjer između mase vode i mase cementa u određenoj količini betonske mješavine [4].

Vodocementni faktor ima ključan utjecaj na čvrstoću betona te na njegove druge mehaničke i fizikalne osobine. Odabir odgovarajućeg vodocementnog faktora treba se temeljiti na vrsti građevine i klimatskim uvjetima u području gradnje. U slučajevima kada vodocementni faktor ne zadovoljava zahtjeve čvrstoće betona potrebne za određenu konstrukciju, potrebno je smanjiti taj faktor. Međutim, smanjenje vodocementnog faktora može negativno utjecati na obradivost betona.

Obradivost se može poboljšati povećanjem količine cementa i sitnog agregata uz održavanje odgovarajućeg vodocementnog faktora, a dodatno se mogu koristiti i različiti aditivi [4].

3.1.4. Dodaci betonu

U modernoj proizvodnji za poboljšanje svojstava betona tijekom njegovog svježeg i očvrsnulog stanja, moderni postupci proizvodnje često uključuju kemijske dodatke. Aeranti su uobičajeni dodaci koji povećavaju otpornost betona na smrzavanje, dok superplastifikatori poboljšavaju njegovu obradivost. Također se koriste ubrzivači i usporivači vezivanja kako bi se precizno kontroliralo vrijeme očvršćivanja betona.

Različiti mineralni dodaci, uključujući leteći pepeo, silicijsku prašinu i zguru, primjenjuju se u industriji betona. Leteći pepeo dolazi iz termoelektrana na ugljen, silicijska prašina se dobiva u proizvodnji silicijskih legura, a zgura se stvara tijekom proizvodnje čelika. Korištenjem različitih vrsta i količina cementa, agregata i dodataka moguće je formulirati beton koji odgovara specifičnim uvjetima i zahtjevima. Obični betoni imaju gustoću koja se kreće između 2000 i 2600 kg/m³, tlačnu čvrstoću od 10 do 60 N/mm², dok je vlačna čvrstoća obično oko 10% tlačne čvrstoće [8].

4. LAGANI I TEŠKI BETONI

Lagana betonska mješavina može se postići primjenom agregata poput glinopora, ekspaniranog polistirena, perlita, vermikulita i plovućca, što rezultira gustoćom betona do 2000 kg/m³. Lagani betoni se također mogu proizvesti korištenjem sredstava za proizvodnju plina ili pjene, što rezultira povećanjem volumena i stvaranjem porozne strukture (plinobetoni i pjenobetoni) [8].

Svojstva laganog betona, uključujući manju vlastitu težinu i poboljšanu toplinsku izolaciju, omogućuju njegovu primjenu u izolacijskim slojevima, kao betona za ispunu, te u konstrukciji, ovisno o potrebnoj čvrstoći.

S druge strane, teški betoni imaju gustoću veću od 2600 kg/m³ i dobivaju se djelomičnom zamjenom običnog agregata teškim agregatima, kao što su barit, magnetit, čelične strugotine i

olovne kuglice. Teški betoni se široko koriste za zaštitu od radioaktivnog zračenja, s primjenom u industrijskoj radiografiji, bolnicama i nuklearnim postrojenjima. Pored svoje uloge u zaštiti od radioaktivnog zračenja, teški betoni se koriste i kao protu utezi na mostovima, za izradu blokova za lukobrane, te za temelje morskih platformi i sličnih građevinskih struktura [8].

5. FIZIKALNO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

5.1. GUSTOĆA

Beton nakon očvršćavanja (očvršli beton) se prema gustoći dijeli na sljedeće kategorije: obični beton: $\rho = 2000 - 2800 \text{ kg/m}^3$ (Slika 10), laki beton: $\rho < 2000 \text{ kg/m}^3$ (Slika 9) i teški beton: $\rho > 2800 \text{ kg/m}^3$ (Slika 11). Gustoća određenih vrsta betona prvenstveno ovisi o gustoći agregata (punila) korištenog za izradu betona, kao i o količini uvučenog zraka unutar strukture betona. Ova svojstva mogu se postići specijalnim tehnikama proizvodnje, koje utječu na konačnu gustoću i performanse betonskih konstrukcija [7].



Slika 9. Laki beton [7]



Slika 10. Obični beton [7]



Slika 11. Teški beton [7]

Obični beton predstavlja najrašireniju vrstu betona i koristi se za izradu većine nosivih betonskih konstrukcija. Ovaj tip betona izrađuje se od prirodnog agregata, koji je najjeftinija sirovina u betonskoj industriji. Prirodni agregat se dobiva iz vučenog nanosa, formiranog procesima erozije raznih vrsta stijena, te drobljenjem velikih komada prirodnih stijena. Svojstva agregata ovise o karakteristikama izvorne stijene i postupku usitnjavanja. U analizi i proračunima betonskih

konstrukcija od običnog betona, gustoća nearmiranog betona se uzima kao $\rho = 2400 \text{ kg/m}^3$, dok za armirani beton (beton + armatura) gustoća iznosi $\rho = 2500 \text{ kg/m}^3$. Radi pojednostavljenja proračuna, umjesto gustoće, obično se koristi pojam zapreminska težina betona. Prema prethodno navedenim gustoćama, zapreminska težina nearmiranog betona iznosi $\gamma_c = 24 \text{ kN/m}^3$, dok za armirani beton iznosi $\gamma_c = 25 \text{ kN/m}^3$. Zapreminska težina armiranog betona ovisi o količini armature, neki elementi mogu imati značajan postotak armiranja uzdužnom i poprečnom čeličnom armaturom, što rezultira većom zapreminskom težinom [7].

Laki betoni se dijele u nekoliko kategorija: lakoagregatni betoni, betoni od jednakoznatog agregata i ćelijasti betoni. Smanjenje gustoće ovih betona postiže se stvaranjem pora unutar agregata, stvaranjem međuprostora između krupnih zrna agregata, ili porama u cementnoj pasti. Iako stvaranje pora može smanjiti čvrstoću i otpornost na abraziju u odnosu na obični beton, laki betoni nude značajne prednosti, poput boljih izolacijsko-toplinskih i zvučnih svojstava, poroznosti i manje zapreminske težine [7].

Proizvodnja lakih betona je obično skuplja, a njihova ugradnja zahtijeva veći angažman kako bi se postigla tražena svojstva. U građevinarstvu se najčešće koriste lakoagregatni betoni, koji se izrađuju na bazi cementa, vode, lakih agregata i eventualnih aditiva. Ovi agregati mogu biti neorganskog porijekla (poput plovućca, perlita, vermikulita, drobljene opeke, keramizita) ili organskog porijekla (drvena strugotina, drvena vuna, ekspanzirani polistiren - EPS). Koriste za izradu raznih konstrukcijskih elemenata, ploča i blokova, pokrovnih elemenata, podloga za podove i završnih slojeva podova. Područje primjene lakih betona ovisi o njihovoj gustoći: laki betoni gustoće $\rho < 800 \text{ kg/m}^3$ koriste se kao termoizolacijski elementi, dok se laki betoni gustoće $\rho < 1400 \text{ kg/m}^3$ mogu primijeniti za konstrukcijske elemente [7].

Betoni od jednakoznatog agregata dobivaju se izostavljanjem sitnijih zrna agregata i upotrebom jedne frakcije nominalno iste veličine zrna. Ovi betoni su otporni na smrzavanje zbog smanjene prisutnosti kapilarnih pora, a također dobro apsorbiraju zvuk, što ih čini pogodnima za oblaganje prostorija u kojima su važni akustički uvjeti [7].

Najpoznatiji ćelijasti betoni, poput plinobetona i pjenobetona, proizvode se specijalnim metodama koristeći cement, vapno, leteći pepeo i kvarcni pijesak. Ovi procesi aktiviraju i ubrzavaju pucolanske reakcije letećeg pepela i kvarcnog pijeska, uz dodatak specijalnih aditiva koji izazivaju

ekspanziju plina i stvaraju ćelijastu strukturu. U građevinarstvu se najčešće koriste Ytong i Siporex, koji se koriste kao izolacijski i konstrukcijski elementi [7].

Teški betoni se karakteriziraju velikom zapreminskom masom, koja se postiže upotrebom teških agregata. Ovi agregati uključuju materijale poput barita, rudnog željeza (magnetit, hematit i limonit), strugotine, te specijalno izrađene kuglice od željeza i čelika. Kako bi se poboljšala zaštitna svojstva teških betona, često im se dodaju spojevi bora ili litija. Unatoč svojoj masivnosti, teški betoni nemaju visoke čvrstoće. Čvrstoća na tlak obično ne prelazi 40 MPa, dok se vlačne čvrstoće kreću između 1 i 3 MPa. Ova relativno niska čvrstoća uzrokovana je time što je čvrstoća cementnog kamena (paste) znatno niža od čvrstoće teških agregata, što rezultira linijom sloma koja prolazi kroz cementni kamen, zaobilazeći zrna agregata. Teški betoni imaju široku primjenu, posebno u područjima gdje je potrebna zaštita od zračenja, poput nuklearnih elektrana i bolnica (npr. u rendgenskim dvoranama i za zaštitu od kobaltnih bombi). Također se koriste kao temelji za teške strojeve i kao balast za stabilizaciju brodova [7].

5.2. VLAČNA ČVRSTOĆA

Vlačna čvrstoća betona se ne uzima u obzir pri dimenzioniranju armiranobetonskih konstrukcija za savijanje. Međutim, ona se razmatra prilikom provjere glavnih vlačnih naprezanja i graničnih stanja uporabljivosti.

S obzirom na to da vlačna čvrstoća betona može značajno varirati unutar određenog razreda, ona ima važnu ulogu u analizi sigurnosti i trajnosti konstrukcije. Stoga se koristi srednja vrijednost vlačne čvrstoće, označena kao $f_{ct,m}$, koja se nalazi između donje granice karakteristične vlačne čvrstoće ($f_{ctk 0.05}$) i gornje granice ($f_{ctk 0.95}$). Ove granice predstavljaju vlačne čvrstoće koje odgovaraju 5%-tnom i 95%-tnom fraktilu. Za konkretne razrede betona, vlačne čvrstoće su navedene u Tablici 1.

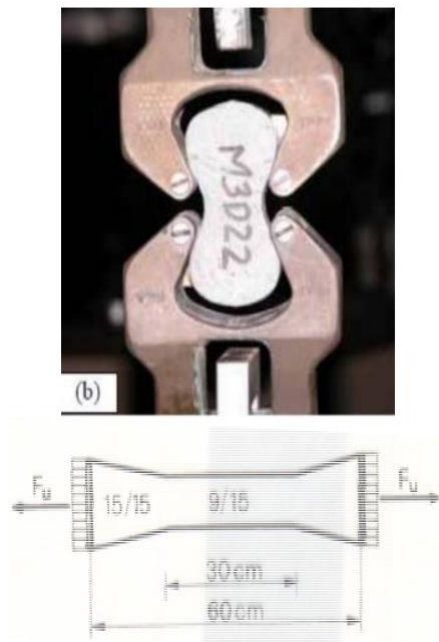
Tablica 1. Vrijednosti vlačne čvrstoće za pojedine razrede (klase) betona u N/mm² [7]

Razredi betona	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C40/50	C50/60
$f_{ct,m}$	1,6	1,9	2,2	2,6	2,9	3,5	4,1

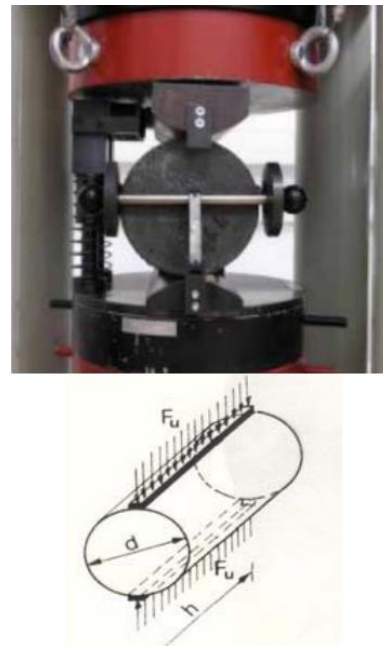
$f_{ctk,0,05}$	1,1	1,3	1,5	1,8	2,0	2,5	2,9
$f_{ctk,0,95}$	2,0	2,5	2,9	3,3	3,8	4,6	5,3

Donja karakteristična vrijednost vlačne čvrstoće, $f_{ctk,0.05}$, predstavlja vrijednost koju će 95% rezultata ispitivanja dostići ili premašiti, dok će samo 5% rezultata biti ispod te granice. S druge strane, gornja karakteristična vrijednost vlačne čvrstoće, $f_{ctk,0.95}$, označava vrijednost koju će premašiti samo 5% rezultata ispitivanja, dok će preostalih 95% imati vrijednost jednaku ili manju od te granice.

Obzirom na složenost pripreme uzoraka, vlačna čvrstoća se gotovo isključivo ne ispituje pomoću osnovog vlačnog ispitivanja (Slika 12). Umjesto toga, najčešće se koristi ispitivanje cijepanjem valjka (Slika 13), pri čemu se valjak opterećuje po njegovim izvodnicama ili ispitivanje na prizmatičnim uzorcima koji su opterećeni jednom ili dvjema koncentriranim silama na savijanje (Slika 14) [7].



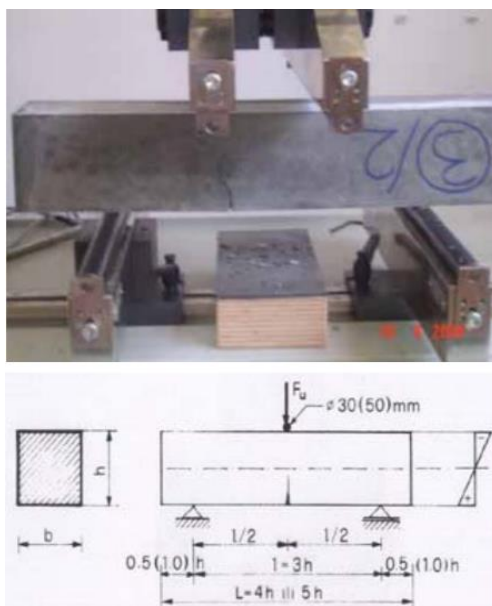
Slika 12. Ispitivanje vlačne čvrstoće



Slika 13. Ispitivanje vlačne čvrstoće

(čisti vlak) [7]

(cijepanjem valjka) [7]



Slika 14. Ispitivanje vlačne čvrstoće
(savijanje prizmice) [7]

5.3. TLAČNA ČVRSTOĆA

Tlačna čvrstoća (f_c) predstavlja otpornost materijala na razaranje pod opterećenjem na jedinici površine, odnosno njegov otpor prema drobljenju. Standardna mjerna jedinica za tlačnu čvrstoću je MPa (megapaskal) ili N/mm^2 . Tlačna čvrstoća betona ključan je pokazatelj kvalitete očvrslog betona, jer gotovo sva ostala svojstva betona pokazuju određenu korelaciju s ovom vrijednošću [7].

Na tlačnu čvrstoću betona utječu vrsta i čvrstoća cementa, svojstva agregata, vodocementni faktor, način ugradnje, utjecaj aditiva, način njege betona i starost betona.

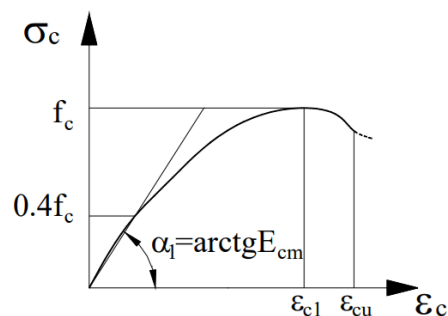
Tlačna čvrstoća betona mjeri se drobljenjem standardiziranih uzoraka (najčešće u obliku kocki ili valjaka) prema točno određenim normama. Izražava se kao razred odnosno klasa tlačne čvrstoće betona, definirane karakterističnom čvrstoćom betona (f_{ck}) u dobi od 28 dana. Pravila i formule za projektiranje i dimenzioniranje temelje se na karakterističnoj čvrstoći betona koja se određuje pomoću valjkastih uzoraka promjera 150 mm i visine 300 mm, označenih s f_{ck} [7].

Zbog težine pripreme i prijenosa uzoraka u obliku valjka dimenzija 150/300 mm, često se tlačna čvrstoća određuje na kockastim uzorcima dimenzija 150/150/150 mm (Slika 15), pri čemu se ta čvrstoća označava kao $f_{ck,cube}$. Karakteristična tlačna čvrstoća (razred betona) utvrđuje se na temelju statističkih metoda i računa vjerojatnosti, koristeći rezultate ispitivanja uzoraka starosti 28 dana, bilo da su u obliku valjka dimenzija 150/300 mm ili kocke dimenzija 150/150/150 mm [7].



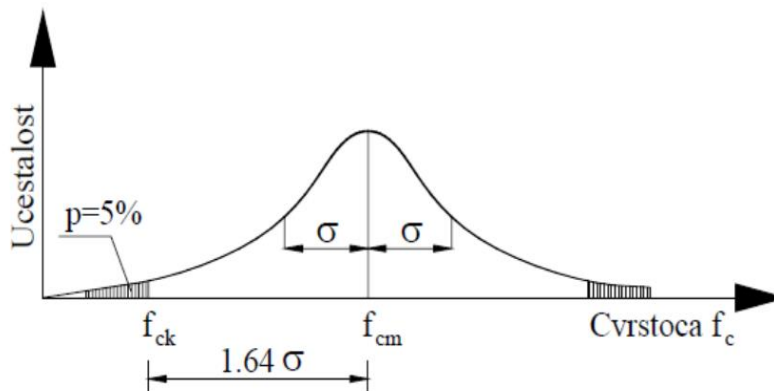
Slika 15. Izgled kalupa za pripremu uzoraka kocka i valjak [7]

Za svaki pojedini uzorak tijekom ispitivanja dobiva se radni ($\sigma - \epsilon$) dijagram betonskog uzorka (Slika 16), gdje najveće tlačno naprezanje odgovara tlačnoj čvrstoći uzorka, f_c . Ovaj dijagram prikazuje odnos između naprezanja (σ) i deformacije (ϵ), a najveća vrijednost naprezanja predstavlja maksimalnu tlačnu čvrstoću koju uzorak može izdržati prije nego što dođe do sloma [7].



Slika 16. Radni dijagram ispitivanja uzoraka betona [7]

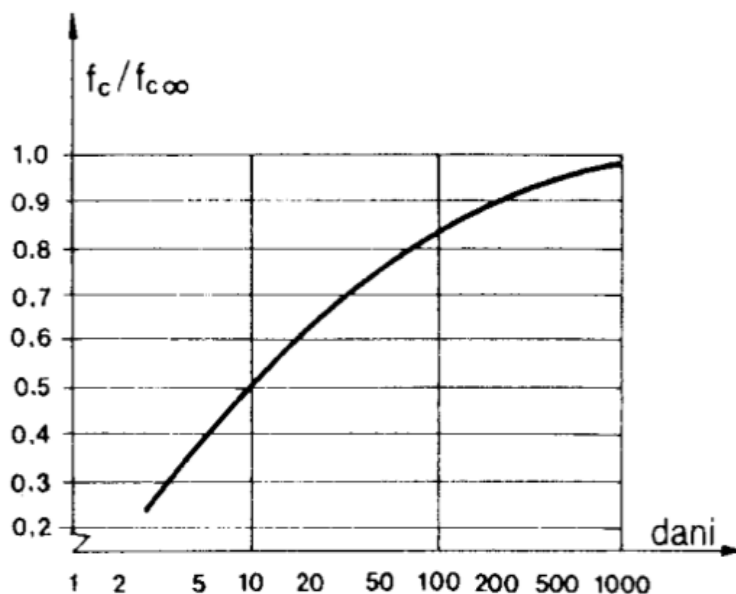
Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće u pravilu slijede lognormalnu (Gaussovu) raspodjelu (Slika 17). Zahtjev je da najmanje 95% svih rezultata pokazuje čvrstoću jednaku ili veću od propisanog razreda betona, dok samo 5% rezultata smije biti ispod čvrstoće definirane klasom betona. Radi pojednostavljenja, najlakše je tijekom ispitivanja izračunati srednju vrijednost tlačne čvrstoće, f_{cm} , za sve postignute uzorke. Približna korelacija između srednje tlačne čvrstoće, f_{cm} , i karakteristične tlačne čvrstoće, f_{ck} , za manji broj uzoraka može se izraziti sljedećom formulom, $f_{cm} = f_{ck} + 8$ (N/mm²) [7].



Slika 17. Gaussova krivulja [7]

Razredi tlačne čvrstoće betona označeni su npr. kao C 20/25, gdje slovo "C" označava razred betona, dok prva brojka (20) predstavlja karakterističnu tlačnu čvrstoću izmjerenu na valjku dimenzija 150/300 mm (f_{ck} , valjak). Druga brojka (25) odnosi se na odgovarajuću tlačnu čvrstoću izmjerenu na kocki s bridom od 150 mm (f_{ck} , kocka) [7].

Budući da beton nastaje očvršćavanjem svježeg betona, njegova tlačna čvrstoća varira ovisno o starosti betona. Kako beton sazrijeva, njegova čvrstoća postepeno raste sve dok ne dosegne svoju maksimalnu vrijednost, $f_{c\infty}$ (Slika 18) [7].



Slika 18. Promjena čvrstoće betona staranjem [7]

Ispitivanja tlačne čvrstoće betona mogu se provoditi na uzorcima različitih starosti (ne nužno nakon 28 dana) i dimenzija. U praksi se često javljaju situacije u kojima se ispitivanje betona provodi, primjerice, nakon 3 ili 7 dana, kako bi se procijenio razred ugrađenog betona, posebno u slučajevima brze gradnje. Ovo je važno kako bi se izbjeglo da građevina bude u potpunosti izvedena prije nego što se potvrdi kvaliteta betona. Također, moguća su i naknadna ispitivanja čvrstoće betona starijih od 28 dana [7].

Koeficijent varijacije (V_c) vrlo je dobar pokazatelj kvalitete betona i njegove ujednačenosti. U analizi betonskih mješavina, koeficijent varijacije može se koristiti za procjenu konzistentnosti betonske mješavine. Na primjer, manji V_c ukazuje na manju varijabilnost u čvrstoći betona, što je poželjno za osiguranje kvalitete [7].

Izražava se kao omjer standardne devijacije (s_n) i srednje vrijednosti svih izmjerenih čvrstoća betona (f_{cm}), prema formuli $V_c = s_n / f_{cm}$. Prema američkim preporukama, kvaliteta betona ovisi o veličini koeficijenta varijacije, Tablica 2 [7].

Tablica 2. Procjena kvalitete betona obzirom na V_c [7]

Veličina varijacije Vc	Kvaliteta betona
<10%	vrlo dobra
10-15%	dobra
15-20%	prihvatljiva
>20%	neprihvatljiva

Usporedba karakterističnih tlačnih čvrstoća određenih na valjku i kocki pokazuje da se čvrstoće betona dobivene iz različitih oblika i dimenzija uzoraka razlikuju. Ove razlike u vrijednostima tlačne čvrstoće mogu utjecati na procjenu kvalitete betona i njegovih svojstava, stoga je važno uzeti u obzir oblik uzorka prilikom interpretacije rezultata ispitivanja [7].

6. MIKROBETON

Mikrobeton je visoko učinkoviti materijal na bazi cementa koji se proizvodi korištenjem mikroagregata i cementa u precizno određenim omjerima. Zbog svojih iznimno visokih performansi, ovaj materijal ima potencijal za primjenu u konstrukcijskim popravcima postojećih građevinskih elemenata. Zbog svojih svojstava, poput visoke čvrstoće i otpornosti na abraziju, mikrobeton omogućuje postizanje trajnih i dugotrajnih rješenja u građevinarstvu. [8]

7. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA

7.1. UPORABA DROBLJENE OPEKE KAO AGREGATA U BETONU

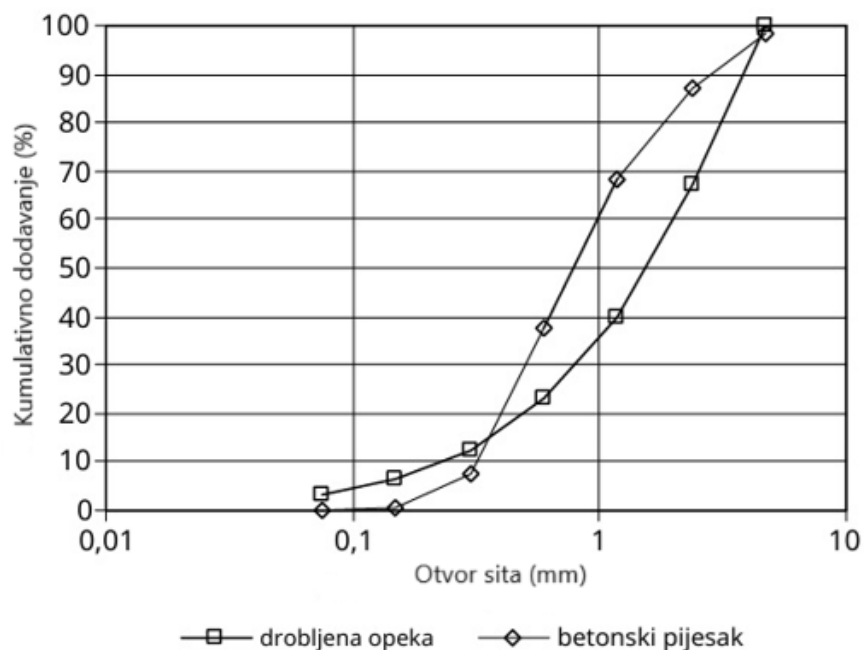
7.1.1. Učinci drobljenog glinenog agregata na trajnost betona

Bektaš i dr., [9] u svom radu istražuju utjecaj reciklirane glinene opeke kao djelomične zamjene za fini agregat u betonu. Agregat su zamijenili drobljenom opekom na razinama od 10% i 20% po težini te višim postocima ovisno o specifičnoj namjeni, kao što je 30% za obradivost, 5%,30%,50%

i 100% za ASR aktivnost. Analizirani su učinci na obradivost, tlačnu čvrstoću, skupljanje, otpornost na smrzavanje i odmrzavanje te alkalno silikatnu reakciju. [9].

Od materijala su koristili Portland cement (ASTM tip I), riječni pijesak, drobljenu glinenu opeku u frakciji koja prolazi kroz sito br. 4 (4,75mm) i vodu iz slavine [9].

Gradacija agregata korištenih u mješavinama prikazana je na Slici 19. Modul finoće riječnog pijeska iznosi 3,01, dok je modul finoće opeke 3,51. U ASR testovima, vapnenački pijesak korišten kao nereaktivna komponenta, zajedno s drobljenom opekom, ocijenjeni su u skladu s ASTM C1 zahtjevima i miješani su u željenim omjerima [9].

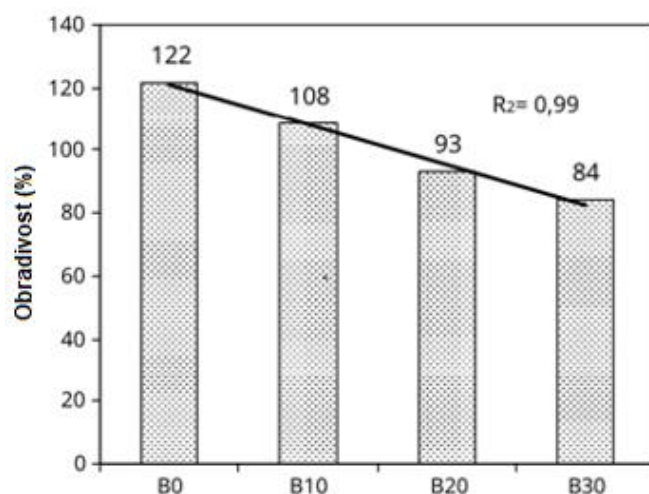


Slika 19. Gradacija agregata [9]

Početne mješavine bile su BO (kontrola), B10 i B20 gdje broj na kraju označava postotak drobljene opeke u mješavini. Svježe mješavine su ugrađene u kalupe kocaka brida 50 mm za ispitivanje tlačne čvrstoće. Uzorci dimenzija 25-25-285mm³ korišteni su za mjerenje skupljanja, otpornosti smrzavanja-odmrzavanja i ASR aktivnosti. Za sve mješavine korišten je fiksni vodocementni omjer 0,50 omjer cementnog agregata bio je 1:2,75 osim za alkalno silikatnu reakciju 1:2,25 [9].

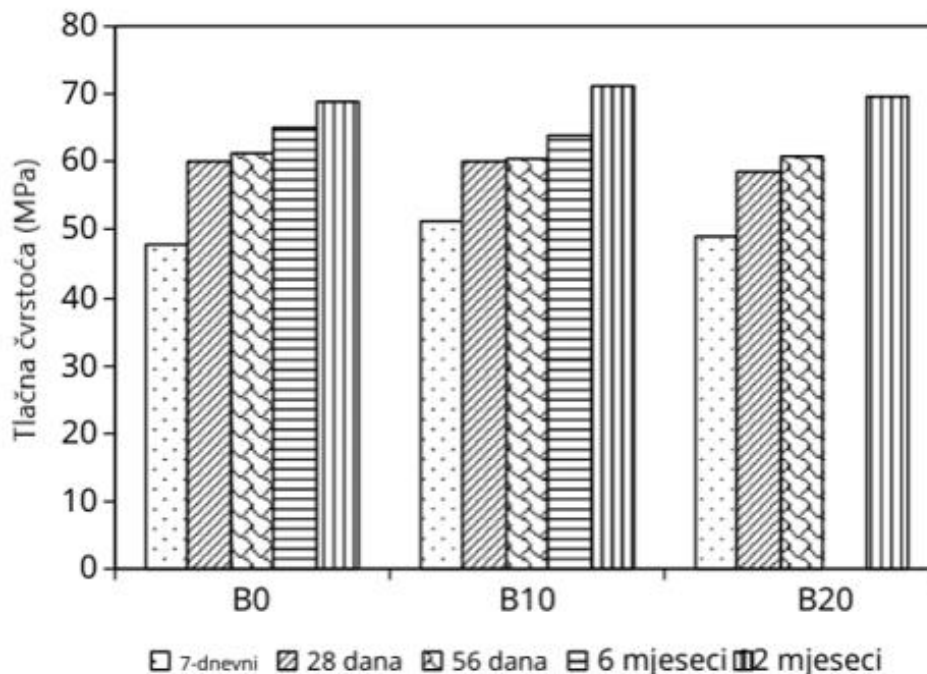
Tijekom testiranja, uzorci su bili pohranjeni u normalnom laboratorijskom okruženju, s temperaturom i relativnom vlažnošću u rasponu od 19 do 25 °C i 35 do 55%. Promjene duljine zbog slobodnog skupljanja zabilježene su do 56 dana. Testiranje alkalno silikatne reakcije (ASR) provedeno je prema ubrzanom testu ASTM C1260. Uzorci su izvađeni iz kalupa nakon 24 sata vlažne njege, a zatim su se dodatno njegovali još 24 sata u vodenoj kupelji na 80 °C. Nakon toga, pohranjeni su u 1N otopini natrijevog hidroksida (NaOH) na 80°C. Vertikalna promjena duljine zabilježena je kao mjera širenja. Uzorci presjeka (25x25mm) izrezani su pomoću pile niske brzine i sušeni na 50°C preko noći. Zatim su impregnirani epoksidom pod vakumom, a površina im je polirana za mikroskopsko ispitivanje koje je provedeno korištenjem skenirajućeg elektronskog mikroskopa s promjenjivim tlakom (SEM) opremljenog energetski disperzivnim rendgenskim spektrometrom za kemijsku analizu [9].

Na slici 20 prikazani su rezultati obradivosti iz koje je vidljivo da opeka kao agregat negativno utječe na obradivost betona [9].



Slika 20. Utjecaj drobljene opeke na obradivost betona [9]

Na slici 21 prikazani su rezultati tlačne čvrstoće dobivene iz kocki betona, iz kojih je vidljivo da kod dodavanja 10% i 20% drobljene opeke nema negativnog učinka na tlačnu čvrstoću [9].



Slika 21. Tlačna čvrstoća kocki betona [9]

Rezultati za skupljanje pokazuju da dodavanje 20% drobljenje opeke smanjuje skupljanje betona, dok dodavanje 10% drobljene opeke povećava slobodno skupljanje u usporedbi s referentnom mješavinom [9].

Što se tiče rezultata na smrzavanje i odmrzavanje zaključuju da je mješavina koja sadrži 20% drobljene opeke (B20) značajno bolja u pogledu otpornosti na smrzavanje i odmrzavanje, s minimalnom ekspanzijom od 0,05% nakon 180 ciklusa, dok je kontrolna mješavina pokazala ekspanziju od 0,53%. Pored toga, veća poroznost drobljene opeke doprinosi smanjenju ekspanzije i može pomoći u sprječavanju raspucavanja tijekom smrzavanja i odmrzavanja. Ovi rezultati ukazuju na potencijal drobljene opeke kao učinkovite komponente za poboljšanje svojstava betonskih mješavina u uvjetima smrzavanja i odmrzavanja [9].

Rezultati testa prema ASTM C1260 pokazuju da dodavanje drobljene opeke u beton uzrokuje značajno povećanje ekspanzije s vrijednostima od 0,30% za 10% zamijene (B10) i 0,35% za 20% zamijene (B20), što ukazuje na štetnu alkalno silikatnu reakciju (ASR). Pukotine na uzorcima

morta dimenzija 25-25-285mm³ upućuju na prisutnost alkalno silikatnog gela koji se širi duž pukotina [9].

7.1.2. Utjecaj recikliranog agregata od gline i sadržaja drobljenih opeka na mehanička svojstva betona

Chang i dr., [10] u svojoj studiji istražuju tlačnu čvrstoću i mikrostrukturnu evoluciju betona s recikliranim agregatom (RAC) koji sadrži grube i fine agregate od glinene opeke. Istraživanje je obuhvatilo RAC i beton s prirodnim agregatom (NAC) s različitim sadržajem drobljenih glinenih opeka.

U svom istraživanju koristili su sljedeće materijale:

- Crvena opeka - dobivena procesom rušenja zgrade, nakon drobljenja i sortiranja, imala je veličine čestica od 4,75-9,5 mm i 0-4,75 mm.
- Reciklirane agregate - agregati dobiveni od otpadnih betonskih potpornih zidnih blokova, koji su nakon drobljenja i sortiranja podijeljeni u tri raspona: 4,75-9 mm, 9,5-19 mm i 0-4,75 mm.
- Osnovni materijali za ispitivanje - za analizu osnovnih svojstava RAC-a korišteni su Portland cement, pijesak, šljunak i drobljeni kamen, što je prikazano u Tablici 6 [10].

Kako bi se utvrdile razlike u apsorpciji vode između prirodnih agregata, recikliranih agregata i drobljene opeke, a što je važno za optimalno miješanje mješavine provedeno je probno miješanje. Nakon provedenog probnog miješanja postignut je omjer miješanja koji zadovoljava zahtjeve dizajna i obradivosti uključivanjem dodatne vode za grube i fine reciklirane agregate [10].

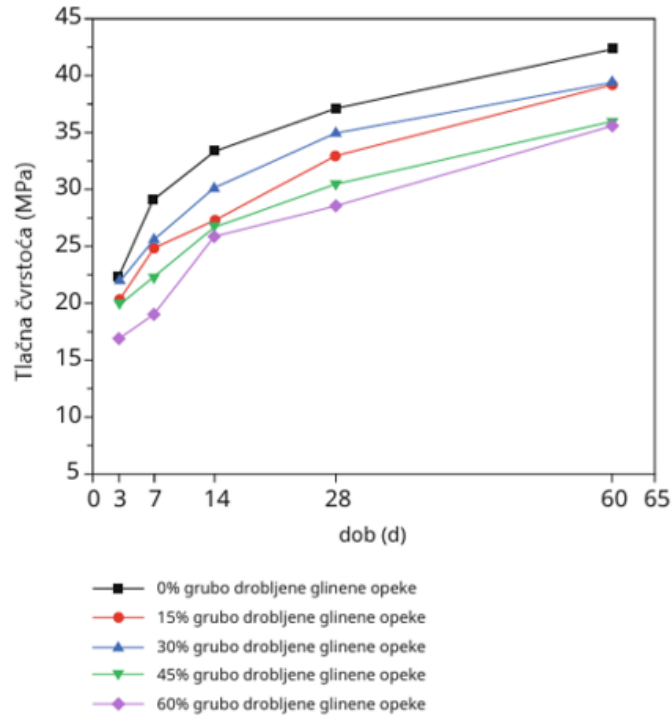
Dodatna voda za agregate od drobljene glinene opeke može se podesiti prema stupnju upijanja vode u Tablici 3 [10].

Tablica 3. Svojstva RAC agregata i opeke od drobljene gline korištene u ispitivanju [10].

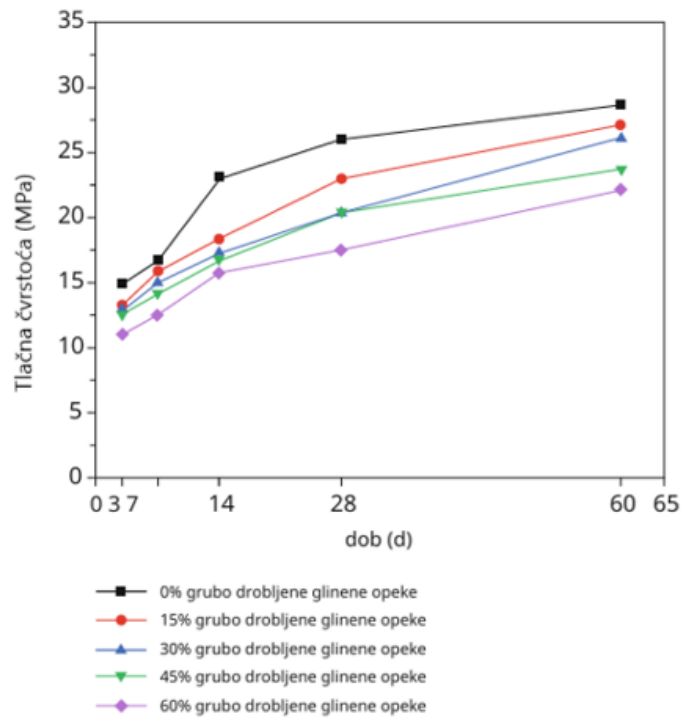
Testni indeksi	RAC AGREGAT			AGREGATI OD DROBLJENE GLINENE OPEKE		
	0-4,75mm	4,75-9,50mm	9,50-19mm	0-4,75mm	4,75-9,50mm	9,50-19mm
Prividna gustoća g/cm ³	2,60	2,65	2,61	2,30	2,43	2,41
Upijanje vode (%)	8,20	4,58	3,43	11.30 sati	11,55	10,72
Ravne i uzdužne čestice (%)	-	7,7	6,8	-	7,6	7,8
Čvrstoća drobljenja (%)	-		23,6	-		29,3
Granica tečenja (%)	27,3		-	27,8		-
Ograničenja plastičnosti (%)	22,2		-	23,4		-
<0,075mm (%)	2,7		-	3,5		-

Izrađeni su uzorci za ispitivanje tlačne čvrstoće u standardnim blokovima dimenzija 150 x 150 x 150 mm, koji su očvršćavali u kontroliranim uvjetima. Ispitivanje tlačne čvrstoće provedeno je prema standardima za mehanička svojstva običnog betona. [10].

Slike 22 i 23 prikazuju odnos tlačne čvrstoće i vremena starenja NAC-a i RAC-a s različitim sadržajem grube drobljene glinene opeke. Rezultati pokazuju da je tlačna čvrstoća RAC-a značajno niža od tlačne čvrstoće NAC-a. Na primjer, nakon 3 dana, tlačna čvrstoća RAC-a s 60% grubih drobljenih glinenih opeka iznosi 11,3 MPa, što je 27,98% niže od tlačne čvrstoće NAC-a. S povećanjem sadržaja grubih drobljenih glinenih opeka, tlačna čvrstoća RAC-a opada, uz usporavanje brzine povećanja čvrstoće tijekom vremena. [10].



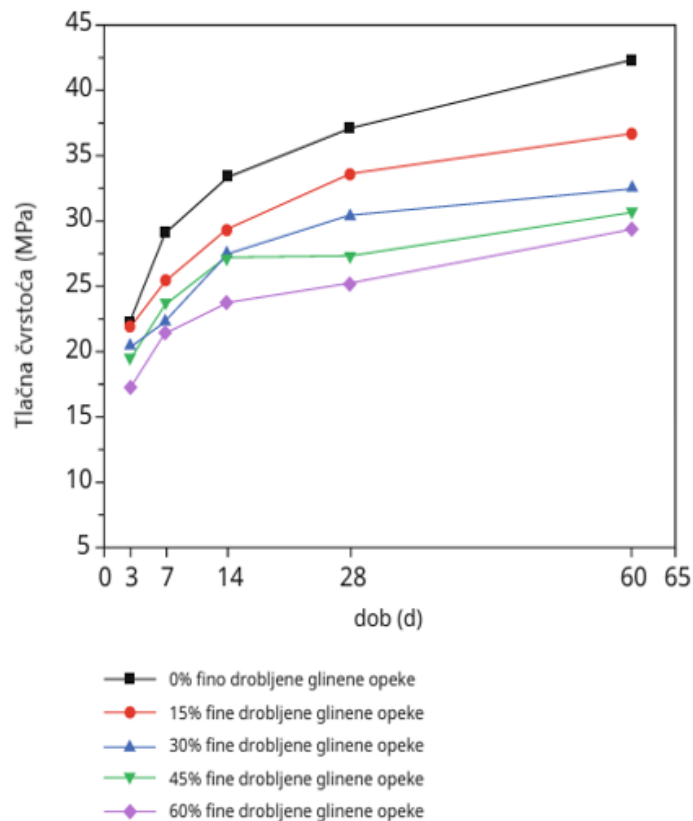
Slika 22. Tlačna čvrstoća NAC-a, grubo drobljena glinena opeka [10]



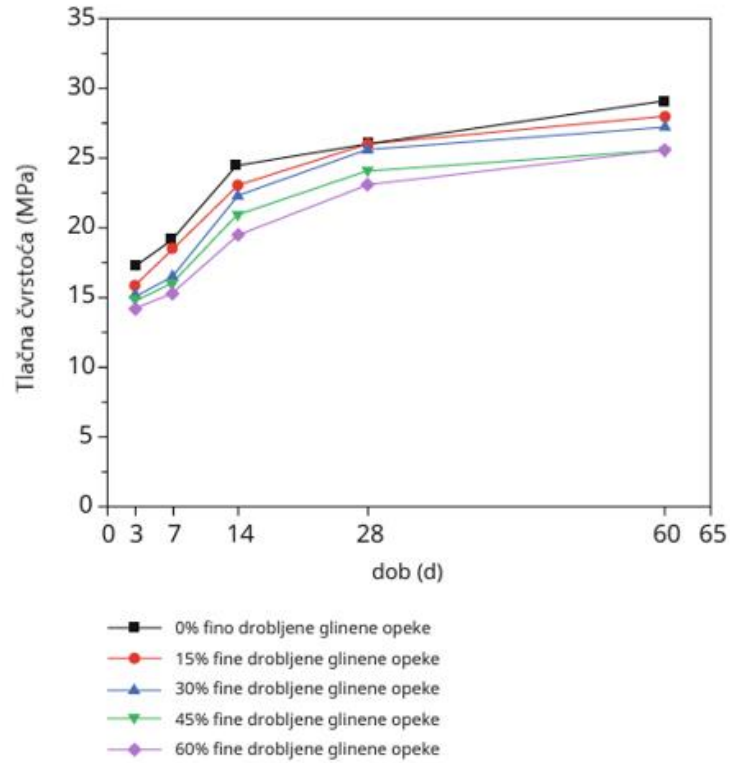
Slika 23. Tlačna čvrstoća RAC-a, grubo drobljena glinena opeka [10]

Slični trendovi uočeni su i za fine drobljene glinene opeke, ali s manjom disperzijom rezultata. U 60 danu, tlačna čvrstoća RAC-a s 60% finih drobljenih glinenih opeka iznosi 25,6 MPa, što je 10,49% niže od tlačne čvrstoće bez finih opeka. U svim fazama starenja, tlačna čvrstoća RAC-a bila je niža od NAC-a, pri čemu beton s različitim raspodjelama veličina čestica pokazuje veću tlačnu čvrstoću nego beton s jedinstvenom raspodjelom (Slika 24, 25) [10].

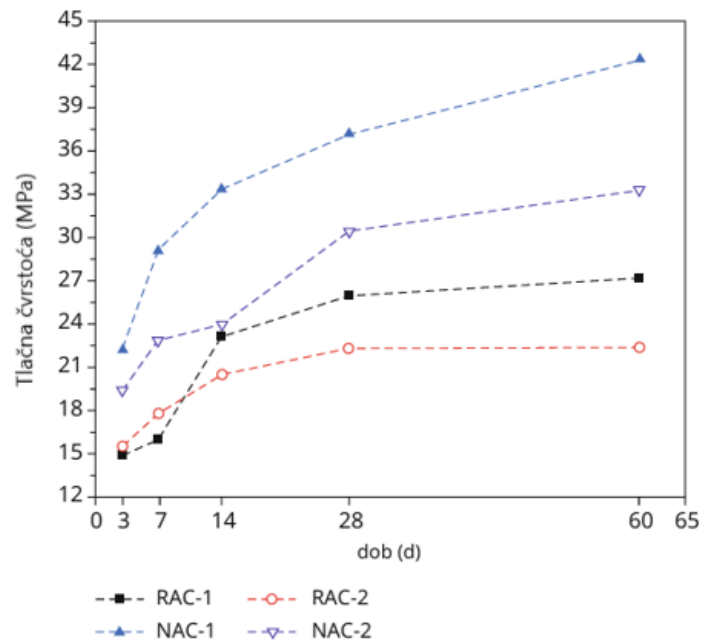
Podaci na slici 26 pokazuju da je tlačna čvrstoća RAC-a značajno niža od tlačne čvrstoće NAC-a u svim fazama starenja. Osim toga, beton s različitim raspodjelama veličina čestica pokazuje veću tlačnu čvrstoću u usporedbi s betonom koji koristi raspodjelu s jednim rasponom veličine čestica. Ova razlika postaje sve izraženija s povećanjem starosti betona, a smanjenja čvrstoće posljedica su velikih pora u većim recikliranim agregatima, kao i nedostatka manjih agregata koji bi mogli popuniti te praznine, što rezultira povećanom poroznošću [10].



Slika 24. Tlačna čvrstoća NAC-a, sitno drobljena glinena opeka [10]



Slika 25. Tlačna čvrstoća RAC-a, sitno drobljena glinena opeka [10]



Slika 26. Tlačna čvrstoća NAC i RAC s različitim ocjenama [10]

U drugom istraživanju, Lina Xu i dr. [11] analiziraju tlačnu i vlačnu čvrstoću betona od recikliranog glinenog agregata (RBC) s različitim stopama zamjene recikliranog glinenog agregata (RBA) [11].

- RBA - odnosi se na reciklirani glineni agregat koji se koristi u betonu, dobiven drobljenjem starih cigli.
- RBC - odnosi se na beton koji sadrži taj reciklirani agregat.

Od materijala su koristili:

- prirodni grubi agregat (NCA) u rasponu čestica od 5-26,5mm,
- kao fini agregat prirodni riječni pijesak s modulom finoće 2,64, nasipne i i prividne gustoće bile su 1,439 i 2,639km/m³
- cement PO 42,5 u skladu s kineskim standardom, specifična površina cementa bila je 354kg/m³, tlačna i savojna čvrstoća bile su 51,2 odnosno 9,53Mpa nakon 28 dana, početno vrijeme očvršćavanja bilo je 208 odnosno 273minute
- glineni agregat za opeku RBA [11].

Omjeri mješavine prikazani su u Tablici 4.

Tablica 4. Omjeri mješavine (kg/m³) [11]

VRSTA BETONA	V/C	RBA STOPE ZAMJENE (%)	VODA	CEMENT	PIJESAK	NCA	RBA
NAC	0,48	0	185	385,4	695	1200	0
	0,58	0	185	319	720	1,176	0
	0,68	0	185	272	738	1,158	0
	0,48	10	185	385,4	695	1,080	105
		20	185	385,4	695	960	210
		30	185	385,4	695	840	315

RBC		40	185	385,4	695	720	420
		50	185	385,4	695	600	525
	0,58	30	185	319	720	823,2	308,7
		50	185	319	720	588	514,5
	0,68	30	185	272	738	810,6	304
		50	185	272	738	579	506,6

Izrađena su tri uzorka dimenzija 150 x 150 x 150 mm po grupi za ispitivanje vlačne i tlačne čvrstoće. Nakon izlijevanja, uzorci su smješteni u klimatiziranu prostoriju na 24 sata, zatim su uklonjeni iz kalupa, zalijevani vodom tijekom 7 dana, te potom sušeni na sobnoj temperaturi do početka ispitivanja [11].

Ispitivanja su proveli prema kineskoj normi GB50081. Rezultati istraživanja pokazuju da su tlačna i vlažna čvrstoća cijepanjem RBC-a bile niže od onih NAC-a, ali utjecaj RBA na vlačnu čvrstoću betona cijepanjem nije bio od značaja. Tlačna čvrstoća betona je pokazala trend opadanja međutim s povećanjem stope zamjene RBA povećanja. S povećanjem v/c učinak stope zamjene RBA na tlačnu čvrstoću postupno se smanjivao.

Kod ispitivanja mikrostrukture, uočeno je da je ettringit u RBC-u bio deblji nego u NAC-u, dok je C–S–H u RBC-u imao oblik aglomeriranih mreža s velikim i uniformnim porama te manjim udjelom punila. Zbog toga je snaga NAC-a bila veća od snage RBC-a [11].

7.1.3. Utjecaj tipa agregata na požarnu otpornost mikrobetona

Netinger, Bjegović i Kesegić [12] u svom radu prikazuju mogućnosti poboljšanja požarne otpornosti betona, odabirom cementa i agregata koji su manje podložni djelovanju visokih temperatura. U okviru istraživanja analiziraju ponašanje mikrobetona s različitim tipovima agregata pri visokim temperaturama. Ispitano je pet skupina uzoraka s agregatima od zgura, drobljene opeke, crijepa i dolomita, pri čemu su opeka i crijep korišteni kao otpadni materijali iz opekarske industrije. Sve mješavine imale su jednaku količinu cementa (450 kg/m³) i

vodocementni omjer ($v/c = 0,5$). Cilj istraživanja bio je usporediti mehanička svojstva mikrobetna nakon izlaganja visokim temperaturama, s naglaskom na otpornost na požar [12].

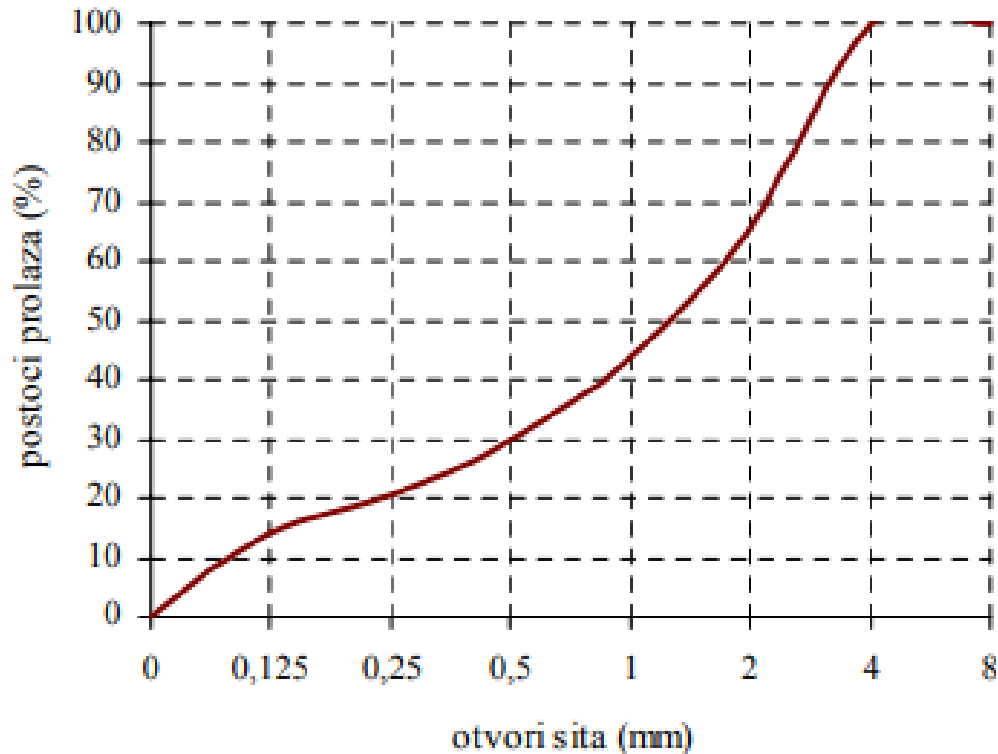
Svojstva svježeg betona definirana su prema podacima iz Tablice 5.

Tablica 5. Svojstva mikrobetona u svježem stanju [12]

Mješavina	Agregat	Gustoća kg/m ³	Sadržaj pora (%)	Konzistencija (cm)	Opažanja
R	riječni	2228	3	16,0	-
ZSI	zgura (Sisak)	2276	6	15,6	-
ZST	zgura (Split)	2820	5	15,5	trošna zrna
O	drobljena opeka	1862	10,5	15,8	-
C	drobljeni crijep	1944	4,4	15	-
D	dolomit	2358	3	16	-

Kao referentna mješavina (R) promatrana je ona s riječnim agregatom, uobičajeno upotrijebljenim pri pripremanju mikrobetona. U mješavinama ZSI i ZST korišteni su agregati od zgure, dok je u mješavini O agregat bio drobljena opeka, a u mješavini C drobljeni crijep. Mješavina D sadržavala je drobljeni dolomit kao agregat. Agregati iz opekarske industrije, poput opeke i crijepa, uzeti su kao otpad izravno iz proizvodnog procesa [12].

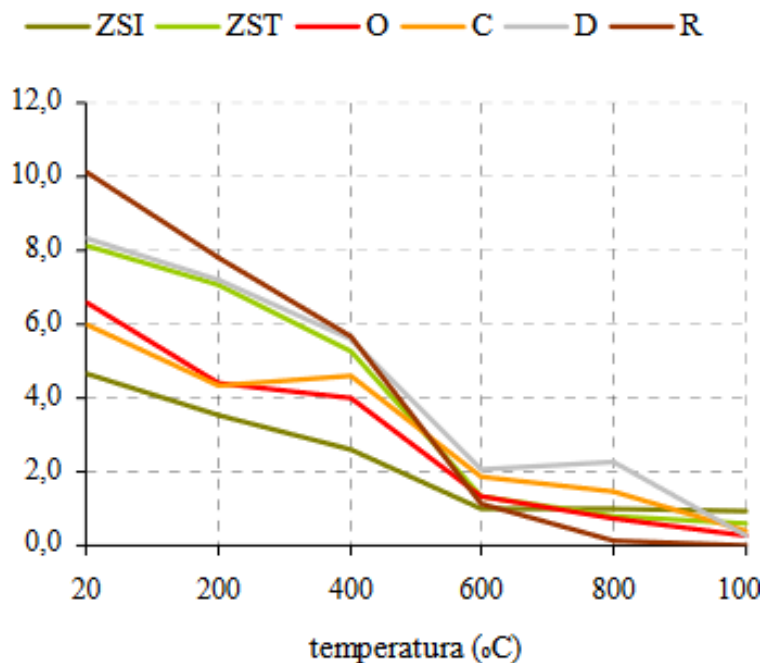
Krivulja prosijavanja ista je za sve agregate, Slika 27.



Slika 27. Krivulja prosijavanja agregata [12]

Uzorci dimenzija 4x4x16 cm, stariji od 28 dana i s vlažnošću između 3 i 5 %, izloženi su visokim temperaturama u peći za ispitivanje Budući da u Hrvatskoj ne postoji peć koja omogućava porast temperature u skladu s krivuljom normiranog razvoja požara prema normi ISO 834, odabran je režim u kojem se isključuje utjecaj bržeg ili sporijeg porasta temperature na mehaničke karakteristike uzoraka. Uzorci su postavljeni u prethodno zagrijanu ispitnu peć na unaprijed određene temperature (200, 400, 600, 800 i 1000 °C). Nakon 1,5 sata na određenoj temperaturi, izvađeni su iz peći i ostavljeni da se hlade na sobnoj temperaturi, a zatim su ispitane njihove tlačne i vlačne čvrstoće [12].

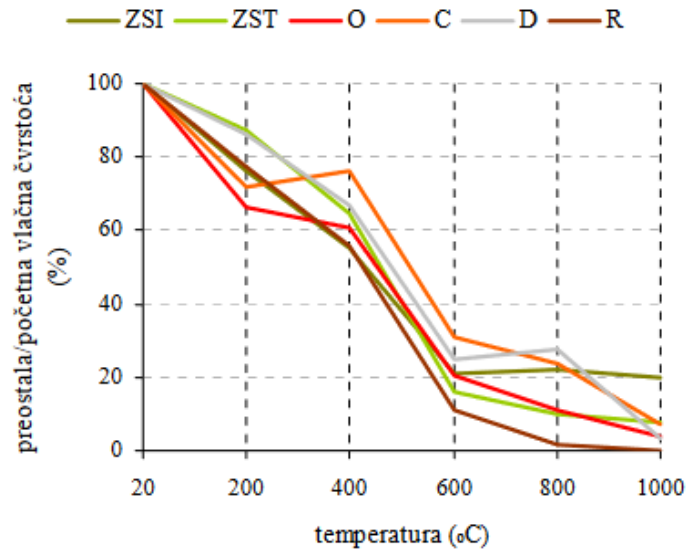
Utjecaj visokih temperatura na vlačnu i tlačnu čvrstoću uzoraka prikazan je u analiziranim podacima, slika 28, 29, 30 i 31. Svaka točka na krivulji temelji se na tri rezultata mjerenja vlačne čvrstoće, dok su za tlačnu čvrstoću korišteni podaci iz šest ispitivanja uzorka [12].



Slika 28. Utjecaj temperature na vlačnu čvrstoću uzoraka s različitim agregatima [12]

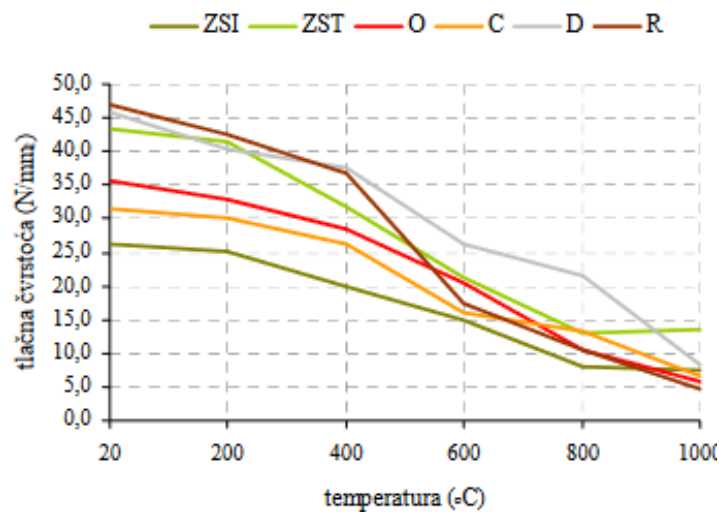
Istraživanje utjecaja različitih agregata na mehanička svojstva mikrobetona pokazuje da zgora iz Siska ima znatno lošije karakteristike pri sobnoj temperaturi u usporedbi s riječnim agregatom. Zgora iz Splita daje slične, ali nešto bolje rezultate. Mješavine s drobljenom opekam i crijepom pokazuju slabija mehanička svojstva nego referentne mješavine, što je očekivano zbog manje tvrdoće zrna [12].

Pri temperaturama do 200 °C, očvršćivanje mikrobetona nije primijećeno, vjerojatno zbog bržeg porasta temperature. Mješavine s opekam i crijepom imaju veći pad vlačne čvrstoće, ali manji pad tlačne čvrstoće do 200 °C. Iznad 400 °C, mješavina s riječnim agregatom pokazuje izraženiji pad mehaničkih svojstava, dok ostali materijali (drobljena opeka, crijep, zgora) pokazuju bolju otpornost na visoke temperature. Ova ispitivanja ukazuju na to da se faze ponašanja betona pri visokim temperaturama razlikuju ovisno o vrsti betona, pri čemu lagani betoni, poput onih opekam i crijepom, imaju manji raspon temperatura za očvršćivanje [12].

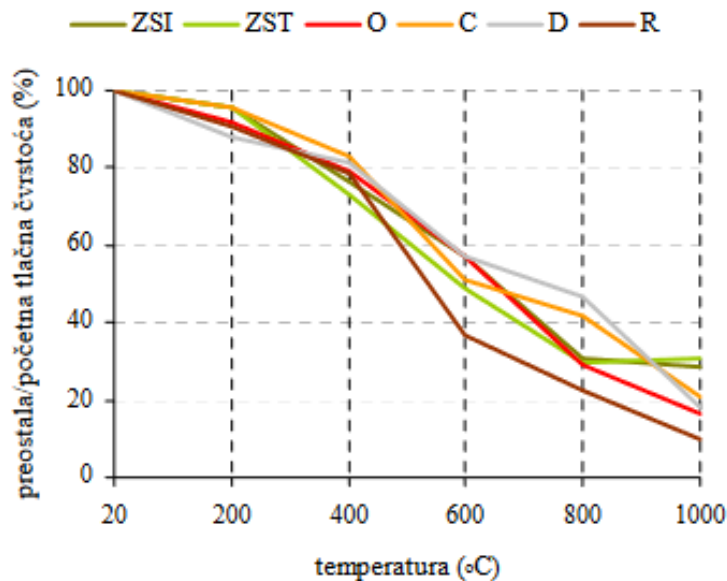


Slika 29. Odnos preostale i početne vlačne čvrstoće uzoraka s različitim agregatima nakon izloženosti visokim temperaturama [12]

Istraživanje pokazuje da korištenje istog cementa u svim mješavinama omogućuje da se rezultati ispitivanja fokusiraju isključivo na utjecaj različitih agregata na ponašanje mikrobetona pri visokim temperaturama. Rezultati upućuju na to da otpadni materijali mogu biti korišteni kao agregati u betonu, čime bi se poboljšala požarna otpornost u usporedbi s konvencionalnim agregatima iz prirodnih izvora [12].



Slika 30. Utjecaj temperature na tlačnu čvrstoću uzoraka sa različitim agregatima [12]



Slika 31. Odnos preostale i početne tlačne čvrstoće uzoraka s različitim agregatima nakon izloženosti visokim temperaturama [12]

Rezultati ispitivanja cementa ukazuju na bolju požarnu otpornost portlandskog cementa s dodacima u usporedbi s aluminatnim cementom, koji se pri porastu temperature ponaša drugačije. Aluminatni cement pokazuje bolju otpornost samo izvan raspona temperatura tipičnog za požare građevinama, što ga čini manje pogodnim za primjenu u betonu radi poboljšanja požarne otpornosti [12].

Također, ispitivanja mikrobetona sa zgurom domaćeg podrijetla i lomom opekarske industrije potvrđuju opravdanost korištenja ovih materijala za poboljšanje požarne otpornosti. Rezultati ukazuju na to da agregati nastali na visokim temperaturama mogu potencijalno poboljšati požarnu otpornost betona, a ova tema će biti predmet daljnjih istraživanja u budućnosti [12].

7.2. UPORABA DROBLJENE OPEKE KAO VEZIVA U BETONU

7.2.1. Svojstva cementnih materijala s recikliranim agregatom i prašinom od otpada opeke

Wu, Xia i dr., [13] su u svom radu proučavali svojstva cementnih materijala s RBA kao agregatom i RBP kao dodatnim cementnim materijalom.

- RBA – reciklirani agregat od opeke
- RBP – reciklirana prašina od opeke

Otpaci su sušeni do konstantne težine i drobljeni u reciklirani agregat od opeke RBA veličine do 5 mm. Dio RBA korišten je za pripremu morta, dok je ostatak mljeven u aktivnu prašinu od opeke RBP veličine do 75 mikrometara, čime se poboljšava pucolanska aktivnost. Analizirana su mikro-svojstva, mehanička čvrstoća i transportna svojstva pripremljenog cementnog morta [13].

Tablica 6 prikazuje svojstva RBA i prirodnog pijeska, pri čemu RBA pokazuje veću poroznost i apsorpciju vode. Izgledna gustoća RBA je otprilike 19,1% niža od gustoće prirodnog pijeska. Kemijska analiza RBP-a pokazuje veće udjele silicijevog i aluminijevog oksida u usporedbi s cementom, dok je udio kalcijevog oksida znatno niži [13].

Tablica 6. Svojstva prirodnog pijeska i agregata od reciklirane opeke RBA [13]

Uzorci	Veličina čestica	Prividna gustoća	Apsorpcija vode
Prirodni pijesak	0,15-2,36mm	2510kg/m ³	0,6%
RBA	0,15-2,36mm	2030kg/m ³	17,0%

Tablica 7. Kemijski sastav RBP, cementa i letećeg pepela [13]

Veziva	Sadržaj glavnog oksida (%)				
	SiO ₂	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
RBP	76.1	1.3	11.8	4.8	1.7
Cement	21.9	58.6	6.1	3.1	2.1
Leteći pepeo	48.3	3.75	28.5	4.7	0.7

Pripremljeni su uzorci morta s različitim postocima zamjene RBA, pri čemu je prirodni pijesak zamijenjen RBA zbog razlike u gustoći.

Izrađeni su uzorci:

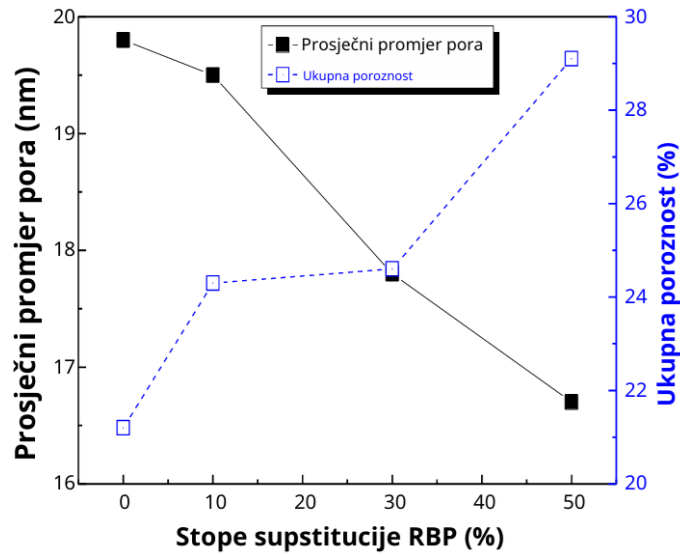
- M-50RBA - 50% prirodnog pijeska zamijenjeno s RBA po volumenu
- M-50RBP - 50% cementa zamijenjeno s RBP po masi
- M-50RBA+50RBP - 50% prirodnog pijeska zamijenjeno s RBA, a 50% cementa zamijenjeno s RBP [13]

Omjer mješavina cementne žbuke s RBA i RBP koje su korištene u istraživanju i na kojima su rađena ispitivanja prikazana su u Tablici 8.

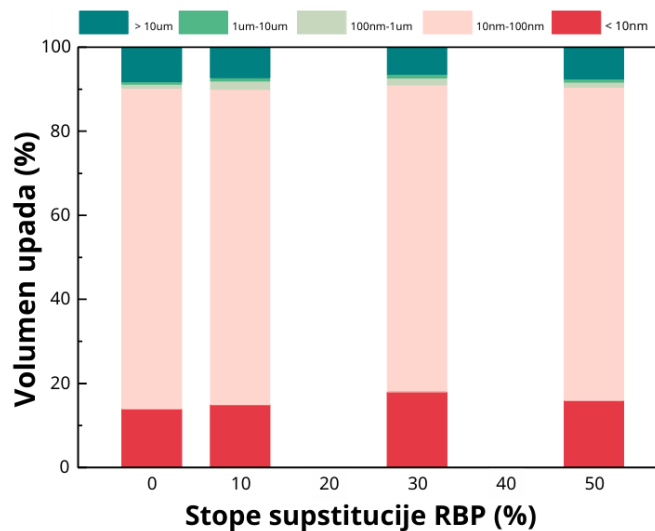
Tablica 8. Omjer mješavina cementne žbuke s RBA i RBP [13]

Uzorci	Voda	Cement	RBP	Pijesak	RBA
M-0RBA	225	450	0	1350	0
M-25RBA	225	450	0	1013	273
M-50RBA	225	450	0	675	546
M-100RBA	225	450	0	0	1092
M-0RBP	225	450	0	1350	0
M-10RBP	225	405	45	1350	0
M-30RBP	225	315	135	1350	0
M-50RBP	225	225	225	1350	0
M-50RBA	225	450	0	675	546
M50RBA+10RBP	225	405	45	675	546
M50RBA+30RBP	225	315	135	675	546
M50RBA+50RBP	225	225	225	675	546

S obzirom na visoku apsorpciju vode RBA, razina zamjene zadržana je na 50%, dok se razine zamjene RBP kreću od 0 do 50%. Dodatna voda dodana je prilikom pripreme morta s RBP-om kako bi se nadoknadilo smanjenje omjera vode i veziva (w/b) i obradivosti. Svi uzorci su očvršćavali 28 dana na temperaturi od 20 ± 2 °C, nakon čega su mjerena mikrosvojstva morta.. Rezultati pokazuju da uključivanje RBP-a povećava broj manje štetnih pora, poboljšavajući strukturu poroznosti i otpornost na prodiranje vode. Značajno, postotak kapilarnih pora (10-100nm) opada, što poboljšava otpornost na upijanje vode (slika 32). MIP test ukazuje na smanjenje prosječnog promjera pora s povećanjem udjela RBP-a, dok se ukupna poroznost povećava zbog smanjenja hidratacijskih proizvoda [13].



Slika 32. Prosječni promjer pora i ukupna poroznost [13]



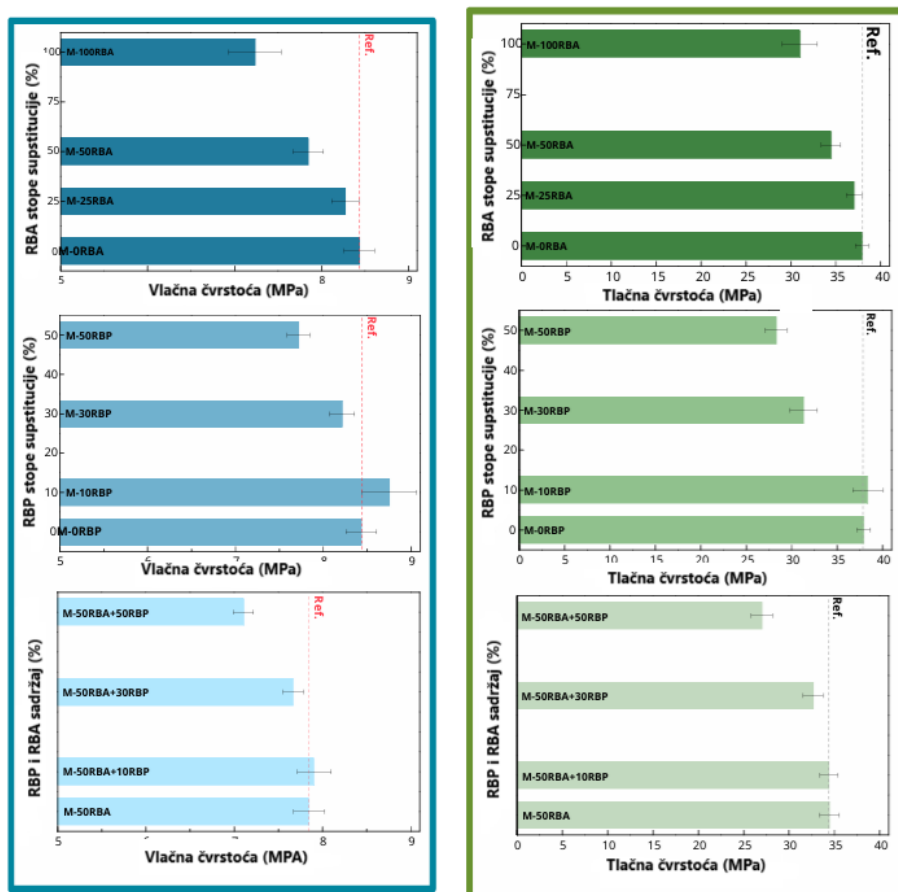
Slika 33. Raspodjela veličina pora [13]

U ranoj fazi izvedbe cementnih materijala s RBA i RBP, zabilježeno je smanjenje fluidnosti s povećanjem stope supstitucije RBP-a. Na temelju rezultata istraživanja, preporučuje se postotak zamjene RBP-a od 30%. Konkretno, mort s 50% RBA i 30% RBP pokazuje manje skupljanje pri sušenju u usporedbi s uobičajenim mortom koji ne sadrži RBA ni RBP. Ova kombinacija

omogućuje povoljnije uvjete za smanjenje štetnih učinaka skupljanja, čime se poboljšava dugoročna stabilnost i trajnost materijala [13].

Mehanička ispitivanja pokazala su da dodavanje RBA smanjuje vlačnu i tlačnu čvrstoću. Iako RBA ima slabija svojstva od prirodnog agregata, sadrži slobodnu vodu koja omogućava unutarnji učinak hidratacije. RBP pri 10% zamjene blago povećava mehaničku čvrstoću, dok veće zamjene RBP-a iznad 30% dovode do opadanja mehaničke čvrstoće. [13].

Zaključili su da uključivanje RBA (recikliranih betonskih agregata) često negativno utječe na svojstva cementnih materijala. Ipak, korištenje RBP (reciklirana prašina od opeke) poboljšava mikrostrukturu, smanjuje skupljanje prilikom sušenja i poboljšava transportna svojstva. Kombinacija RBA i RBP može omogućiti izradu izdržljivih cementnih materijala bez značajnog smanjenja tlačne i vlačne čvrstoće [13].



Slika 34. Vlačna i tlačna čvrstoća cementnog morta s RBP i RBA [13]

7.2.2. Utjecaj fine gline na ponašanje samozbijajućeg betona

Zine Eddine Abib i dr. [14] istražuju kako fina glina utječe na samozbijajući beton. Cilj im je bio analizirati učinak dodavanja finih pečenih glina (drobljene opeke) na reološka i mehanička svojstva betona. U radu se predlaže ispitivanje fizikalno-kemijskih osobina finih minerala i određivanje njihove pucolanske aktivnosti.

Koristili su cement iz Alžira, tri frakcije agregata, drobljenu opeku pečenu na 900 °C, drobljeno vapno i superplastifikator na bazi polinftalenskog sulfonata (PNS). Drobljena opeka kategorizira se kao aluminosilikat zbog značajnog postotka silicija i aluminija. Kemijska analiza WCB-a pokazuje da sadrži značajan postotak silicija i aluminija. Stoga se drobljena opeka kategorizira kao aluminosilikat [14].

Mineralni sastav otpadne drobljene opeke, prikazan je u Tablici 9.

Tablica 9. Mineralni sastav otpadne drobljene opeke [14]

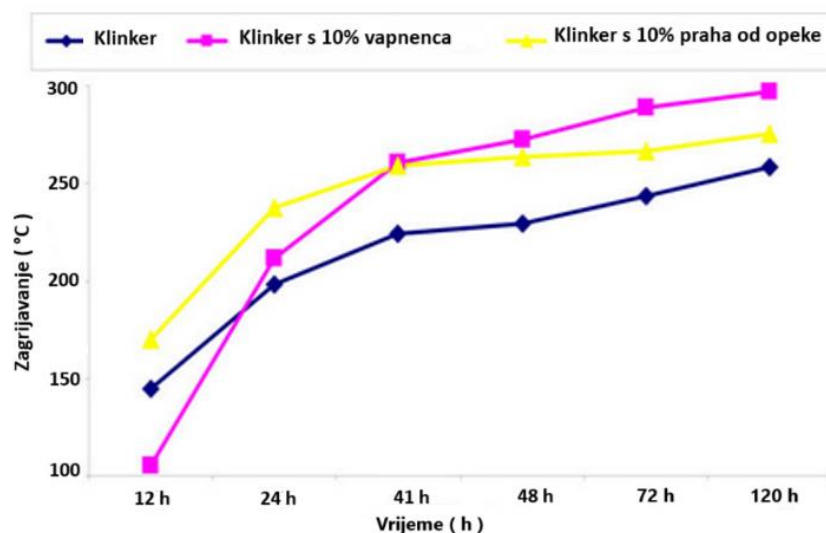
Mineral	Postotak %
Kvarc	44.5
Kalcijev karbonat	17.5
Dolomit	10
Kaolinit	02
Ilit	12
Montmorilonit	7,5
Ostali minerali	6,5

Za potrebe istraživanja opeka je usitnjena na veličinu 0,08mm, prah opeke korišten je kao dodatak u količinama od 5% do 15% težine cementa, u mješavinu je dodan superplastifikator u količini od 2% težine cementa. Ukupan omjer vode i cementa v/c iznosio je 0,4. Mort je lijevan u prizmatične uzorke dimenzija 40 × 40 × 160 mm, a uzorci su održavani pod standardnim uvjetima. Ovi uzorci su pripremljeni s dodatkom otpadne drobljene opeke (WCB) u razinama od 5% do 15% prema težini cementa, uz superplastifikator u količini od 2% težine cementa [14].

Za određivanje optimalnog granulometrijskog sastava agregata, analiziran je utjecaj odnosa pijeska (S) i paste (P) koristeći tri vrste agregata. Utvrđeno je da su uzorci betona s 5% WCB-a pokazali

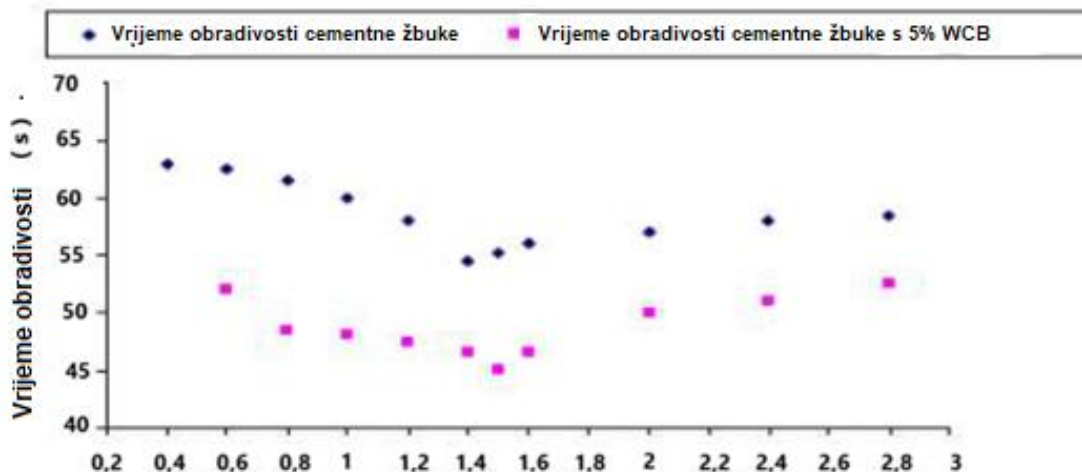
bolja svojstva u pogledu tlačne i vlačne čvrstoće. Indeks pucolanske aktivnosti ovih varijanti iznosi više od 0,9, a varijanta s 5% WCB-a ostvarila je indeks veći od 1 tijekom prvih 28 dana [14].

Kako bi istražili utjecaj otpadne drobljene opeke (WCB) na mehaničko ponašanje samozbijajućeg betona (SCC), provedena su tri eksperimenta. Sva tri eksperimenta uključivala su 5% silikonske prašine (SF) i 5% WCB, dok je treći eksperiment služio kao kontrola, bez dodataka, zadržavajući isti sastav SCC-a i isti omjer vode i veziva (cement + dodatak). Studijom (Slika 35) je utvrđeno da dodatak praha od opeke smanjuje toplinu hidratacije u odnosu na vapnenac. Zabilježen je pad od 7,2% nakon 120 sati, dok je nakon 24 sata toplina hidratacije bila veća u mješavini s prahom od opeke u odnosu na mješavinu s vapnencem, što se može objasniti prisutnošću aluminija [14].



Slika 35. Utjecaj WCB na razvoj topline hidratacije [14]

Vrijeme obradivosti cementne paste se smanjuje s povećanjem udjela superplastifikatora do određene vrijednosti, nakon čega obradivost ostaje konstantna ili se neznatno povećava (Slika 36). Točka presjeka dvaju linearnih dijelova krivulje naziva se točka zasićenja, a označava točku od koje pod eksperimentalnim uvjetima mjerenja, bilo kakvo povećanje proporcije superplastifikatora više ne utječe značajno na reološka svojstva [14].



Slika 36. Vrijeme obradivosti cementne žbuke s 5% WCB-a u odnosu na sadržaj superplastifikatora [14]

Tablica 10. pokazuje da kombinacija 1 (2/3 G 3/8 i 1/3 G 8/15) ima najbolju obradivost. SCC s omjerom S/P od 0,67 pokazuje najbolju stabilnost i otpornost na segregaciju. Rezultati mehaničkih ispitivanja pokazuju da SCC s dodatkom drobljene opeke ima slične čvrstoće kao kontrolni uzorak, dok SCC s dodatkom silicijske prašine pokazuje superiorna svojstva. Navedeno ukazuje na važnost pravilnog odabira kombinacija agregata i omjera za poboljšanje svojstava samozbijajućeg betona.

Tablica 10. Utjecaj sadržaja krupnog agregata i S/P na reološke karakteristike betona [14]

	Serija A			Serija B			Serija C		
	(S/P =0.8)			(S/P =0.75)			(S/P =0.67)		
	A1	A2	A3	B1	B2	B3	C1	C2	C3
Obradivost (mm)	720	700	680	725	715	710	780	775	725
fc7 (MPa)	34	31	27	36	29	38	22	36	37
Omjer segregacije (%)	23	22	24	7,3	7	9,2	2,5	3	3,5

Rezultati mehaničkih ispitivanja, koji se odnose na tlačnu i vlačnu čvrstoću, pokazali su da su vlačna i tlačna čvrstoća SCC-a s dodatkom drobljene opeke približno jednake onima kontrolnog uzorka (bez dodataka). U suprotnosti s tim, SCC s dodatkom silicijske prašine pokazuje superiorna svojstva u odnosu na ostale uzorke SCC-a. Ovi rezultati sugeriraju da silicijska prašina pozitivno utječe na mehaničke karakteristike materijala [14].

7.2.3. Ponovno korištenje otpada od glinene opeke mortu i betonu

Zhu i dr. [15], istražuju recikliranu glinenu opeku kao zamjenski materijal za cement i agregate, s posebnim naglaskom na njen utjecaj na mehanička svojstva morta i betona, strukturu pora i vatrootpornost. [15].

Ključni materijali koje koriste:

- CBP - prah od glinenih opeka – kao dodatak cementu
- RBAC - beton od recikliranih agregata glinene opeke



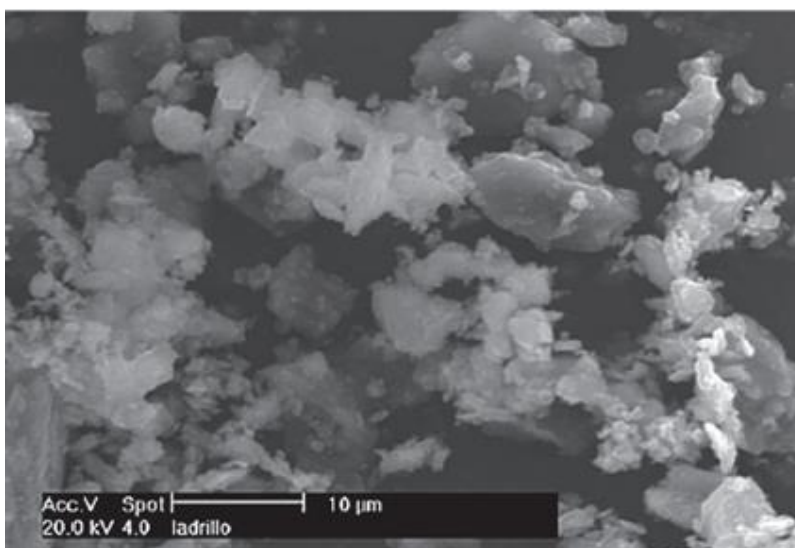
Slika 37. Otpad od glinene opeke, otpad od rušenja [15]



Slika 38. Otpad od glinene opeke, obrada agregata [15]

Otpad od glinenih opeka, koji se koristi u mortu, može se samljeti u sitne čestice i dolazi u dva oblika, kao (CBP) i fini agregati. CBP pokazuje značajnu pucolansku aktivnost, dok se fini agregati koriste kao zamjena za pijesak. Nekoliko studija CBP smatra pucolanskim materijalom zbog transformacije kristalnih struktura glinenih silikata u amorfne spojeve tijekom spaljivanja na temperaturama između 600°C i 1000°C. Pucolanska aktivnost CBP-a može se potvrditi analizom

mikrostrukture (Slika 39) koja prikazuje da zrna CBP - a imaju poluovalni oblik i poluglatku površinu, a sastoji se od morfološki nepravilnih čestica (kvarc i feldspat) komponente potrebne za pucolansku aktivnost [15]. Procjena pucolanske aktivnosti temelji se na indeksu čvrstoće prema ASTM C618, koji zahtijeva da zbroj silicijevih, željeznih i aluminijskih oksida iznosi najmanje 70% za materijale koji se smatraju pucolanima [16]. Mnoge studije su pokazale da oksidi u CBP-u premašuju taj postotak, što dokazuje njegovu visoku pucolansku aktivnost. Ove komponente potiču formiranje hidrat kalcijevog silikata (C-S-H) ili hidrat kalcijevog aluminata (C-A-H), čime pozitivno utječu na karakteristike morta i betona [15].

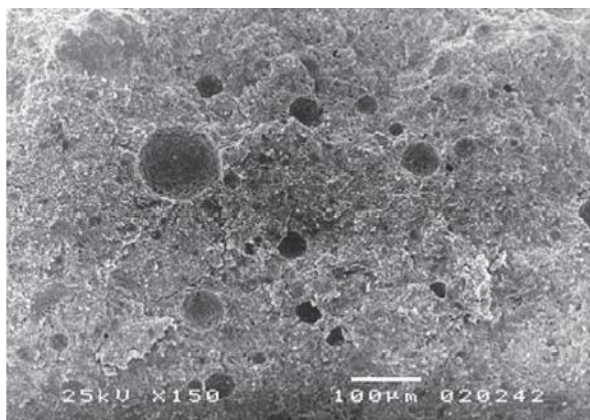


Slika 39. SEM mikrograf praha od opeke [15]

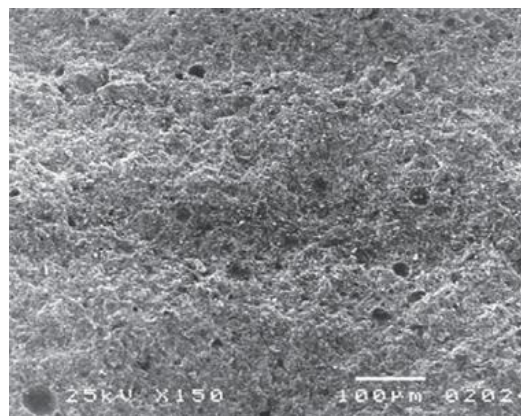
Mehanička svojstva morta s otpadom od glinenih opeka značajno se poboljšavaju dodavanjem CBP-a, koji se pokazuje kao učinkovito punilo. Ovo punilo smanjuje fenomen većeg skupljanja zahvaljujući poboljšanoj finosti pora i razvoju pucolanske aktivnosti. Istraživanja su pokazala da mikrostruktura morta s CBP-om postaje finija tijekom vremena, što smanjuje veličinu i broj pora te rezultira jačom i gušćom stvrdnutom pastom.

U svom istraživanju, Zhu i dr. [15] pozivaju se na rezultate istraživanja Aliabdo i dr. [16], koji su proučavali strukturu pora u mortu. Oni su otkrili da pucolanska reaktivnost i rehidracija cementa poboljšavaju gustoću i strukturu pora u uzorcima morta koji sadrže 25% recikliranog cementnog praška (CBP). Ovi nalazi naglašavaju važnost upotrebe recikliranih materijala u poboljšanju

mehaničkih svojstava cementnih kompozita. Na slikama 40 i 41 je vidljivo kako uzorak koji sadrži s 25% CBP ima najmanji promjer pora i najbolju strukturu pora. Djelomičnom zamjenom cementa CBP-om smanjio se udio makropora, a povećao udio mezopora [16].



Slika 40. Struktura pora 15% CBP paste [15]



Slika 41. Struktura pora 25% CBP paste [15]

Neka prethodna istraživanja pokazala su da korištenje CBP-a kao dodatka cementu poboljšava čvrstoću morta. Pucolanska aktivnost CBP-a doprinosi višim čvrstoćama morta tijekom vremena, a prisutnost CBP-a omogućava daljnje jačanje morta do 90 dana. Finoća čestica CBP-a također utječe na čvrstoću, pri čemu manja veličina čestica rezultira gušćom mikrostrukturom i većom čvrstoćom.

U svom istraživanju, Zhu i dr. [15] također se pozivaju na rezultate istraživanja Ortege i dr. [17], koji su otkrili da je efekt pucolanske aktivnosti izraženiji u mortu s 10% recikliranog cementnog praška (CBP) nego u onom s 20%. Međutim, prekomjerna zamjena CBP-om može negativno utjecati na čvrstoću morta; kada omjer zamjene dostigne 25%, čvrstoća se smanjuje za 25,2%. Iako neka istraživanja ukazuju na smanjenje čvrstoće uz zamjenu CBP-om, druga sugeriraju da dodatak CBP-a može poboljšati svojstva morta [17]. Ponovo se pozivaju na istraživanje Aliabda i dr. [16] koji su u svom istraživanju otkrili da zamjena cementa CBP-om može povećati vatrootpornost morta. U istraživanju fizičkih svojstava recikliranog betona od glinene opeke (RBA), utvrđeno je da je gustoća RBA niža nego kod prirodnih agregata, dok je stopa upijanja vode i indeks drobljenja viši. Čvrstoća RBA značajno utječe na čvrstoću betona [16].

Dizajn mješavina betona s recikliranim agregatima od glinene opeke zahtijeva prilagodbu omjera vode i cementa zbog njihove poroznosti. Preporučuje se prethodno vlaženje agregata za poboljšanje obradivosti. Karakteristike RBAC-a ovise o omjeru vode i cementa, omjeru pijeska i veličini čestica. Optimalna razina zamjene RBA nije konstanta te je 30% prikladno za grube agregate, dok se do 15% može zamijeniti bez smanjenja čvrstoće. Kombinacija CBP-a i RBA može rezultirati boljim svojstvima, dok povećanje čvrstoće betona poboljšava otpornost na koroziju, dok viši w/c omjer može povećati sklonost koroziji. [15].

Zaključak istraživanja je da CBP omogućava djelomičnu zamjenu cementa u mortu, dok RBA može poslužiti za proizvodnju betona (RBAC). Potpuna zamjena prirodnih agregata RBA-ima može smanjiti potrošnju prirodnih resursa i potaknuti ponovnu upotrebu građevinskog otpada, čime se unapređuje primjena RBAC-a u građevinskom inženjerstvu [15].

8. EKSPERIMENTALNI DIO

8.1. SVOJSTVA AGREGATA

Agregat korišten za izradu mortova je bio ili riječni pijesak ili agregat iz drobljene opeke koji je dobiven drobljenjem zidnih opečnih elemenata proizvedenih u tvornici opečnih elemenata u Turčinu, a koji su ocijenjeni kao proizvodi nezadovoljavajuće kvalitete te zbog toga nisu plasirani na tržište već se smatraju otpadom u procesu proizvodnje. Granulometrijska krivulja oba agregata određena je prema HRN EN 933-1:2012 Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata - 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava - Metoda sisanja [18]. Prosijavanje na sitima normirane veličine otvora prikazano je Slikom 42, 43 i 44, a dobivene granulometrijske krivulje Tablicom 11 i 12 i Slikom 46.



Slika 42. Sita za prosijavanje agregata



Slika 43. Sito za prosijavanje agregata 4mm



Slika 44. Ostaci agregata (pijeska) na situ

Tablica 11. Rezultat prosijavanja agregata frakciju 0-4 mm - Pijesak

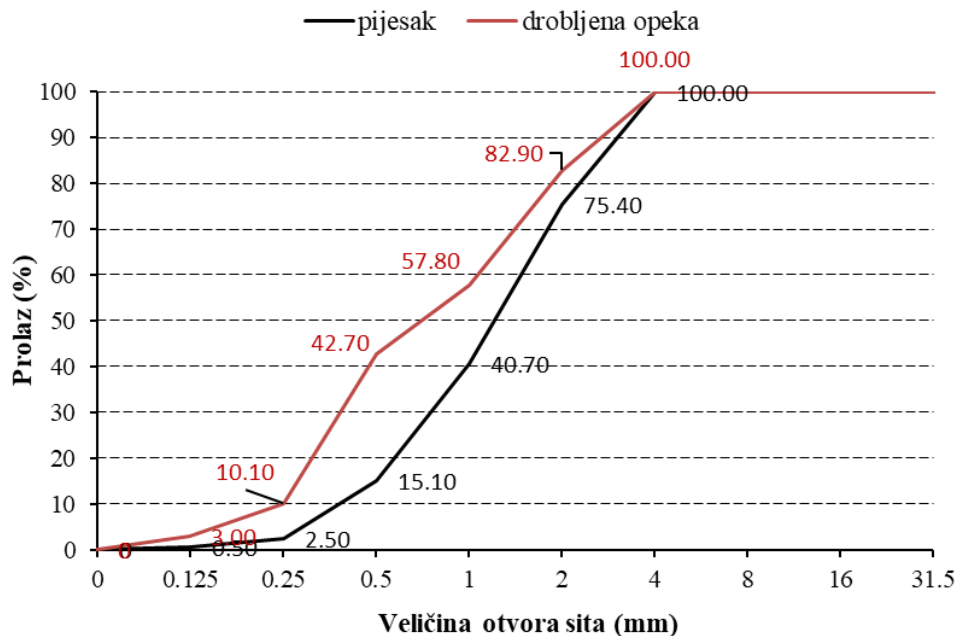
Otvor sita (mm)	Ostatak na situ (g)	Prolaz kroz sito (g)	Prolaz kroz sito, p (%)
31,5		199	100
16		199	100
8	0	199	100
4	0	199	100
2	49	150	75,4
1	69	81	40,7
0,5	51	30	15,1
0,25	25	5	2,5
0,125	4	1	0,5
Dno=0	1	0	0
Suma=M2	199 g		
M1	200 g		

Tablica 12. Rezultati prosijavanja agregata frakciju 0-4 mm – Drobljena opeka

Otvor sita (mm)	Ostatak na situ (g)	Prolaz kroz sito (g)	Prolaz kroz sito, p (%)
31,5		199	100
16		199	100
8	0	199	100
4	0	199	100
2	34	165	82,9
1	50	115	57,8
0,5	30	85	42,7
0,25	65	20	10,1
0,125	14	6	3
Dno=0	6	0	0
Suma=M2	199 g		
M1	200 g		

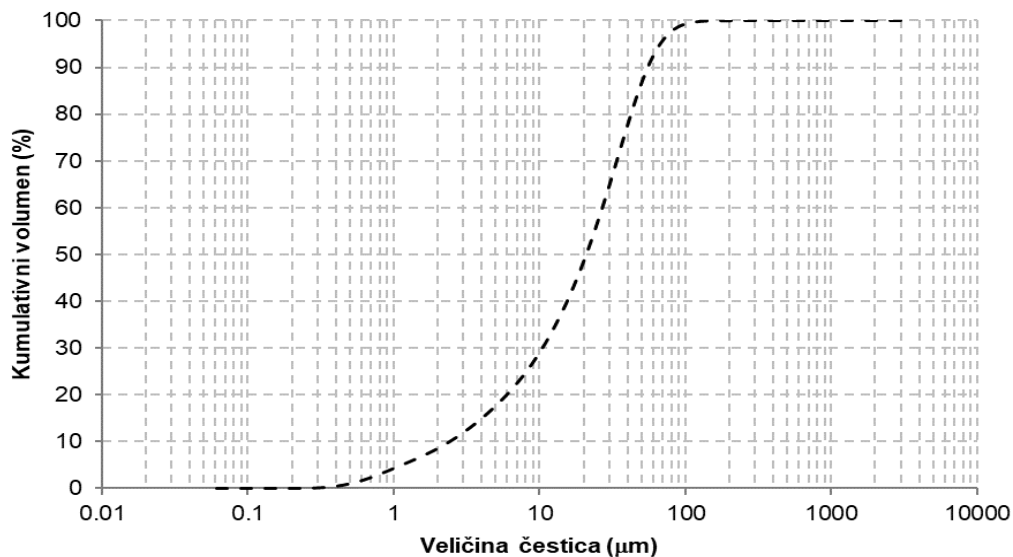


Slika 45. Prosijani agregat (pijesak i drobljena opeka)



Slika 46. Granulometrijska krivulja agregata

Granulometrijska krivulja cementa CEM I 52,5 R određena je prema HRN ISO 13320:2021 Analiza veličine čestica - Metode laserske difrakcije [19] i prikazana Slikom 47.



Slika 48. Granulometrijska krivulja cementa

8.2. IZRADA BETONSKIH UZORAKA

U nastavku su zamiješani mortovi u kojima je varirao volumni udio agregata iz drobljene opeke. Referentna mješavina (P100) napravljena je sa 1350 g pijeska, 450 g cementa i 275 g vode. Ostale mješavine bile su mješavine u kojima je 25% volumena pijeska zamijenjeno sa drobljenom opekom (P75O25), 50% volumena pijeska zamijenjeno sa drobljenom opekom (P50O50), 75% volumena pijeska zamijenjeno sa drobljenom opekom (P75O25) te 100 % volumena pijeska zamijenjeno sa drobljenom opekom (O100).

Mješavine morta zamiješane su u miješalici (Slika 48).



Slika 48. Miješalica za izradu mješavina morta

8.3. ISPITIVANJE MORTOVA

Na mješavinama svježeg morta određene su konzistencije sukladno HRN EN 1015-3:2000/A2:2008 Metode ispitivanja mortova za zide - 3. dio: Određivanje konzistencije svježeg morta (stolićem za potresanje).

Određivanje konzistencije potresnim stolićem [20] prikazano je Slikom 49, a rezultati ispitivanja konzistencije prikazani su Tablicom 13.



Slika 49. Određivanje konzistencije morta na stoliću za potresanje

Tablica 13. Konzistencije mortova

Mort	Konzistencija (cm)
P100	19,5
P75O25	17
P50O50	13
P25O75	10,5
O100	9,5

Kao što je vidljivo iz Tablice 13, sa povećanjem udjela drobljene opeke smanjivala se konzistencija tj. obradljivost morta. Ovo je očekivano obzirom da drobljena opeka ima veće upijanje vode od pijeska pa upije više vode iz mješavine morta čineći je manje obradivom.

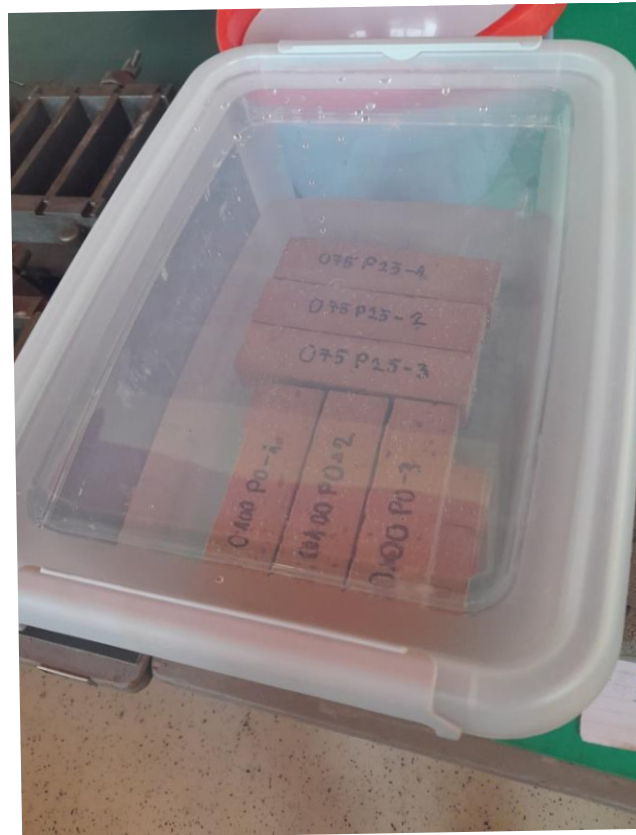
Mješavine morta su ugrađene u trodijelne kalupe (Slika 51). Nakon 24 sata, očvršli uzorci prizmica su izvađeni iz kalupa, označeni i uronjeni u vodu na daljnju njegu (Slika 52).



Slika 50. Priprema kalupa



Slika 51. Mješavine morta ugrađene u kalupe

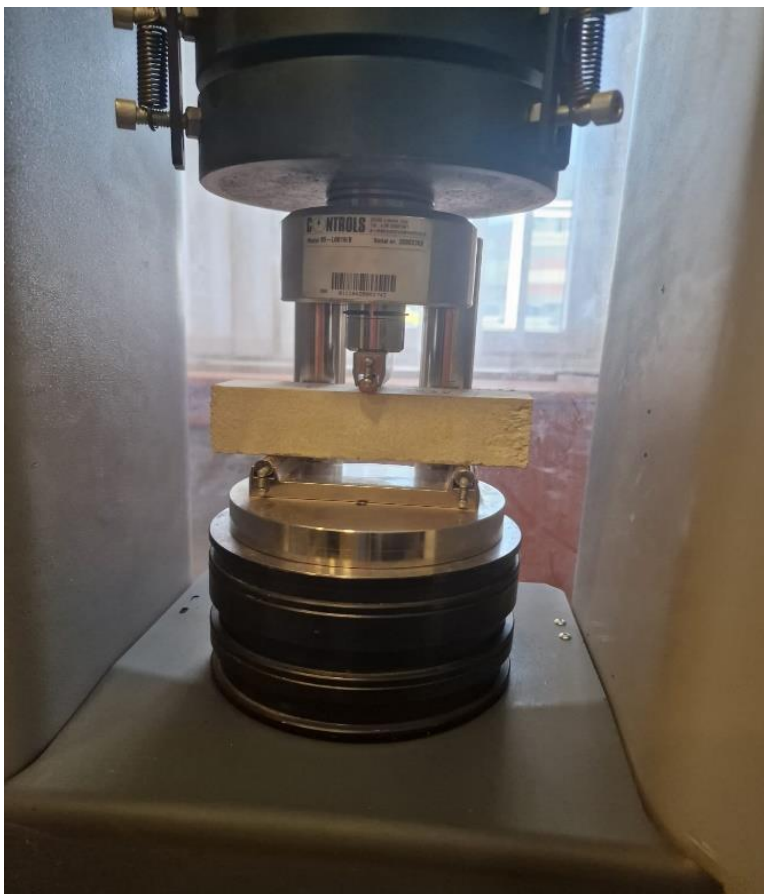


Slika 52. Prizmice morta u vodi

U 28 danu starosti na prizmicama su određene vlačne i tlačne čvrstoće prema HRN EN 1015-11:2019 Metode ispitivanja mortova za zide -- 11. dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće očvrstlog morta [21]. Određivanje vlačne i tlačne čvrstoće prizmica morta prikazano je Slikom 53 i 54, a dobiveni rezultati ispitivanja Tablicom 14 i Slikama 55 i 56.



Slika 53. Ispitivanje tlačne čvrstoće

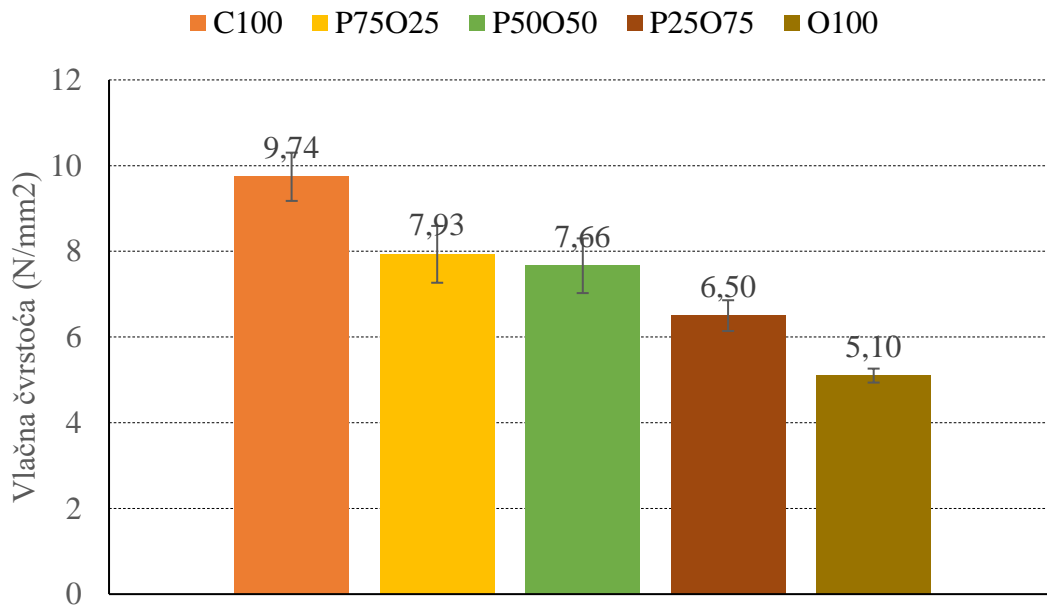


Slika 54. Ispitivanje vlačne čvrstoće

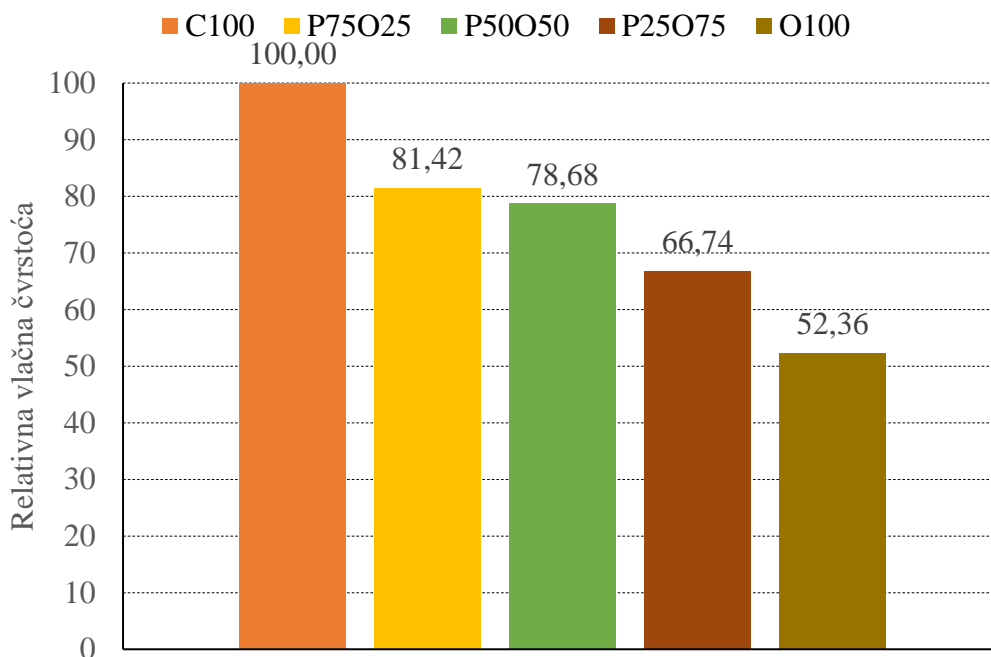
Tablica 14. Rezultati ispitivanja vlačnih i tlačnih čvrstoća mortova

Mort	Vlačna čvrstoća (N/mm ²)			Tlačna čvrstoća (N/mm ²)		
	Pojedinačna vrijednost	Srednja v nrijednost	Standardna devijacija (N/mm ²)	Pojedinačna vrijednost	Srednja vrijednost	Standardna devijacija (N/mm ²)
P100	9.49	9.74		52.53	52.55	
	9.21			51.43		
	10.52			53.69		
P75O25	8.29	7.93		50.13	49.46	
	8.50			47.01		

	7.00			51.25		
P50O50	8.54	7.66		50.27	48.59	
	7.04			48.04		
	7.41			47.46		
P25O75	6.43	6.50		47.77	46.39	
	6.97			45.06		
	6.10			46.35		
O100	5.30	5.10		46.73	45.54	
	4.90			45.59		
	5.10			44.31		

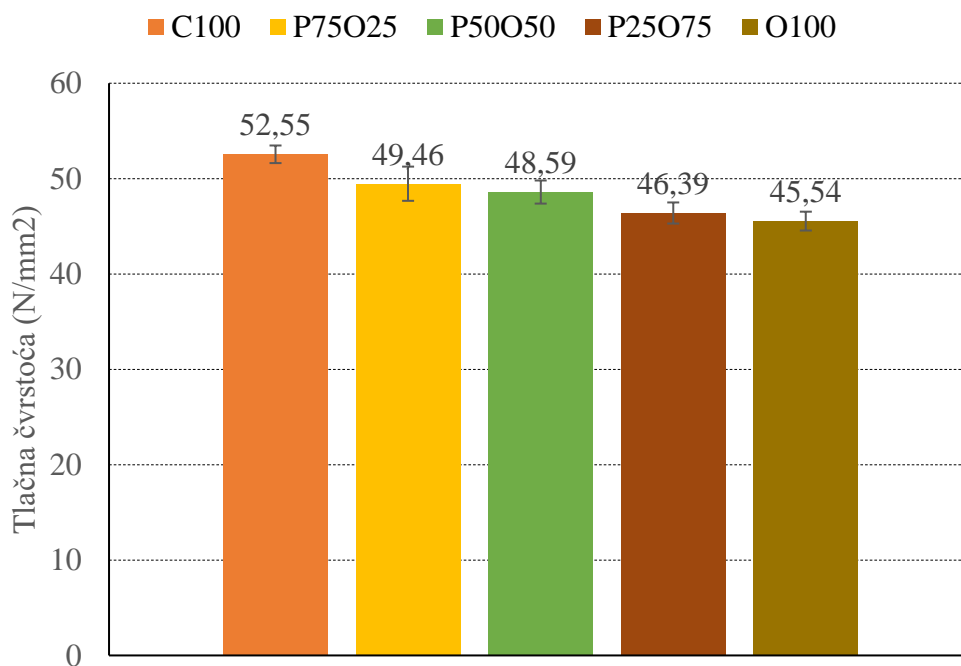


a) apsolutne vrijednosti

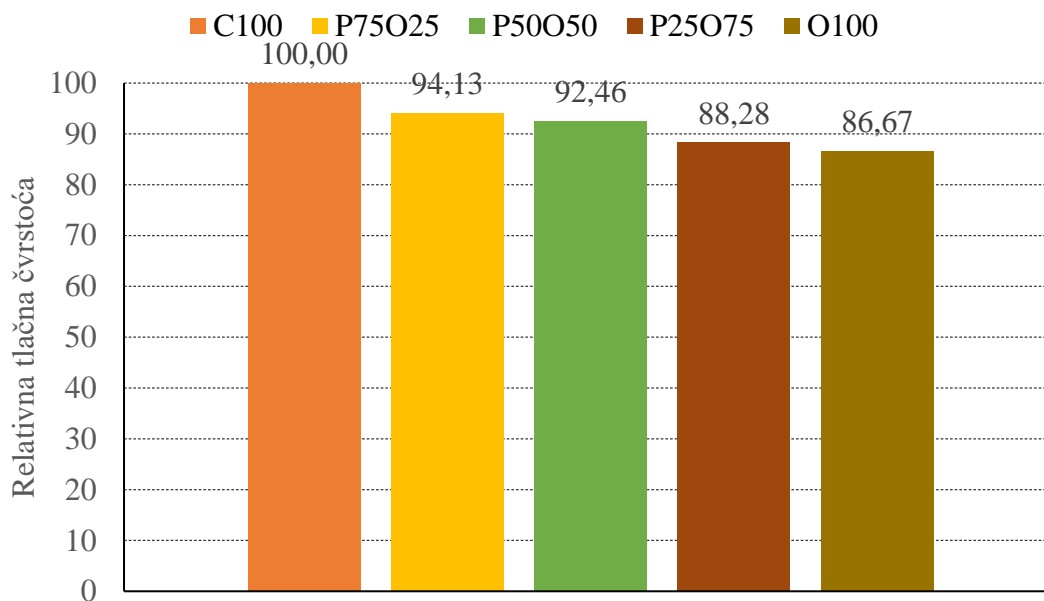


b) relativne vrijednosti

Slika 55. – Rezultati ispitivanja vlačnih čvrstoća mortova



a) apsolutne vrijednosti



b) relativne vrijednosti

Slika 56. Rezultati ispitivanja tlačnih čvrstoća mortova

8.4. ANALIZA REZULTATA

Uvidom u Sliku 55a vidljivo je da mješavina sa pijeskom (referentna mješavina) ima najveću vlačnu čvrstoću (9,74 MPa), te se vlačne čvrstoće mješavina sa dodatkom drobljene opeke smanjuju kako se povećava udio drobljene opeke. Vlačna čvrstoća mješavine spravljene u potpunosti sa drobljenom opekam iznosi 5,10 MPa. Relativno gledajući (Slika 55b), potpuna zamjena pijeska sa opekam rezultira sa 52,36% vlačne čvrstoće mješavine sa pijeskom. Sve standardne devijacije su manje od 10% srednje vrijednosti što znači da su rezultati mjerodavni.

Vlačna čvrstoća mješavine gdje je 25% volumena pijeska zamijenjeno sa drobljenom opekam (oznaka mješavine P75O25) iznosi 7,93Mpa, (Slika 55a). Relativno gledajući mješavina gdje je 25% volumena pijeska zamijenjeno sa drobljenom opekam rezultira sa 81,42% vlačne čvrstoće mješavine, Slika 55b.

Vlačna čvrstoća mješavine gdje je 50% volumena pijeska zamijenjeno sa drobljenom opekom (oznaka mješavine P50O50) iznosi 7,66Mpa (Slika 55a). Relativno gledajući mješavina gdje je 50% volumena pijeska zamijenjeno sa drobljenom opekom rezultira sa 78,68% vlačne čvrstoće mješavine, Slika 55b.

Vlačna čvrstoća mješavine gdje je 75% volumena pijeska zamijenjeno sa drobljenom opekom (oznaka mješavine P25O75) iznosi 6,50Mpa, (Slika 55a). Relativno gledajući mješavina gdje je 75% volumena pijeska zamijenjeno sa drobljenom opekom rezultira sa 66,74% vlačne čvrstoće mješavine, (Slika 55b).

Sve standardne devijacije su manje od 10% srednje vrijednosti što znači da su rezultati mjerodavni.

Uvidom u Sliku 56a vidljivo je da mješavina sa pijeskom (referentna mješavina) ima najveću tlačnu čvrstoću (52,55 MPa), te se tlačne čvrstoće mješavina sa dodatkom drobljene opeke smanjuju kako se povećava udio drobljene opeke. Tlačna čvrstoća mješavine spravljene u potpunosti sa drobljenom opekom iznosi 45,54 MPa. Ipak, svi su mortovi ostvarili tlačnu čvrstoću veću od 5 MPa što se zahtjeva za mortove za zidanje u seizmički aktivnim područjima prema HRN EN 1998-1:2011 [22]. Relativno gledajući (Slika 56b), potpuna zamjena pijeska sa opekom rezultira sa 86,67% tlačne čvrstoće mješavine sa pijeskom. Sve standardne devijacije su manje od 10% srednje vrijednosti što znači da su rezultati mjerodavni.

Mješavina gdje je 25% volumena pijeska zamijenjeno drobljenom opekom (oznaka mješavine P75O25) ima tlačnu čvrstoću 49,46 Mpa, (Slika 56a). Relativno gledajući (Slika 56b) zamjena volumena pijeska sa 25% volumena pijeska sa drobljenom opekom rezultira sa 94,13% tlačne čvrstoće mješavine.

Mješavina gdje je 50% volumena pijeska zamijenjeno drobljenom opekom (oznaka mješavine P50O50) ima tlačnu čvrstoću 48,59 Mpa, (Slika 56a). Relativno gledajući (Slika 56b) zamjena volumena pijeska sa 50% volumena pijeska sa drobljenom opekom rezultira sa 92,46% tlačne čvrstoće mješavine.

Mješavina gdje je 75% volumena pijeska zamijenjeno drobljenom opekom (oznaka mješavine P25O75) ima tlačnu čvrstoću 46,39 Mpa, (Slika 56a). Relativno gledajući (Slika 56b) zamjena volumena pijeska sa 75% volumena pijeska sa drobljenom opekom rezultira sa 88,28% tlačne čvrstoće mješavine.

S povećanjem udjela drobljene opeke, također su zabilježeni padovi u vlačnoj i tlačnoj čvrstoći morta, što se može pripisati smanjenju dostupnosti vode za hidrataciju cementa.

Zamjena pijeska sa drobljenom opekom lošije se odrazila na vlačnu čvrstoću nego na tlačnu čvrstoću mortova.



Slika 57. Poprečni presjeci uzoraka

Slika 57 prikazuje uzorke mortova s različitim udjelima drobljene opeke od 0 do 100% gdje se jasno vidi promjena u boji morta s povećanjem udjela opeke. Uzorci s većim udjelom drobljene opeke pokazuju intenzivniju narančastu nijansu, dok su uzorci s manjim udjelom opeke svjetliji slični boji pijeska. Promjena boje i teksture morta može imati značajan utjecaj na estetske i funkcionalne aspekte u građevinskoj primjeni. Zbog toga se ovim radom obuhvaćaju laboratorijska ispitivanja i analiza rezultata kako bi se pronašao optimalan omjer zamjene za održivu i estetski prihvatljivu izgradnju.

9. ZAKLJUČAK

U radu se istražuje utjecaj zamjene pijeska kao standardnog agregata sa drobljenom opekom na konzistenciju morta te njegovu vlačnu i tlačnu čvrstoću. Zamiješani su mortovi u kojima je varirao volumni udio agregata iz drobljene opeke od 0 do 100% s inkrementom od 25%. Sa povećanjem udjela drobljene opeke smanjivala se konzistencija tj. obradljivost morta što je očekivano obzirom da drobljena opeka ima veće upijanje vode od pijeska pa upije više vode iz mješavine morta čineći je manje obradivom. Sa povećanjem udjela drobljene opeke smanjivale su se vlačne i tlačne čvrstoće morta vjerojatno jer je drobljena opeka upijala više vode od pijeska pa je manje vode u mortu ostalo za hidrataciju i postizanje konačne čvrstoće. Ipak, mortovi čak i sa 100% drobljene opeke kao agregatom su dostatne čvrstoće za zidanje građevina u seizmički aktivnim područjima.

Zaključno, drobljena opeka pokazuje potencijal kao zamjena za pijesak u izradi mortova, posebno u situacijama gdje je važno smanjenje upotrebe prirodnih resursa, uz istovremeno zadržavanje funkcionalnih svojstava građevinskih materijala. Međutim, potrebno je dodatno istražiti optimalne mješavine koje bi mogle poboljšati obradivost i mehaničke karakteristike mortova kako bi se postigli još bolji rezultati.

Reference

- [1] Razvoj betona kroz povijest, <https://naukaitehnologija.iu-travnik.com/article/258/pdf> (26.08.2024.)
- [2] Panteon u Rimu, https://hr.wikipedia.org/wiki/Panteon_u_Rimu (26.08.2024.)
- [3] Pont du Gard, https://sh.wikipedia.org/wiki/Pont_du_Gard (26.08.2024.)
- [4] Vladimir Juranović, red.prof.dr tehn., građ. Inž., Beton i armirani beton, Prvi dio, Komponente i teorija betona, Treće prerađeno i dopunjeno izdanje, Tehnička knjižara Zagreb 1970.
- [5] Ivan Tomičić, Betonske konstrukcije, izdanje 3., Izmijenjeno i dopunjeno izdanje, Društvo hrvatskih građevinskih konstruktora, Zagreb 1996.
- [6] Armatura, armirački radovi i armirački pogon, https://www.grad.unizg.hr/download/repository/5_predavanje_19_20.pdf (26.08.2024.)
- [7] Udžbenik za studij arhitekture iz predmeta Nosive konstrukcije II, Betonske konstrukcije, Josip Galić, https://www.arhitekt.hr/files/radovi/privitak/428/GalicJ_Betonske%20konstrukcije.pdf, (26.08.2024.)
- [8] Učinak recikliranog stakla kao agregata na svojstva mikrobetona, Doc. dr.sc. Serkan Etlı dipl.ing.građ, dostupno online 10.02.2023., <https://hrcak.srce.hr/file/426325> (28.08.2024.)
- [9] F. Bektaš, K. Wang, H. Ceylan, *Effects of crushed clay brick aggregate on mortar durability*, Construction and Building Materials 23 (2009) 1909–1914, Civil, Construction and Environmental Engineering, Iowa State University, Ames, IA 50011, United States, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2008.09.006>
- [10] Jin Chang ,Shi-lin Luo, Airken Ailifeila, Lin-lin Chong i Jian-qing Jiang, *Effects of Coarse and Fine Crushed Clay Brick Content on the Compressive Strength of Recycled Aggregate Concrete and the Microscopic Mechanism*, Hindawi Geofluids Volume 2022, Article ID 1341185, <https://doi.org/10.1155/2022/1341185>
- [11] Lina Xu, Wei Su, Tian Su, *Influence of recycled clay brick aggregate on the mechanical properties of concrete*, De Gruyter, Reviews on Advanced Materials Science 2022; 61: 372–380, <https://doi.org/10.1515/rams-2022-0034>
- [12] Upotreba reciklirane opeke kao agregata za beton, Kesegić, Bjegović, Netinger, <https://hrcak.srce.hr/file/56136> (01.09.2024.)

- [13] Huixia Wu, Jianzhuang Xiao, Chaofeng Liang, Zhiming Ma, *Properties of Cementitious Materials with Recycled Aggregate and Powder Both from Clay Brick Waste*, Buildings 2021, 11, 119., <https://doi.org/10.3390/buildings11030119>
- [14] Zine Eddine Abib, Haifa Gaher-Abib, Fattoum Kharchi, *Effect of Clay Fines on the Behavior of Self-Compacting Concrete*, DOI: 10.4236/eng.2013.52031
<https://www.scirp.org/journal/paperinformation?paperid=27821> (20.09.2024.)
- [15] Lihua Zhu i Zengmei Zhu, *Reuse of Clay Brick Waste in Mortar and Concrete*, State Key Laboratory of Green Building in Western China, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China 2School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China, Hindawi, *Advances in Materials Science and Engineering* Volume 2020, Article ID 6326178, <https://doi.org/10.1155/2020/6326178>
- [16] Aliabdo A. A., Abd-Elmoaty A.-E. M., and Hassan H. H., *Utilization of crushed clay brick in concrete industry*, Alexandria Engineering Journal. (2014) 53, no. 1, 151–168, <https://doi.org/10.1016/j.aej.2013.12.003>
- [17] Ortega J. M., Letelier V., Solas C., Moriconi G., Climent M. Á., and Sánchez I., *Long-term effects of waste brick powder addition in the microstructure and service properties of mortars*, Construction and Building Materials. (2018) 182, 691–702, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.06.161>
- [18] HRN EN 933-1:2012 Ispitivanje geometrijskih svojstava agregata -- 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava -- Metoda sisanja
- [19] HRN ISO 13320:2021 Analiza veličine čestica -- Metode laserske difrakcije
- [20] HRN EN 1015-3:2000/A2:2008 Metode ispitivanja mortova za zide -- 3. dio: Određivanje konzistencije svježeg morta (stolićem za potresanje): Određivanje konzistencije potresnim stolićem
- [21] HRN EN 1015-11:2019 Metode ispitivanja mortova za zide -- 11. dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće očvrslog morta
- [22] HRN EN 1998-1:2011 Eurokod 8: Projektiranje potresne otpornosti konstrukcija -- 1. dio: Opća pravila, potresna djelovanja i pravila za zgrade

Popis slika

- Slika 1. Kupola Panteona u Rimu, https://hr.wikipedia.org/wiki/Panteon_u_Rimu [2]
- Slika 2. Most Pont du Gard, https://sh.wikipedia.org/wiki/Pont_du_Gard [2]
- Slika 3. Lambotov čamac [6]
- Slika 4. Betonski stropovi Wilkinsona [6]
- Slika 5. Izgled betonskih lonaca Moniera [6]
- Slika 6. Prva armirano-betonska zgrada [7]
- Slika 7. Lijevanje i ravnanje svježeg betona te izgled stvrdnutog betona konstrukcije [7]
- Slika 8. Uloga sitnog pijeska u agregatu [4]
- Slika 9. Laki beton [7]
- Slika 10. Obični beton [7]
- Slika 11. Teški beton [7]
- Slika 12. Ispitivanje vlačne čvrstoće (čisti vlak) [7]
- Slika 13. Ispitivanje vlačne čvrstoće (cijepanjem valjka) [7]
- Slika 14. Ispitivanje vlačne čvrstoće (savijanje prizmice) [7]
- Slika 15. Izgled kalupa za pripremu uzoraka kocka i valjak [7]
- Slika 16. Radni dijagram ispitivanja uzoraka betona [7]
- Slika 17. Gaussova krivulja [7]
- Slika 18. Promjena čvrstoće betona staranjem [7]
- Slika 19. Gradacija agregata [9]
- Slika 20. Utjecaj drobljene opeke na obradivost betona [9]
- Slika 21. Tlačna čvrstoća kocki betona [9]
- Slika 22. Tlačna čvrstoća NAC-a, grubo drobljena glinena opeka [10]
- Slika 23. Tlačna čvrstoća RAC-a, grubo drobljena glinena opeka [10]
- Slika 24. Tlačna čvrstoća NAC-a, sitno drobljena glinena opeka [10]
- Slika 25. Tlačna čvrstoća RAC-a, sitno drobljena glinena opeka [10]
- Slika 26. Tlačna čvrstoća NAC i RAC s različitim ocjenama [10]
- Slika 27. Krivulja prosijavanja agregata [12]
- Slika 28. Utjecaj temperature na vlačnu čvrstoću uzoraka s različitim agregatima [12]
- Slika 29. Odnos preostale i početne vlačne čvrstoće uzoraka s različitim agregatima nakon izloženosti visokim temperaturama [12]

Slika 30. Utjecaj temperature na tlačnu čvrstoću uzoraka sa različitim agregatima [12]

Slika 31. Odnos preostale i početne tlačne čvrstoće uzoraka s različitim agregatima nakon izloženosti visokim temperaturama [12]

Slika 32. Prosječni promjer pora i ukupna poroznost [13]

Slika 33. Raspodjela veličina pora [13]

Slika 34. Vlačna i tlačna čvrstoća cementog morta s RBP i RBA [13]

Slika 35. Utjecaj WCB na razvoj topline hidratacije [14]

Slika 36. Vrijeme obradivosti cementne žbuke s 5% WCB-a u odnosu na sadržaj superplastifikatora [14]

Slika 37. Otpad od glinene opeke, otpad od rušenja [15]

Slika 38. Otpad od glinene opeke, obrada agregata [15]

Slika 39. SEM mikrograf praha od opeke [15]

Slika 40. Struktura pora 15% CBP paste [15]

Slika 41. Struktura pora 25% CBP paste [15]

Slika 42. Sita za prosijavanje agregata (vlastiti izvor)

Slika 43. Sito za prosijavanje agregata 4mm (vlastiti izvor)

Slika 44. Ostaci agregata (pijeska) na situ (vlastiti izvor)

Slika 45. Prosijani agregat (pijesak i drobljena opeka) (vlastiti izvor)

Slika 46. Granulometrijska krivulja agregata (vlastiti izvor)

Slika 47. Granulometrijska krivulja cementa (vlastiti izvor)

Slika 48. Miješalica za izradu mješavina morta (vlastiti izvor)

Slika 49. Određivanje konzistencije morta na stoliću za potresanje (vlastiti izvor)

Slika 50. Priprema kalupa (vlastiti izvor)

Slika 51. Mješavine morta ugrađene u kalupe (vlastiti izvor)

Slika 52. Prizmice morta u vodi (vlastiti izvor)

Slika 53. Ispitivanje tlačne čvrstoće (vlastiti izvor)

Slika 54. Ispitivanje vlačne čvrstoće (vlastiti izvor)

Slika 55. Rezultati ispitivanja vlačnih čvrstoća mortova (vlastiti izvor)

Slika 56. Rezultati ispitivanja tlačnih čvrstoća mortova (vlastiti izvor)

Slika 57. Poprečni presjeci uzoraka (vlastiti izvor)

Popis tablica

- Tablica 1. Vrijednosti vlačne čvrstoće za pojedine razrede (klase) betona u N/mm² [7]
- Tablica 2. Procjena kvalitete betona obzirom na V_c [7]
- Tablica 3. Svojstva RAC agregata i opeke od drobljene gline korištene u ispitivanju [10]
- Tablica 4. Omjeri mješavine (kg/m³) [11]
- Tablica 5. Svojstva mikrobetona u svježem stanju [12]
- Tablica 6. Svojstva prirodnog pijeska i agregata od reciklirane opeke RBA [13]
- Tablica 7. Kemijski sastav RBP, cementa i letećeg pepela [13]
- Tablica 8. Omjer mješavina cementne žbuke s RBA i RBP [13]
- Tablica 9. Mineralni sastav otpadne drobljene opeke [14]
- Tablica 10. Utjecaj sadržaja krupnog agregata i S/P na reološke karakteristike betona [14]
- Tablica 11. Rezultat prosijavanja agregata frakciju 0-4 mm – Pijesak (vlastiti izvor)
- Tablica 12. Rezultati prosijavanja agregata frakciju 0-4 mm – Drobljena opeka (vlastiti izvor)
- Tablica 13. Konzistencije mortova (vlastiti izvor)
- Tablica 14. Rezultati ispitivanja vlačnih i tlačnih čvrstoća mortova (vlastiti izvor)