Laki samozbijajući beton s dodatkom mljevene opeke

Vuletić, Ivana

Undergraduate thesis / Završni rad

2014

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:
University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:123:860774

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split

zir.nsk.hr

UNIVERSITY OF SPLIT

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

ZAVRŠNI RAD

Ivana Vuletić

Split, 2014.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Ivana Vuletić

Laki samozbijajući beton s dodatkom mljevene opeke

Završni rad

Split, 2014.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ:	**PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**
KANDIDAT:	**Ivana Vuletić**
BROJ INDEKSA:	**3948**
KATEDRA:	**Katedra za građevinske materijale**
PREDMET:	**Građevinski materijali I**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Tema: Laki samozbijajući beton s dodatkom mljevene opeke

Opis zadatka: Zadatak kandidatkinje je proučiti lake i lake samozbijajuće betone. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi mješavinu lakog samozbijajućeg betona s dodatkom mljevene opeke kao punila te je usporediti s referentnom mješavinom. Betonu je potrebno ispitati obradivost u svježem stanju metodom V-lijevka, razastiranjem, T 50, J-prstenom i L-kutijom. U očvrslom stanju potrebno je na uzorcima starosti od 7 dana odrediti čvrstoću i dinamički modul elastičnosti. Sve rezultate potrebno je prikazati i komentirati.

U Splitu, 05.05.2014.

Voditelj završnog rada:

Izv.prof.dr.sc. Sandra Juradin

Laki samozbijajući beton s dodatkom mljevene opeke

Sažetak:

Laki beton ima manju gustoću u odnosu na normalan beton. Smanjenje gustoće postiže se stvaranjem međuprostora između zrna krupnog agregata, stvaranjem pora u mortu ili upotrebom agregata s velikim sadržajem pora. Najveće čvrstoće postižu lakoagregatni betoni s agregatom od ekspandirane pečene gline ili zgure, te s agregatom prirodnog porijekla. U eksperimentalnom dijelu rada napravljene su 2 različite vrste betonskih mješavina. Prikazani su i analizirani rezultati ispitivanja lakog samozbijajućeg betona s dodatkom mljevene opeke u svježem i očvrslom stanju.

Ključne riječi:

Laki beton, liapor, silikatna prašina, mljevena opeka, laki samozbijajući beton

(Lightweight self - compacting concrete with ground brick)

Abstract:

Lightweight concrete has a lower density compared to normal concrete. Reducing density is achived by creating a space between the grains of coarse aggregate, creating voids in the mortar or using the aggregates with a large content of pores. Lightweight aggregate concrete with expanded clay or slag, and the aggregate of natural origin, achive maximum strength. In the experimental part of the work 2 different types of concrete mixes were made. Results obtained by testing properties of fresh and hardened lightweight self - compacting concrete with ground brick are presented and analysed.

Keywords:

Lightweight concrete, silica fume, ground brick, lightweight self – compacting concret

Sadržaj

1. LAKI BETONI 7
1.1. Svojstva lakih betona 7
2. PODJELA LAKIH BETONA 10
2.1. Laki betoni od jednakozrnatog agregata 10
2.2. Lakoagregatni betoni 10
2.2.1. Prirodni laki agregat 11
2.2.2. Ekspandirani i pečeni (umjetni) agregati 11
2.2.3. Sekundarne sirovine 14
2.3. Ćelijasti betoni 15
2.3.1. Plinobetoni 16
2.3.2. Pjenobetoni 16
3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA BETONA VISOKE ČVRSTOĆE 17
3.1. Čvrstoća i elastična svojstva lakih betona 17
3.1.1. Ispitivanja provedena na agregatima 18
3.1.2. Proizvodnja standardnih lakih betona 18
3.1.3. Rezultati ispitivanja i diskusija 19
3.2.Utjecaj volumena frakcija lakog agregata na toplinska i mehanička svojstva betona. 21
3.2.1. Gustoća agregata i upijanje vode 21
3.2.2. Poroznost i veličina pora 23
3.2.3. Utjecaj lakog agregata na svojstva betona 24
3.3. Početno ispitivanje mješavine betona s lakim agregatom 25
4. EKSPERIMENTALNI DIO RADA 30
4.1. Uvod 30
4.2. Materijali 30
4.2.1. Cement 31
4.2.2. Agregat 32
4.2.3. Dodaci betonu 35
4.3. Proračun sastava betona 37
4.4. Ispitivanja provedena na pokusnim mješavinama 38
4.4.1. V-lijevak (V-funnel) 38
4.4.2. Metoda razastiranja (Slump-flow) 40

4.4.3. L-box test 41
4.4.4. J- prsten (J- ring) 43
4.4.5. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu 45
4.4.6. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona 47
4.4.7. Ispitivanje ultrazvukom 49
5. ZAKLJUČAK 51
6. LITERATURA 53

1. LAKI BETONI

Gustoća lakih betona se kreće od 600 - 1500 kg/m^3, dok se gustoća normalnih betona kreće od 2400 - 2500 kg/m^3. Smanjenje gustoće u odnosu na normalni beton se postiže na sljedeći način:

- upotrebom agregata s velikim sadržajem pora,
- stvaranjem međuprostora između krupnih zrna agregata,
- stvaranjem pora u mortu.

U usporedbi s normalnim betonom, stvaranjem pora u betonu se smanjuje njegova čvrstoća i otpornost na abraziju, ali se poboljšavaju izolacijska svojstva i postiže se manja volumna masa. Također, trajnost lakih betona može biti ista kao i kod običnog betona. Laki betoni su skuplji, a proizvodnja, transport i sama ugradnja zahtjevaju više pažnje, kako bi se postigla željena kakvoća. Ipak, prednosti lakog betona u cjelini nadmašuju navedene nedostatke.

1.1. Svojstva lakih betona

Podjela lakih betona se može napraviti prema njihovim svojstvima. Npr. prema zapreminskoj težini se dijele na:

- vrlo laki beton (500 kg/m^3),
- laki beton u užem smislu (500 - 1900 kg/m^3),
- olakšani beton kao prijelaz imeđu lakih i normalnih betona (1900 – 2000 kg/m^3).

Ostale podjele se mogu napraviti prema tlačnoj čvrstoći, veličini koeficijenata toplinske provodljivosti ili otpornosti na mraz.

Zapreminska težina lakih betona kreće se u veoma širokim granicama ovisno o vrsti lakog betona, a može iznositi najviše do 1900 kg/m^3. Dobar je pokazatelj kvalitete lakog betona u odnosu na njegova bitna svojstva (mehanička otpornost, koeficijent toplinske vodljivosti, otpornost na mraz…).

Čvrstoća na pritisak kod lakih betona se kreće od neznatnih vrijednosti pa sve do 60 MPa, čak i više. Veličina čvrstoće na pritisak ovisi o vrsti lakog betona, a veliki značaj imaju i njegova zapreminska težina, količina i vrsta veziva, vrsta agregata te vodocementni faktor. Kod lakih betona povećanjem količine cementa, raste i čvrstoća na pritisak. Ovisno o vrsti lakog betona i čvrstoće koju treba postići, utrošak cementa iznosi od 150 do 550 kg/m^3.

Laki betoni su krtiji i imaju manji modul elastičnosti u odnosu na normalni beton. Kreće se oko 20 GPa, dok je kod normalnih betona oko 35 GPa. Ponašanje im je gotovo linearno elastično, sve do sloma. Njihova kakvoća varira više nego kod običnih betona što zahtjeva do 70% veće količine cementa za 1 m^3 betona.

Laki beton je dobar izolator topline samo ako je dovoljno suh, jer se povećanjem vlažnosti njegova vodljivost povećava. Osim vlažnosti, na veličinu koeficijenta toplinske provodljivosti utječu i drugi faktori kao što su struktura lakog betona, zapreminska težina, granulometrijski sastav itd. Također, što je čvrstoća lakog betona manja, bolja su njegova izolacijska svojstva i obratno.

Skupljanje i bubrenje lakih betona je veliko, a uzrokuju nastanak mrežastih pukotina koje nastaju nekoliko tjedana ili mjeseci nakon očvršćivanja. Skupljanje normalnog i lakog betona nastaje uslijed gubitka vode sadržane u betonu. Konačno skupljanje lakih betona je veće od skupljanja normalnih betona za približno 15 do 30%. Na skupljanje lakih betona utječu voda, cement i dodaci, a naročito veliki utjecaj ima vrsta i kvaliteta agregata. Veličina skupljanja normalnog betona posije jedne godine iznosi oko 0, 68 mm/m, a veličina skupljanja lakih betona se kreće od 0,8 do 0,9 mm/m. Bubrenje betona nastaje zbog povećanja razdvajajućeg utjecaja vode u prostoru između zrna i finih kapilara. Bubrenje lakih betona se najčešće kreće u granicama od 0,1 do 0,15 mm/m.

Puzanje lakih betona je znatno veće nego kod običnih betona.

Upijanje vode lakih betona znatno je veće od upijanja normalnog betona za slučaj istih ili približnih tlačnih čvrstoća.

Većina lakih betona ima niže koeficijente linearnog širenja u odnosu na čelik. Zbog toga se mogu očekivati veća naprezanja na istezanje, jer pri zagrijavanju u eksploataciji zajednički rad čelične armature i lakog betona neće biti potpuno osiguran.

2. PODJELA LAKIH BETONA

S obzirom na način postizanja manje volumne mase, laki betoni se dijele na:

- lake betone od jednakozrnatog agregata,
- lakoagregatne betone,
- ćelijaste betone.

2.1. Laki betoni od jednakozrnatog agregata

Laki betoni od jednakozrnatog agregata se dobivaju izostavljanjem sitne frakcije agregata i upotrebom praktično jedne frakcije nominalno iste veličine zrna. Jedna normalna frakcija kamenog agregata, primjerice 4 – 8 mm ima volumnu koncentraciju agregata 0.55 – 0.60, zbog čega u gotovom betonu ostaje dosta šupljina. Prema principu geometrijske sličnosti agregata, volumna koncentracija uzorka agregata ne ovisi o veličini zrna agregata i najmanja je za jedan razred zrna agregata. Miješanjem više razreda povećava se volumna koncentracija agregata. Zrna agregata ne bi trebala biti veća od 25 – 30 mm.

Beton od jednakozrnatog agregata je otporan na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, jer gotovo nema kapilarnih pora. Potrebna količina cementa je najmanje 250 kg/m^3.

2.2. Lakoagregatni betoni

Prema vrsti agregata koja se koristi za proizvodnju lakogregatnog betona možemo vršiti podjelu na:

- prirodni
- ekspandirani i pečeni (umjetni)
- sekundarne sirovine

2.2.1. Prirodni laki agregat

Prirodni laki agregati mogu biti sedimentnog ili vulkanskog porijekla, a osnovna im je karakteristika visoki stupanj poroznosti.

Agregati sedimentnog porijekla - Ovi agregati spadaju u sedimentne stijene i uglavnom su silikatnog sastava. Zbog velikih količina pora i šupljina, imaju malu zapreminsku težinu čime se dobije beton male čvrstoće koji služi isključivo u izolacijske svrhe.

Agregati vulkanskog porijekla - Proizvode vulkanskog porijekla predstavljaju plovućac i prirodni porozni poculani, a razlikuju se po strukturi i sastavu.

Plovućac ima strukturu s porama i veličinu zrna 1- 40 mm i nastaje pri brzom hlađenju lave. Pretežito sadrži SiO_2.

Pucolani nastaju hlađenjem lave s velikim sadržajem uključenih plinova. Pore su znatno krupnije i nepravilnijeg oblika, nego kod plovućca. Zbog toga je plovućac porozniji i s manjom čvrstoćom, u odnosu na pucolane.

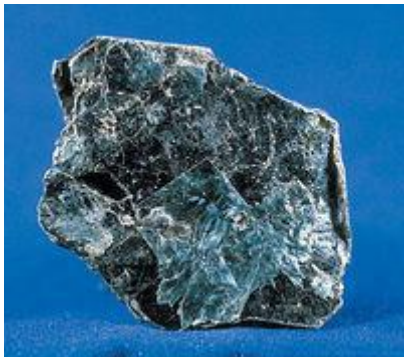
2.2.2. Ekspandirani i pečeni (umjetni) agregati

Ovi se agregati dobivaju industrijskim putem, specijanim tehnološkim postupcima.

Perlit - Perlit je staklasta vulkanska stijena, silikatnog sastava, s kemijski vezanom vodom. Ekspandiranje se događa na temperaturama 700 – 1200 °C, te se dobiva ekspandirani perlit s velikim sadržajem zatvorenih pora koje formiraju ćelijastu strukturu. Zapreminska težina iznosi 50 – 640 kg/m^3, a sastoji se uglavnom od SiO_2 *i* Al_2O_3. Ekspandirani perlit ima malu toplinsku vodljivost i cijenjen je za izradu termo i zvučne izolacije. Betoni od prelita imaju vrlo malu gustoću, malu čvrstoću, veliko skupljanje i upijanje vlage.

Vermikulit - Stijena vermikulit nastaje u prirodi iz liskuna, a ekspandirani vermikulit spada u najrijeđe porozne agregate. Ima naročito naglašene sljedeće osobine: toplinsku izolacijsku moć koja potječe od zračnih proslojaka između njegovih listića i male toplinske

provodljivosti samog materijala što je od značaja kod djelovanja visokih temperatura i požara; i zvučnu izolacijsku sposobnost koja potječe od porozne strukture.



Slika 1.1. *Vermikulit* [13]

Ekspandirana glina - Ekspandirana glina na tržište dolazi najčešće pod nazivom glinopor ili keramzit. U suvremenom građevinarstvu keramzit – beton je u širokoj primjeni. Za definiranje fizičko – mehaničkih osobina lakog agregata od ekspandirane gline mogu se koristiti standardi različitih zemalja, prije svega onih u kojima je proizvodnja ovog lakog agregata velika, a njegova primjena značajna. Razlikujemo tri vrste zapreminske težine, a to su zapreminska težina u rastresitom i zbijenom stanju, te zapreminska težina samih zrna. Utvrđuje se posebno za svaku frakciju, osim za najsitniju. Podaci o zapreminskoj težini samih zrna koristi se kada se treba predvidjeti zapreminska težina gotovog betona određenog sastava, odnosno ako je unaprijed postavljena zapreminska težina koja se mora postići za zadanu čvrstoću na pritisak.

Vlažnost agregata ne bi smjela prekoračiti 2% ukupna težine agregata. Laki agregat od ekspandirane gline ima vlažnost oko 0,1 %, što je zanemarivo.

Ispitivanje otpornosti na mraz se vrši u 15 ciklusa pri čemu se agregat podvrgava naizmjeničnom smrzavanju i odmrzavanju. Gubitak težine iste frakcije agregata ne smije biti veći od 8% ukupne težine.

Poroznost samih zrna i međuzrnata poroznost osobine su koje pobliže definiraju kakvoću agregata od ekspandirane gline. Prosječna poroznost samih zrna kreće se od 30 – 80 %, dok bi međuzrnata poroznost trebala biti veća od 35 % kako bi postojala mogućnost ugrađivanja dovoljne količine vezivnog materijala.

Proces ekspandiranja počinje dovođenjem sirovog materijala na odgovarajuću temperaturu. Pri tom se oko pojedinih granula stvara stopljena kora, koja spriječava odlazak plinova nastalih unutar granula. Daljnim prodiranjem temperature u jezgru, plinovi se ponovno oslobađaju i sve veći dio prelazi u sinterizirano stanje. Sinteriranje je postupak izazivanja površinskog topljenja fino granuliranog materijala.

Najčešća primjenjena tehnologija za proizvodnju agregata od ekspandirane gline je postupak s rotacijskom pećи. Postoje različite konstrukcije rotacijskih pećи, a svako postrojenje radi tako da se materijal najprije suši, zatim se predgrijava i na kraju procesa hladi. Temperatura na ulazu u peć kreće se od 200 – 600 ºC, a u zoni topljenja oko 1150 ºC. Ukupno vrijeme prolaza materijala kroz peć iznosi 30 – 45 min.

Agregat od ekspandirane gline je pogodan za upotrebu u proizvodnji lakih betona zbog sljedećih osobina:

- mala težina,
- postiže visoku čvrstoću,
- ne upija vodu,
- ima dobra izolacijska svojstva,
- dobro prigušenje zvuka,
- laka i jednostavna prerada,
- postojanost na temperaturi,
- postojanost na mrazu,
- mogućnost naknadne obrade.

2.2.3. Sekundarne sirovine

Kao laki agregat, za betone se mogu upotrebljavati i sekundarne sirovine. Njihova uporaba je ekonomična i efikasna, jer svi otpaci koji nastaju pri termičkoj obradi kao sporedni proizvodi imaju sličan sastav kao i prirodni porozni pucolani. U sekundarne sirovine spadaju:

- ložišna (kotlovska) zgura,
- ekspandirana zgura iz visokih peći,
- granulirana zgura,
- kristalna zgura,
- leteći pepeo iz termoelektrana.

Ložišna (kotlovska) zgura - Ložišna zgura je jedan od najrasprostranjenijih agregata ove vrste, a predstavlja ostatak nakon izgaranja ugljena ili koksa. Svojstva zgure ovise o vrsti goriva, konstrukciji peći i temperaturi izgaranja. Ohlađena zgura uvijek sadrži neizgorene čestice i različite sumporne spojeve koji, u kontaktu s vlagom, povećavaju volumen i izazivaju razaranje zrna agregata ili betona. Mogu izazvati i sulfatnu koroziju pri reakciji s cementom, a sadržaj SiO_2 u zguri ne smije biti veći od 1%, jer u suprotnom dolazi do razaranja betona.

Ložišna zgura ima značajnu primjenu u izradi nearmiranog lakog betona.

Ekspandirana zgura iz visokih peći - Ekspandirana zgura se dobije naglim hlađenjem rastopljene zgure iz visokih peći za sirovo željezo, što za posljedicu daje amorfnu, vrlo poroznu strukturu. Poslije hlađenja vrši se drobljenje i separiranje agregata u tri frakcije: 0/14, 4/16, 16/31,5 mm. Zrna su hrapava pa se postiže dobra adhezija s cementnim mortom i visoka čvrstoća betona.

Granulirana zgura - Granulirana zgura nastaje ako se zgura visokih peći naglo hladi potapanjem u vodu te se dobiju zrna s velikih sadržajem pora. Za proizvodnju agregata najčešće se koristi kisela zgura, dok je bazičnu zguru najekonomičnije upotrijebiti kao dodatak cementu.

Kristalna zgura - Kristalna zgura dobije se sporim hlađenjem zgure visokih peći. Plinovi pri hlađenju ostavljaju šupljine veličine 0,2- 0,4 mm.

Agregat za beton se dobiva drobljenjem ohlađene zgure.

Leteći pepeo iz termoelektrana - Leteći pepeo hvata se elektrofilterima na dimnjacima termoelektrana, a nastaje kao sporedni produkt ugljena u termoelektranama. Mješanjem s 20 – 25% vode dobivaju se granule koje se zatim peku na temperaturi, nešto ispod točke sinteriranja. Prilikom pečenja izgaraju zaostale neizgorjele čestice iz pepela, što stvara veliku količinu pora.

Leteći pepeo za izradu lakog agregata ne smije sadržavati preveliku količinu sumpora ili drugih štetnih sastojaka. Umjesto letećeg pepela mogu se upotrijebiti i mljeveni prirodni poculani.

2.3. Ćelijasti betoni

Ćelijasti betoni su vrlo laki betoni u čiju je masu prije stvrdnjavanja utisnut zrak ili je kemijskim putem proizveden plin čiji se mjehurići šire u beton. Ako se čistoj cementnoj pasti dodaju aktivni ili inertni fini agregat, kao što su: pijesak, kvarc, pečena glina, leteći pepeo, pucolan itd., mogu se dobiti ćelijasti betoni porozne strukture na bazi portland i metalurškog cementa.

Podjela ćelijastih betona prema načinu dobivanja ćelijaste strukture je sljedeća:

- plinobetoni,
- pjenobetoni.

2.3.1. Plinobetoni

Plinobeton se proizvodi u autoklavima, na visokoj temperaturi i pritisku. Upotrebljava se za tvorničku izradu blokova za zidanje i prefabriciranih elemenata. Sirovine za proizvodnju su cement, vapno, leteći pepeo i sitno samljeveni kvarcni pijesak i dodatak za ekspanziju. Dodatak stvara veliku količinu mjehurića plina, čime nastaje ćelijasta struktura u još svježem betonu.

Dodatak aluminijskog praha razvija u svježem betonu vodik, a gotovi beton nosi komercijalni naziv *siporeks*. Ako se kao dodatak upotijebi kalcijev karbid, u svježem betonu razvija se acetilen. Takav gotovi beton nosi zaštićeni naziv *ytong*. [1]

2.3.2. Pjenobetoni

Sirovine za proizvodnju pjenobetona su cement i sitni pijesak, te eventualno sitni laki agregat. Ćelijasta struktura dobiva se dodavanjem sredstva za pjenjenje u miješalicu. Ova vrsta lakog betona se rijetko upotrebljavala. Naime, pored segregacije pjene i nekih problema koji su se javljali pri proizvodnji, sadržaj pora je varirao, a nije se mogla postići ni njihova jednolična distribucija. Osim toga, oblik, veličina i granulometrijski sastav pora često nisu bili povoljni za postizanje tražene čvrstoće i trajnosti betona.

Međutim, pojavom novih tehnologija, većina navedenih problema je riješena, te je moguće proizvoditi pjenobeton u širokom rasponu volumnih masa, od 0,4 do 2,0 g/cm^3. [1]



Slika 1.2. *Pjenobeton* [3]

3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA BETONA VISOKE ČVRSTOĆE

Posljednjih godina se laki betoni visoke čvrstoće koriste u istoj mjeri kao i normalni betoni. Proizvodnja ovih betona je napredovala zbog sve bržeg razvoja tehnologije. Podaci o mehaničkim svojstvima lakih betona su jako bitni kod njihove primjene kao konstruktivnih betona. Međutim, još uvijek se ne zna dovoljno o mehaničkim svojstvima i ponašanju ovih betona te su potrebna dodatna istraživanja na ovom području.

U ovom radu su prikazane studije o čvrstoći i elastičnim svojstvima lakih betona istraživača Niyazi Ugur Kockala i Turana Ozturana. Nguyen, Beaucour i Ortola se u svom radu bave utjecajem volumena frakcija agregata na mehanička i toplinska svojstva lakog betona, a Yang, Kim i Choi su utvrđivali prvu probnu mješavinu postupkom doziranja za strukturne lake betone.

3.1. Čvrstoća i elastična svojstva lakih betona

Studija predstavlja utjecaj karakteristika četiri agregatna tipa (dva od sinteriranog letećeg pepela, hladno prešanog letećeg pepela i vapnenca) na čvrstoću i elastična svojstava betonske smjese. Rezultati ovog istraživanja pokazali su postizanje visoke čvrstoće laganih betona korištenjem sinteriranog i hladno prešanog letećeg pepela kao agregata.

Istraživači Lo i Cui pokazuju da se pomoću letećeg pepela (FA), pepela s dna peći (FBA) i komercijalno proizvedenih laganih agregata (Lytag) mogu proizvesti lagani betoni s gustoćom u rasponu od 1560 - 1960 kg/m^3. Eksperimentalno istraživanje je provedeno kako bi se dobile prednosti i moduli elastičnosti hladno prešanih laganih agregata. Rezultati ispitivanja su pokazali da su svojstva laganog agregata i omjer vode i veziva dva najvažnija čimbenika koji utječu na tlačnu čvrstoću i elastičnost betona. Korištenjem laganih agregata možemo očekivati smanjenje težine betona i druge pozitivne učinke na beton, ali i smanjenje zagađenja okoliša putem reciklaže otpada. Međutim, ne postoji dovoljan broj objavljenih radova vezanih uz svojstva laganih betona visoke čvrstoće s agregatom od hladno prešanog letećeg pepela. Cilj ovog rada je istražiti učinke svojstava različitih agregata od laganog letećeg pepela na svojstva betona.

3.1.1. Ispitivanja provedena na agregatima

Između 18 različitih laganih agregata od sinteriranog letećeg pepela, proizvedenih u ovom istraživačkom projektu, dva agregata (agregat koji sadrži 10% betonita sinteriran na 1200 ºC i agregat koji sadrži 10% staklenog praha sinteriran na 1200 ºC) su izabrana zbog njihove niže gustoće i veće čvrstoće.

Kako bi se utvrdila čvrstoća laganih agregata, pojedinačne čestice su smještene između paralelnih ploča i lomljene dijametralno. Najmanje 20 kuglica promjera oko 10 mm je testirano za određivanje prosječne čvrstoće na drobljenje za svaku vrstu agregata.

Rezultati testa su provedeni na agregatima normalne težine i na lakim agregatima. Agregat od hladno prešanog letećeg pepela ima najnižu jedinicu težine i najveću vrijednost drobljenja od ispitanih agregata. Vrijednost drobljenja umjetnih agregata je niža od one koju ima prirodni agregat zbog porozne strukture. Postotak praznog prostora između čestica je kod svih laganih agregata slična jer je agregat okruglog oblika i glatke površine. Međutim, ta vrijednost za agregat normalne težine je relativno veća u odnosu na laki agregat, jer je oblik zrna agregata normalne težine uglavnom pravokutan.

3.1.2. Proizvodnja standardnih lakih betona

Betoni su s obzirom na vrstu agregata kodirani kao LWGC(betoni s agregatom od laganog staklenog praha s dodatkom letećeg pepela), LWBC(lagani betoni s dodatkom letećeg pepela), LWCC (Lagani betoni s dodatkom hladno prešanog letećeg pepela) i NWC (betoni standardne težine). Početne ispitne mješavine su napravljene kako bi se dobilo slijeganje od 150 mm, sa sadržajem zraka od 4% i željena čvrstoća i jedinična težina. Lagani betoni su načinjeni od običnog portland cementa, superplastifikatora, aeranta, vode, prirodnog pijeska, pijeska dobivenog lomljenjem i laganog agregata s vodocementnim faktorom 0,26. Slijeganje je ispitano odmah nakon proizvodnje u skladu s ASTM C 143.

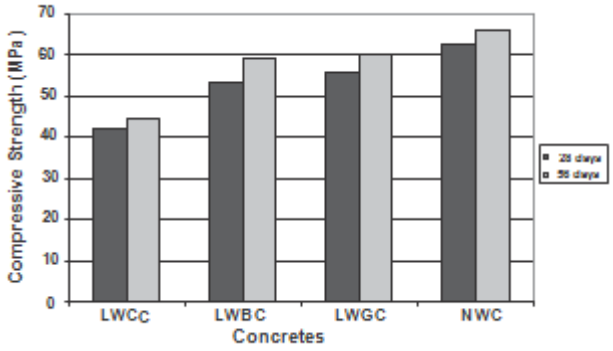
Gustoća svježeg betona i sadržaj zraka su izmjereni u skladu sa standardnim procedurama. Tlačna čvrstoća, modul elastičnosti i čvrstoća na cijepanje su također mjereni prema

standardnim metodama nakon 28 i 56 dana. Također, vrijednosti modula elastičnosti konkretnih uzoraka su izračunati prema europskim standardima kakvoće.

3.1.3. Rezultati ispitivanja i diskusija

Kako bi se dobilo slično slijeganje i sadržaj zraka kod lakih betona u usporedbi sa standardnim betonima, potrebna je manja količina superplastifikatora i aeranta što rezultira smanjenjem troškova. Razlog tome može biti sferni oblik čestica lakog agregata u odnosu na pravokutni oblik čestica tucanika što smanjenje potražnje vode svježeg betona. Također, lakše mješavine imaju manje slijeganje jer je utjecaj gravitacije manji u slučaju lakšeg agregata.

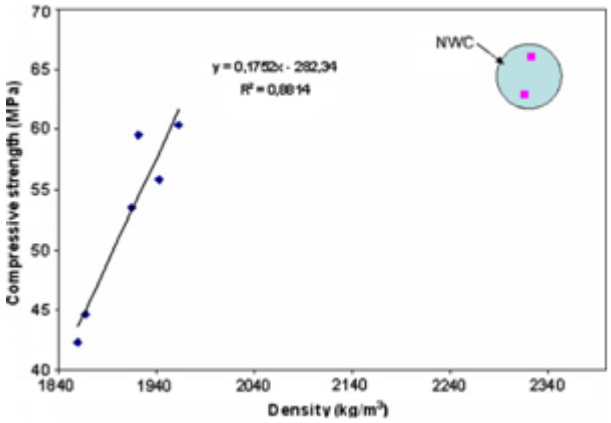
Tlačna čvrstoća i modul elastičnosti - Vrijednosti tlačne čvrstoće prikazani su na slici 3.1. Zamjena standardnog agregata visoke čvrstoće lakim agregatom, rezultirala je smanjenjem tlačne čvrstoće za 12% kod LWGC, 18% kod LWBC i 49% kod LWCC. Ovaj omjer je nakon 56 dana smanjen na 9%, 11% i 48%. Najveći rast čvrstoće od 28 do 56 dana od LWBC se može pripisati većoj pucolanskoj aktivnosti agregata, dok je NWC pokazao najmanji rast čvrstoće.



Dijagram 3.1. *Vrijednosti tlačne čvrstoće* [5]

Nemes i Jozza pokazuju da postignuta maksimalna tlačna čvrstoća ovisi o gustoći čestica LWA. Ovaj rezultat potvrđuje i dijagram 3.2. koja pokazuje odnos između tlačne čvrstoće i gustoće osušenog uzorka. Međutim, ne postoji opći odnos između gustoće i klasa čvrstoće za različite vrste laganih agregata. U ovoj studiji, regresijska analiza je provedena na tlačne

čvrstoće i gustoće između laganih agregata korištenjem regresijskih modela koji su pokazali najbolji rezultat u odnosu na ostale regresijske modele.



Dijagram 3.2. *Omjer tlačne čvrstoće i gustoće* [5]

Linearni model je pokazao linearnost između čvrstoće i gustoće. Tlačna čvrstoća je izravno proporcionalna gustoći stvrdnutog betona. Međutim, ova regresija nije uključila rezultate testa standardnog betona. Razlog su različiti mehanizmi laganih i standardnih betona. Čvrstoća zajedničkog betona je 1,5 do 2,0 puta veća od čvrstoće betona po sebi, dok je čvrstoća laganog agregata daleko niža od čvrstoće betona pa oni imaju različite destruktivne oblike pri pritisku.

Kod betona visoke čvrstoće vrijednost modula elastičnosti očvrslog cementa je visoka, a razlika između modula elastičnosti agregata i očvrslog cementa postane dovoljno mala što rezultira većom ukupnom čvrstoćom i monolitnošću. Isto tako, od laganih betona se očekuje da očituju jasnije monolitno ponašanje od standardnih betona. To je s obzirom na niže module elastičnosti lakog agregata. Modul elastičnosti ovisi, ne samo o gustoći, već i o strukturi pora i teksturi površine lakog agregata. Stoga, agregat s gušćom i ravnomjernijom strukturom pora daje veći modul elastičnosti i veće čvrstoće od agregata s velikim udjelom pora.

Čvrstoća na cijepanje - Vjeruje se da test cijepanja daje najbližu prezentaciju prave čvrstoće betona. Minimalna čvrstoća na cijepanje je od 2,0 MPa je uvjet za građevinski laki agregat prema ASTM C 330.

Zaključak - Ako želimo dobiti sličan sadržaj zraka u lakim betonima u odnosu na normalne betone, potrebne su manje količine superplastifikatora i aeranta.

Svi laki betoni imali su gustoću manju od 2000 kg/m^3. Betoni s lakim agregatom su postigli nešto nižu čvrstoću od betona normalne težine zbog veće poroznosti i manje čvrstoće agregata. Teži beton se ispostavio čvršćim betonom, odnosno čvrstoća betona je usko povezana s gustoćom.

Modul elastičnosti lakih betona je relativno manji, nego kod betona normalne težine. Razlika u čvrstoći na cijepanje je mala, dok normalni betoni daju nešto veću otpornost na vlak.

3.2. Utjecaj volumena frakcija lakog agregata na toplinska i mehanička svojstva betona

3.2.1. Gustoća agregata i upijanje vode

Gustoća lakog agregata i kapacitet upijanja vode moraju se uzeti u obzir prilikom određivanja volumena lakog agregata koji će se dodati smjesi. U ovom istraživanju, korišteni su vodom zasićeni laki agregati kako bi se izbjegle bilo kakve promjene omjera vode i cementa zbog upijanja vode prilikom miješanja smjese. Svojstva lakih agregata prezentirana su u tablici 3.1.

Tablica 3.1. *Fizikalna svojstva lakih agregata* [6]

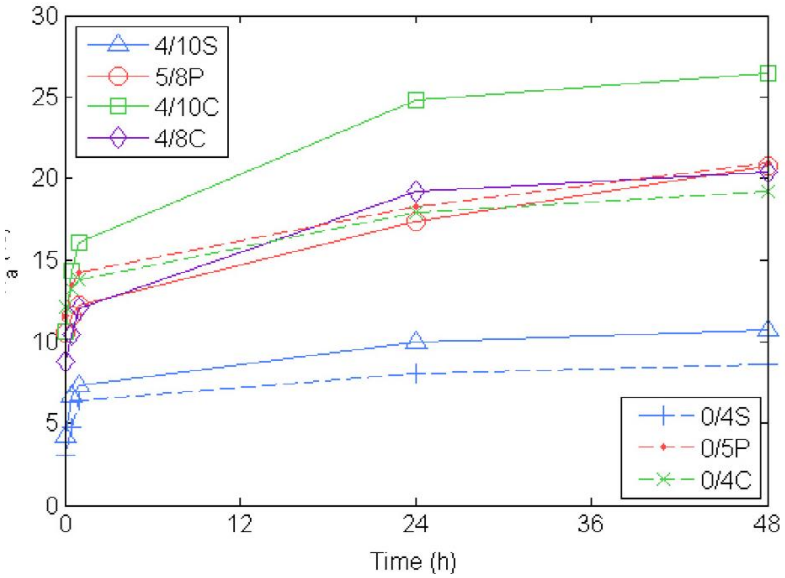
Aggregates	Size	Aggregates density (kg/m^3)			W_a^{24}
		ρ_v	ρ_{rd}	ρ_{ssd}	
0/2 N	0/2		2460	2570	4.54
4/10 N	4/10	1360	2460	2530	2.94
0/4S	0/4	1030	1790	1940	8.05
4/10S	4/10	520	900	990	10.01
0/5P	0/5	800	1340	1620	18.3
5/8P	5/8	680	1180	1390	17.32
0/4C	0/4	830	1410	1680	17.88
4/8C	4/8	740	1250	1500	19.17
4/10C	4/10	590	980	1240	24.76

Svojstva normalnih agregata nazvana su 0/2 N i 4/10 N. Gustoća (ρ_v), gustoća potpuno suhog zrna (ρ_{rd}) i gustoća površinski suhog zrna(ρ_{ssd}) utvrđene su nakon 24 sata po standardima EN 1097-3 i EN 1097-6. Testirana su po 3 uzorka za svaki agregat kako bi se odredila srednja vrijednost.

Koeficijent upijanja vode agregata W_a^i u srednjem trenutku utvrđen je tijekom uranjanja u sobnim uvjetima prema EN 1097-6:

$$W_a^i = W_a^{48} - (M^{48} - M^i)/\, M^5 \qquad (1)$$

gdje je W_A^{48} koeficijent apsorpcije vode tijekom 48 sati dobiven metodom piknometra. M^{48}i M^i predstavljaju masu piknometra s uronjenim agregatom nakon 48 sati i u srednjem trenutku ; M^s je masa potpuno suhog agregata. Koeficijent upijanja vode agregata mjereni su nakon 5 min, 30 min,1 h, 24 h i 48 h (dijagram 3.3.). Svakoj točki odgovara srednja vrijednost od tri mjerenja na različitim uzorcima.



Dijagram 3.3. *Koeficijenti upijanja vode agregata* [6]

Agregat od ekspandirajućeg škriljevaca ima najsporiji razvoj koeficijenta upijanja vode. Agregat od ekspandirajućeg škriljevca i ekspandirajuće gline imaju poroznu unutrašnju

strukturu okruženu ljuskama, koja je razmjerno gusta i staklaste površine. Ljuska škriljevca 4/10S je deblja nego što je glina 4/10C. To objašnjava manji koeficijent upijanja vode za 4/10S u usporedbi s onim 4/10C. Za plovućac, nema razlike između unutarnje i vanjske strukture. Koeficijenti upijanja vode su slični za sitne 0/5P i grube čestice plovućca 5/8P. Iz usporedivih gustoća sitnih čestica plovućca i sitnih čestica gline vidljivo je da imaju sličan koeficijent upijanja vode. Koeficijent upijanja vode agregata od ekspandirane gline povećava se sa smanjenjem gustoće.

U odnosu na upijanje vode tijekom 48 sati, više od 50% vode se upije u prvih 5 minuta. Brzina upijanja usporava s vremenom, ali laki agregat upija vodu i nakon nekoliko tjedana. Što je laki agregat više zasićen, manje je upijanje tijekom miješanja. Stoga je prednost uroniti agregat 48 sati prije miješanja kako bi se izbjegle promjene vodocementnog faktora W/C lakog betona .Izmjereni koeficijent upijanja vode tijekom 48 sati se koristi za izračunavanje udjela betonske smjese.

3.2.2. Poroznost i veličina pora

Mehanička i toplinska svojstva agregata ovise o mineraloškom i kemijskom sastavu, ali i o mikrostrukturi zrna. Poroznost se testira uvlačenjem žive u cilju analize distribucije pora i ukupne mikroporoznosti agregata. Veličine pora se izračunavaju sljedećim izrazom:

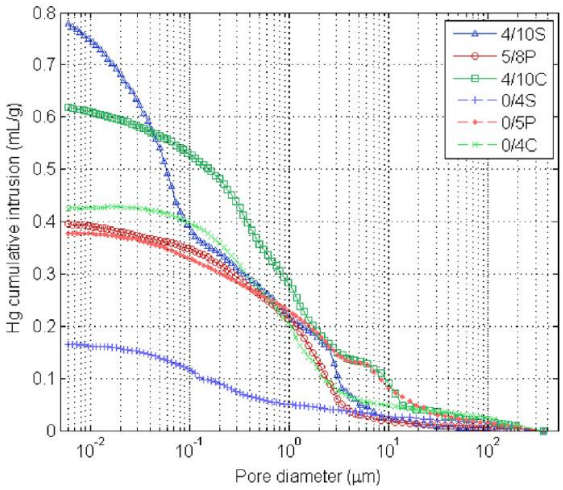
$$r = 2\sigma \cos\theta / P \qquad (2)$$

gdje se polumjeri pora (r) odnose na pritisak (P), površinsku napetost žive (σ) i kut kontakta između žive i krute tvari (θ). Međutim, visoki pritisci žive mogu izazvati promjene na fine pore tijekom ispitivanja. Distribucija pora može biti dobro opisana, ali poroznost mjerena upadom žive može biti precijenjena.

Poroznost se također testira pomoću zasićenja vakuum uređajem. S ciljem ispunjavanja svih dostupnih pora vodom, nužno je da se iz pora ukloni zrak. U tu svrhu, vakuum uređajem se izbaci zrak iz unutarnjih pora. Voda se zatim ulije u vakuumsku posudu, kako bi uzorci bili uronjeni. Poroznost se računa iz omjera volumena upijene vode i volumena zrna:

$$\Phi = V_{vode} / V_{zrna} \quad (3)$$

Ukupna poroznost lakog agregata Φ^{Hg} usljed ulaska žive varira od 25% do 60%. Te vrijednosti poroznosti testirane ulaskom žive općenito su u skladu s vrijednostima dobivenih u vakuumu Φ^{vac}. Porometar može otkriti pore u rasponu od 6 nm do 160 μm.



Dijagram 3.4. *Ukupna poroznost lakih agregata na ukupni ulazak žive* [6]

3.2.3. Utjecaj lakog agregata na svojstva betona

U ovome uratku istraživana su toplinska i mehanička svojstva lakih betona. 12 mješavina lakog betona, napravljenih od 3 vrste lakog agregata, je testirano i uspoređeno s normalnim betonom. Mehanička i toplinska ponašanja lakog betona ovise o volumnom udjelu agregata, ali i o njegovoj prirodi i kvaliteti. Ova studija pokazuje da korištenje finog lakog agregata kao zamjena za fini normalni agregat dovodi do lakog betona s nižim mehaničkim svojstvima, ali i s manjom gustoćom pa su su izolacijska svojstva poboljšana.

Tlačna čvrstoća i modul elastičnosti lakog betona linearno opadaju smanjenjem gustoće betona. Zamjena finog normalnog agregata finim lakim agregatom kod lakih betona dovodi do smanjenja od 2,3 - 3,8 MPa i 1,7 - 2,6 GPa po 100 kg/m^3 za tlačnu čvrstoću, odnosno modul elastičnosti. Veličina smanjenja mehaničkih svojstava može se povezati s gustoćom zrna, ali i njegova mikro struktura također ima utjecaj. Ustvari, na tlačnu čvrstoću lakog

betona više utječe čvrstoća grubog agregata nego finog. Smanjenju modula elastičnosti grubi i fini agregat pridonose podjednako.

Zamjena finog normalnog agregata finim lakim agregatom smanjuje toplinsku provodljivost od 0,1 do 0,16 W/mK, kao i toplinsku difuznost od 0,05 do 0,1 m^2/s za smanjenje gustoće od 100 kg/m^3. Razlike između vrijednosti su povezane sa gustoćom zrna i njihovom mineraloškom sastavu. Zbog amorfne faze lakog betona od plovućca, toplinska vodljivost OP betona opada brže sa smanjenjem gustoće betona, nego kod ostalih lakih betona.

Za ukupnu zamjenu finog normalnog agregata, lakom betonu varira gustoća od 1170 do 1350 kg/m^3. Tlačna čvrstoća i modul elastičnosti variraju od 22 do 35 MPa, odnosno od 11 do 17 Gpa. Toplinska provodljivost je od 0,43 do 0,57 W/mK. OP beton i OS beton su vrlo interesantni zbog njihovog omjera mehaničkih/izolacijskih svojstava. OC betoni imaju vrlo dobra izolacijska svojstva, ali su njihovi moduli elastičnosti mali s obzirom na ostale lake betone. Kako god, laki betoni još uvijek imaju adekvatna mehanička svojstva za strukturalno korištenje. Laki betoni izrađeni od finog i grubog lakog agregata su pogodni za kombiniranje strukturalne čvrstoće i izolacije.

3.3. Početno ispitivanje mješavine betona s lakim agregatom

[7] Cilj ovog istraživanja bio je utvrditi prvu probnu mješavinu postupkom doziranja za strukturne lake betone. Ovaj postupak može lako odrediti sadržaj svakog sastojka po jedinici volumena betona za postizanje ciljanog slijeganja, 28-dnevne čvrstoće, suhe gustoće i količine zraka. Nadalje, ne postoje nikakvi podaci u literaturi koji govore o djelomičnoj zamjeni lakog agregata koristeći normalnu masu finog agregata da bi se postigla ciljana suha gustoća i tlačna čvrstoća betona. Da se ispita utjecaj različitih parametara na zahtjeve i formulira dizajn jednadžbe, analizirana je sveobuhvatna baza podataka s 347 primjeraka lakih betona pomoću nelinearne višestruke regresije (NLMR). Pouzdanost predloženog postupka verificirana je testiranjem 5 gotovih betonskih mješavina koje sadrže lagani fini agregat umjesto prirodnog pijeska.

Korišteni agregati su kombinacije laganih grubih i finih materijala ili laganih grubih materijala i pijeska normalne težine. Baza uključuje 39 posve laganih betonskih mješavina te 308 mješavina laganog betona s pijeskom. Leteći pepeo ili čestice gline su uglavnom korišteni kao lagani agregat. Nijedna mješavina nije sadržavala dodatne materijale.

Glavni parametri za sve lake betone su:

-omjer voda/cement w/c= 0,28 - 0,

-sadržaj vode W= 139 - 242 kg/m^3

-volumenski omjer grubog agregata po jedinici mase od agregata 0,45 - 0,82

- količina zraka 0,03 - 0,065

Čvrstoća - Čvrstoća se koristi kao osnova za odabir udjela u sastavu betona uz standardno odstupanje uzorka λ_s . Na temelju empirijskih dokaza, ACI 214 definira koeficijent varijacije λ_v. od 15%, što predstavlja prosječnu kontrolu. Međutim Nowak i Szerszen pokazali su da bi vrijednosti λ_v za prosječnu kontrolu trebala biti niža od preporučene vrijednosti od strane ACI-214. Prema njihovom izvješću, pojedinačna vrijednost od 10% može se preporučiti za normalne betone, dok je λ_v za lake betone 7-8,5%, iako su skupovi podataka za lagane betone mali. Temeljeno na srednjoj vrijednosti gornje granice, izabrani λ_v je iznosio 12,5%, koji predstavlja prosječnu kontrolu za laki beton. Dakle iz glavne jednadžbe koja je navedena u ACI-381-11 odnos između f'_{CR} (u Mpa) i f'_C (u Mpa) za strukturalni laki beton glasi:

$$f'_{CR} = f'_C + 1{,}34\,\lambda_s = 1{,}167\, f'_C \qquad (4)$$

gdje je f'_{CR} čvrstoća betona, a f'_C čvrstoća betona nakon 28 dana.

Vodocementni faktor - Generalno, tlačna čvrstoća betona obrnuto je proporcionalna W/C i sadržaju zraka v_a. Osim toga, čvrstoća lakog betona se povećava s njegovom suhom

gustoćom, što dovodi do zaključka da je manji W/C potreban lakom betonu s manjom gustoćom da bi se postigla ciljana čvrstoća. Osim toga, suha gustoća značajno ovisi o zamjeni finog agregata prirodnim pijeskom.

$$R_{LFA}(=\frac{vfl}{vfl+vfs}) \tag{5}$$

gdje su v_{fl} i v_{fs} volumeni finog agregata i prirodnog pijeska. Sve u svemu, kroz optimalnu NLMR analizu tih parametara, čvrstoća lakog betona može se formulirati kao:

$$\frac{f`c}{f_0} = 0{,}72 \cdot \left(\frac{\gamma_{con}}{\gamma_o} \cdot \frac{w}{c}\right) \cdot (\frac{1}{v_a})^{0,2} \tag{6}$$

$f_0 = 10\text{Mpa}$ ... referetntna tlačna čvrstoća nakon 28 dana

$\gamma_o = \frac{2300\text{kg}}{\text{m3}}$ ... referentna suha gustoća betona

Iz čega slijedi….

$$\frac{w}{c} = 0{,}72(\frac{1}{v_a})^{0,2} \cdot \left(\frac{\gamma_{con}}{\gamma_0}\right) \cdot \left(\frac{f_0}{f`_c}\right) \tag{7}$$

Sadržaj vode - Potrebna količina vode (*w*) po jedinici volumena betona, da bi se postiglo ciljano slijeganje, ovisi o nominalnoj veličini i volumnom omjeru krupnog i finog agregata, o količini zraka, tipu kemijske vode-redukcijsko sredstvo (ako je uključeno). Analiza NMLR je provedena na betonskim uzorcima, bez redukcijskog sredstva. Sljedeća jednadžba je dobivena za predvidjeti početno slijeganje (*Si*) :

$$\frac{S_i}{S_o} = (1 + R_{LFA})^{0,2}(V_G \cdot \frac{W}{W_0})^3 \cdot v_a^{0,4} \tag{8}$$

gdje je S_0= 300 mm, referentna vrijednost od početnog slijeganja; W_0= 100 kg/m^3, referentna vrijednost udjela sadržaja vode.

Dakle, predloženi model se očekuje da će biti praktičan za određivanje *W* za traženi *Si*, kako je navedeno u sljedećoj jednadžbi:

$$W = \left(\frac{Wo}{Wg}\right) \cdot \left(\frac{1}{1 + R_{LFA}}\right)^{0,067} \cdot \left(\frac{1}{v_a}\right)^{0,133} \cdot \left(\frac{Si}{So}\right)^{0,333} \quad (kg/m^3) \tag{9}$$

Volumni omjer krupnog agregata - Odgovarajući volumen agregata po jedinici volumena betona je neophodan za zadovoljavajuću obradivost u proizvodnji betona. ACI 211,2-98 predlaže empirijske vrijednosti za dizajn V_G po nominalno-maksimalnoj veličini agregata i finoći modula sitnog agregata normalne težine na temelju agregata u suhom stanju. Međutim, W/C, W, prividne gustoće i mase jedinice agregata također značajno utječu na preoblikovanje lakog betona. Osim toga, kako bi se utvrdilo V_G, treba uzeti u obzir je li vrijednost usmjerene veličine γ_{con} ostvariva za zadana fizikalna svojstva agregata i za tlačnu čvrstoću betona. Suha gustoća betona može se opisati na sljedeći način:

$$\gamma_{con} = 1.25C + G_L + F_S + F_L + 120 \quad (\mathrm{kg/m^3}) \tag{10}$$

gdje su C, G_L, F_S, i F_L sadržaji (u kg/m3) cementa, krupnog agregata lagane težine, sitnog agregata normalne težine i sitnog agregat lagane težine, odnosno, po jedinici volumena betona. Konstanta 120 kg/m3 kompenzira razliku između suhe gustoće i izjednačene suhe gustoće, što ovisi o vrsti agregata.

Zaključak - Najbolji pristup prilikom prve izrade probne mješavine lakog betona je koristiti rezultate prethodno ostvarenih doziranja za sličnu vrstu betona pomoću agregata s usporedivim svojstvima. Na temelju sveobuhvaćane baze podataka s 347 rezultata ispitivanja, koje su prikupljene od betonskih miješavina s letećim pepelom ili glinenim agregatom lagane težine, ova analiza pruža jednostavan vodič za doziranje probne miješavine strukturalnog lakog betona. Zbog ograničenog raspona i informacija o podacima, takav pristup je optimiziran za sljedeće uvjete: tlačna čvrstoća betona kretala se između 18 i 50 MPa, suha gustoća betona između 1200 kg/m^3 i 2000 kg/m^3, a maksimalna ukupna veličina zrna je 19

mm ili 25 mm. U svim smjesama, potreban sadržaj zraka bio je 0,035. Ukupno izmjeren sadržaj vlage je 23% za krupni agregat lagane težine, 18% za sitni agregat lagane težine, a 4% za prirodni pijesak. Za ciljane zahtjeve, utvrđeni W/C nalazi se u rasponu između 0,34 i 0,39. Vrijednost V_G postupno se smanjivala kako se smanjivala vrijednost R_{LFA} . Izmjereni pad bio je blizu ciljne vrijednosti.

Na temelju pristupa doziranja za strukturalni lakih beton i validacije usporednih ciljnih zahtjeva i rezultata ispitivanja dobivenih iz određenih doziranja mješavine, mogu se povući sljedeći zaključci:

- Svi laki betoni obično zahtijevaju niži omjer vode i cementa, u odnosu na lake betone s pijeskom, za istu vrijednost čvrstoće.

- Predložena jednadžba za određivanje jedinice sadržaja vode za ciljano slijeganje betona je više u skladu s rezultatima ispitivanja od navedene preporuke u ACI 211,2-98.

- Eksperimentalne vrijednosti betona, koje su dobivene predloženim postupkom doziranja, osobito su blizu ciljanom slijeganju, kompresivnoj čvrstoći i gustoći suhog betona.

4. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

4.1. Uvod

Eksperimentalni dio zadatka je istraživanje koje se temelji na dvije različite vrste samozbijajućih betonskih mješavina. U obje mješavine upotrijebljen je portland cement, laki agregat od Liapora i superplastifikator. Prva mješavina sadrži punilo od mljevene opeke, a druga sadrži punilo od mljevene opeke i silikatnu prašinu..

Provedeno je ispitivanje tečenja, prolaznosti, gustoće te sadržaja zraka u betonu. Tlačna čvrstoća betona ispitana je nakon 7 dana. Na temelju dobivenih rezultata moći će se zaključiti kako koji od dodataka utječe na svojstva betona.

U nastavku slijedi opis istraživanja, odnosno upotrijebljenih materijala, provedenih ispitivanja i dobivenih rezultata.

4.2. Materijali

U pripravljanju pokusnih mješavina betona upotrijebljeni su sljedeći materijali:

- cement *CEM I 42,5R*,
- Liapor lagani agregat frakcija 0 – 2 mm i 4 – 8 mm,
- superplastifikator *FTF*,
- silikatna prašina,
- mljevena opeka.

4.2.1. Cement

Za pripremu mješavina betona upotrijebljen je portlandski cement *CEM I 42,5R*, proizvođač Dalmacijacement, Hrvatska.

CEM I 42,5R je čisti portlandski cement uz dodatak regulatora vezivanja (prirodni gips) i do 5% sporednog dodatka. Namijenjen je pripravi betona za sve građevinske radove koji se izvode u propisanim uvjetima gradnje za najzahtjevnije armirane i nearmirane betonske konstrukcije, za izradu predgotovljenih betonskih elemenata i proizvoda te prednapregnutih betonskih konstrukcija i za izradu visokootpornih betona na habanje. Karakteristike cementa su vrlo visoka rana i konačna čvrstoća, kratak period početka vezivanja, optimalna obradivost te znatan razvoj topline hidratacije. U Tablici 4.1. su prikazana svojstva cementa *CEM I 42,5R.*

Tablica 4.1. Svojstva cementa *CEM I 42,5R* [14]

Mehanička i fizikalna svojstva:	CEM I 42,5R	Zahtjev norme
Početak vezivanja (min)	150	≥ 60
Tlačne čvrstoće nakon 2 dana (MPa)	30	≥ 20
Tlačne čvrstoće nakon 28 dana (MPa)	54	$\geq 42,5$; $\leq 62,5$
Udio sulfata SO_3 (%)	3,5	$\leq 4,0$
Udio klorida Cl^- (%)	0,01	$\leq 0,1$
Gubitak žarenjem (%)	3,0	$\leq 5,0$
Sadržaj netopivog ostatka (%)	1,0	$\leq 5,0$

4.2.2. Agregat

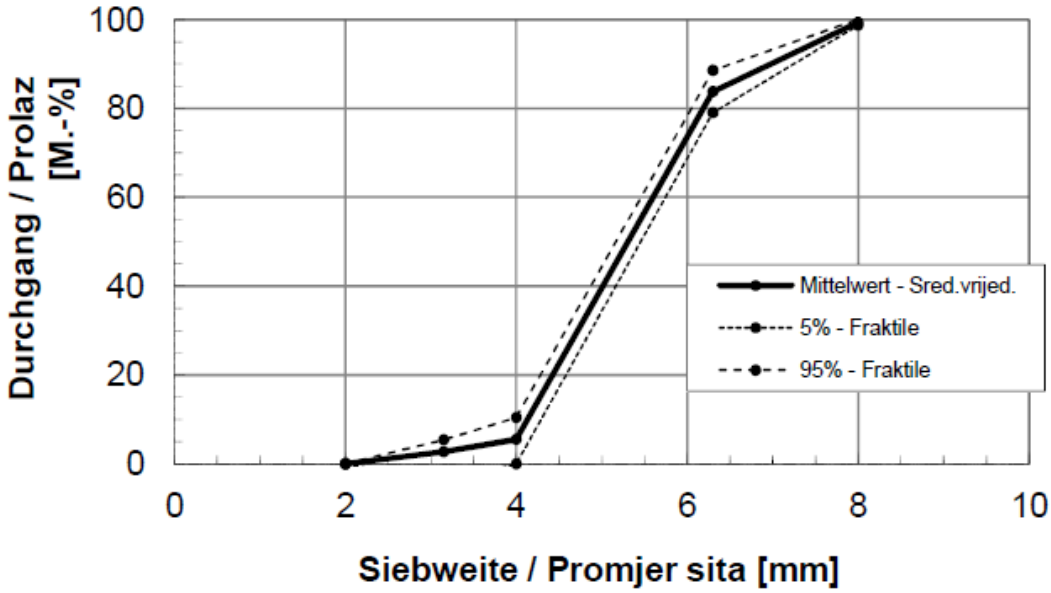
Liapor – Prirodno čista i oko 180 mil. godina stara glina iz razdolja lias, ere jura, kvalitetna je sirovina za liapor proizvode. U liapor proizvodnom procesu prirodna sirovina gline se melje, miješa i oblikuje u kuglice koje su nakon toga podvrgnute tehnološkom procesu pečenja na temperaturi od 1100 – 1200 °C. Pri tome sagorijevaju organski sastojci gline, a kuglice ekspandiraju. U tehnički usavršenom procesu vrlo točno se kontroliraju specifična težina, veličina i tvrdoća kuglice. Tako nastaju kuglice sa zatvorenom strukturom pora, porozne na zrak, potrebne čvrstoće, s visokim svojstvima kao toplinski izolator i istovremeno kao akumulator topline. Liapor proizvodi su nezapaljiv i negoriv građevni materijal, koji se prema standardu DIN 4102 svrstava u najviši požarni razred A1, s neograničenim vijekom trajanja.

Zbog kemijsko – mineraloškog sastava liapor sirove gline i zadanih uvjeta u proizvodnji, liapor kuglice su otporne na vatru, smrzavanje, upijanje vode, lužine i kiseline te na pritisak. Liapor lagani agregati upotrebljavaju se izradu nearmiranih i armiranih laganih betona, kao i za izradu prednapetih laganih betona. Liapor lagani betoni otvaraju arhitektima i projektantima iznenađujuće konstruktivne mogućnosti kod projektiranja i izvedbe vitkih, ekonomično dimenzioniranih, a ipak čvrsto nosivih građevinskih elemenata.

Pokusne mješavine sadrže:

- Liapor F9 – 5 4 – 8,
- Liapor K 0 – 2.

Granulometrijska krivulja i osnovna svojstva Liapora frakcije 4 – 8 mm prikazana su na dijagramu 4.1., odnosno u tablici 4.2..

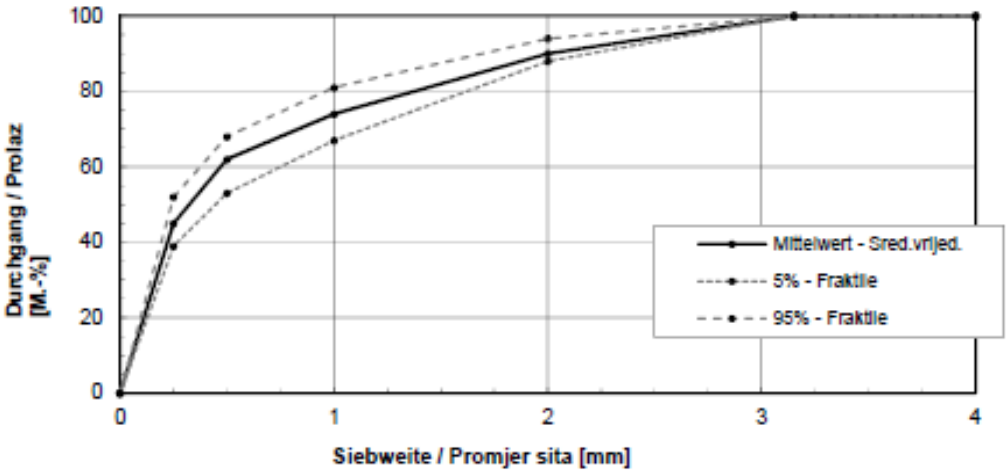


Dijagram 4.1. *Granulometrijska krivulja Liapora frakcije 4 – 8 mm* [8]

Tablica 4.2. *Svojstva Liapora frakcije 4 – 8 mm* [8]

Osnovne osobine	Vrsta materijala	Ekspandirana glina	
	Oblik zrna	Okruglo	
Geometrijske osobine	Granulometrijska grupa	4 - 8	mm
	Sitne čestice (<0,063 mm)	< 1,0	M.-%
Fizikalne osobine	Nasipna gustoća	950 ± 25	kg/m^3
	Specifična gustoća	1700 ± 50	kg/m^3
	Upijanje vode w_{30} (30 min)	8 ± 4	M.-%
	Upijanje vode w_{60} (60 min)	9 ± 4	M.-%
	Tvrdoća zrna (rasuto)	> 17,0	MPa
	Postojanost na smrzavanje	< 4,0	M.-%
Kemijske osobine	Kloridi	< 0,07	M.-%
	Sumporni spojevi SO_3	< 0,4	M.-%
	Ukupni sumpor	< 1,0	M.-%
Kemijski sastav	SiO_2	53 ± 5	%
	Al_2O_3	18 ± 5	%
	Fe_2O_3	15 ± 5	%
	CaO	6 ± 5	%
	Elementi u tragovima	2 ± 2	%

Granulometrijska krivulja i osnovna svojstva Liapora frakcije 0 – 2 mm prikazana su na dijagramu 4.2., odnosno u tablici 4.3..



Dijagram 4.2. *Granulometrijska krivulja Liapora frakcije 0 – 2 mm* [9]

Tablica 4.3. *Svojstva Liapora frakcije 0 – 2 mm* [9]

Osnovne osobine	Vrsta materijala	Ekspandirana glina	
	Oblik zrna	Lomljeno	
Geometrijske osobine	Granulometrijska grupa	0 - 2	mm
	Sitne čestice (<0,063 mm)	< 30	M.-%
Fizikalne osobine	Nasipna gustoća	800 ± 15	kg/m^3
	Specifična gustoća	1770 ± 10	kg/m^3
	Upijanje vode w_{BVK}	25 - 35	M.-%
Kemijske osobine	Kloridi	< 0,02	M.-%
	Sumporni spojevi SO_3	< 0,8	M.-%
	Ukupni sumpor	< 1,0	M.-%
Kemijski sastav	SiO_2	55 ± 5	%
	Al_2O_3	24 ± 5	%
	Fe_2O_3	14 ± 5	%
	CaO	5 ± 5	%
	Elementi u tragovima	2 ± 2	%

4.2.3. Dodaci betonu

Superplastifikator FTF - Superplastifikator je dodatak koji omogućuje veliko smanjenje vode određenoj betonskoj mješavini, a da pri tome ne mijenja njezinu obradivost ili koji omogućuje veliko poboljšanje obradivosti, a da se ne mijenja sadržaj vode.
Superplastifikator može istodobno izazvati i oba spomenuta učinka.
Superplastifikator FTF nudi sljedeće prednosti za standardne betone visoke čvrstoće i samozbijajuće betone:

- optimizirana obrada s iznimno niskim vodocementnim faktorom,
- visoko početno tečenje s malim dozama,
- ekstremno visoke rane čvrstoće,
- homogenost svježeg betona.

Tablica 4.4. *Osnovna svojstva superplastifikatora FTF* [10]

oblik	tekućina
boja	narančasta
gustoća (20ºC)	1,07 ± 0,02g/cm^3
pH vrijednost	3,0 – 5,0
sadržaj klorida	≤ 0,1 %
preporučena doza	0,2 – 1,0 % na ukupnu količinu veziva
maksimalna doza	1,2 % na ukupnu količinu veziva

Silikatna prašina - Silikatna prašina je mineralni dodatak betonu koji aktivno sudjeluje u hidrataciji cementa te predstavlja jedan od najkvalitetnijih pucolana. Na svojstva betona djeluje preko pucolanskih reakcija kojima se povećava količina C-S-H, te pomoću sitnih čestica koje doprinose poboljšanju obradljivosti i povećanju kohezivnosti i zapunjuju unutrašnju strukturu jer su znatno sitnije od čestica cementa.

U izradi pokusnih mješavina upotrijebljena je *Meyco MS 610,* posebna visoko kvalitetna mikrosilika, koja je kao dodatak izrazito kvalitatnim betonima odobrena prema ASTM propisu. Ona u potpunosti mijenja poroznu strukturu betona te čini strukturu gušćom i otpornijom na bilo kakave vanjske utjecaje. Mikrosilika Meyco MS 610 koristi se za proizvodnju dugotrajnih, izdržljivih betona, odnosno betona visoke čvrstoće, pumpanih betona, lijevanih betona, podvodnih betona, betona s malim sadržajem cementa itd.

Meyco MS 610 mora se upotrijebiti u kombinaciji s plastifikatorom ili superplastifikatorom. Dodaje se betonu tijekom doziranja i to u količini 5 – 15% od mase cementa, a minimalno vrijeme miješanja je 90 sekundi.

Meyco MS 610 ima razna djelovanja, a to su:

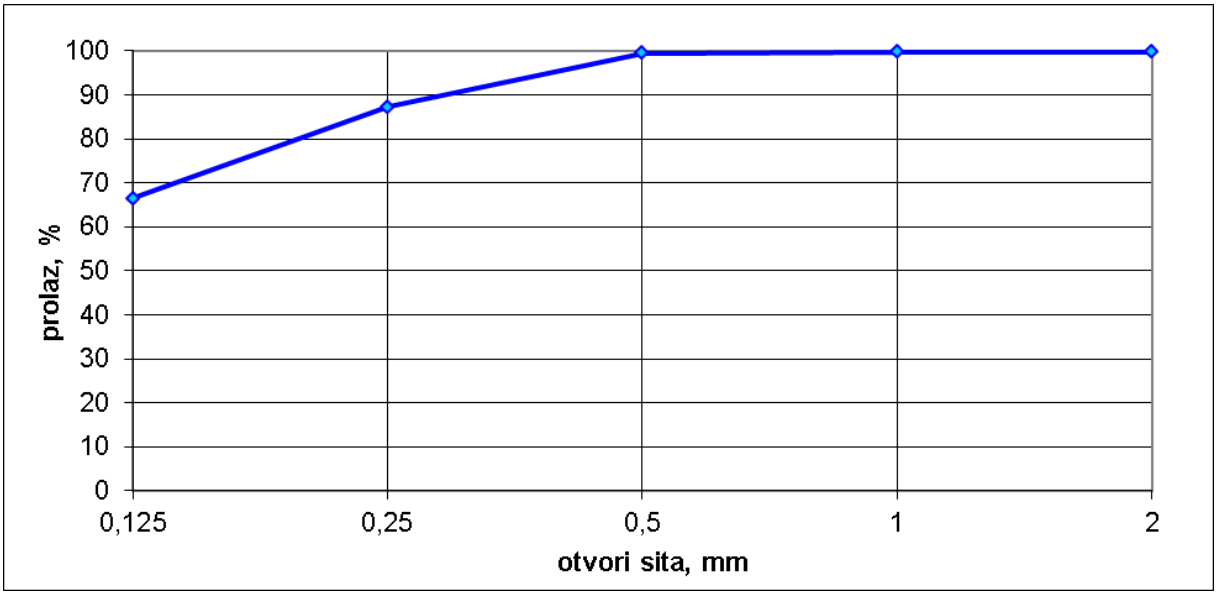
- povećava čvrstoću,
- poboljšava otpornost na kemijske i mehaničke štetne utjecaje,
- sprječava segregaciju svježeg betona,
- smanjuje količinu ubrzivača.

Osnovni tehnički podaci o silikatnoj prašini Meyco MS 610 prikazani su u tablici 4.5.

Tablica 4.5. *Osnovna svojstva Meyco MS 610 mikrosilike* [11]

Tehnički podaci	
Oblik	Prah
Boja	Siva
Gustoća	0,55 - 0,70 kg/l
Udio klorida	< 0,1 %

Mljevena opeka- Mljevena opeka je nastala mljevenjem opeke u mlinu sa kuglama. Dobiveni materijal je podijeljen u 2 frakcije: < 0.125 mm i > 0.125 mm. Frakcija < 0,125 se koristila kao filer a frakcija > 0.125 mm kao dio agregata. Gustoća joj je 2,00 g/cm^3. Za pokusne mješavine se koristila frakcija < 0.125.



Dijagram 4.3. Granulometrijski sastav mljevene opeke [12]

4.3. Proračun sastava betona

Izrađene su dvije mješavine betona, a recepture su prikazane u tablici 4.6..

Tablica 4.6. *Sastav mješavina*

Sastav (kg)	LB1	LB2
Cement	400	400
Voda	180	200
Silikatna prašina	0	37
Mljevena opeka	65,3	31,9
Superplastifikator	4,7	4,8
Liapor 0-2 mm	498	498,5
Liapor 4-8 mm	513,3	513,7

Potrebne količine komponenti, koje čine sastav betona, za obje mješavine izmjerene su na preciznoj vagi. Vrijeme miješanja je 6 min.



Slika 4.1. *Mješalica betona* [4]

4.4. Ispitivanja provedena na pokusnim mješavinama

4.4.1. V-lijevak (V-funnel)

V-funnel test se koristi za određivanje viskoznosti i svojstava popunjavanja samozbijajućeg betona. V- funnel se popuni svježim betonom te se mjeri vrijeme za potpuno istjecanje betona iz lijevka, slika 4.2..



Slika 4.2. *V- lijevak test (V- funnel)* [2]

Postupak ispitivanja

Potrebno je očistiti lijevak te navlažiti sve unutarnje površine. Lijevak treba postaviti vertikalno sa horizontalnim gornjim otvorom. Vrata se zatvore te se postavi kanta za primanje uzorka betona prilikom njegovog istjecanja. Lijevak se napuni betonom te se poravna njegova gornja površina. Nakon počeka od (10±2) sekunde vrata se naglo otvore te se istodobno uključi štoperica. Beton istječe iz lijevka te se štoperica zaustavlja čim se ugleda otvor vertikalno kroz lijevak. Izmjereno vrijeme se definira kao vrijeme istjecanja betona i izražava se u sekundama. Indeks viskoznosti dobije se kao R_c =10/t, gdje je t vrijeme istjecanja uzorka. Za manje vrijednosti R_c viskoznost uzorka je veća i obratno.

Rezultati ispitivanja

LB1- t = 6,96 s ; *LB2*- t = 7,31 s ;

R_{c1} = 1,44 R_{c2} = 1,37

Na temelju rezultata mjerenja, mješavine betona mogu dobiti oznake konzistencije prema razredima Europskog udruženja EFNARC-a, tablica 4.7.

Tablica 4.7. *Razastiranje, viskoznost i sposobnost prolaženja prema EFNARC-u*

Slump-flow (mm)	SF1	550-650
	SF2	660-750
	SF3	760-850
T 50 (s)	VS1	≤ 2
	VS2	> 2
V-funnel (s)	VF1	≤ 9
	VF2	9 - 25
L – box	PL1	≥ 0,80 (2 rebra)
	PL2	≥ 0,80 (3 rebra)
J - ring	PJ1	≤ 10 (12 rebara)
	PJ2	≤ 10 (16 rebara)

Cilj ispitivanja je bio postići vrijeme istjecanja t od 2-12 s.

Iz priloženih rezultata se može vidjeti da su obje mješavine pokazale optimalne rezultate istjecanja.

Prema EFNARC- u, mješavine LB1 i LB2 pripadaju razredu VF1.

4.4.2. Metoda razastiranja (Slump-flow)

Metoda razastiranja se koristi kod određivanja tečenja i samozbijanja betona, odnosno njegove deformabilnosti. Mjere se dva parametra: veličina rasprostiranja i vrijeme rasprostiranja (za T50). Test nije prikladan za zrna agregata veća od 40 mm.

Postupak ispitivanja

Ploča se postavi na ravnu i stabilnu površinu i navlaži se spužvom ili krpom. Također se navlaže unutarnje površine stošca te se postavi u centar ploče. Stožac se popuni svježim betonom bez ikakvog nabijanja i vibriranja te se poravna gornja površina betona.
Nakon počeka od otprilike 30 sekunda, stožac se podigne vertikalno na način da beton isteče u svim smjerovima. Mjerenje vremena širenja počinje u trenutku kad stožac otpusti beton. Štoperica se zaustavi čim beton dosegne krug promjera 500 mm. Izmjereno vrijeme T50 se izražava u sekundama. Test je završen kad se beton prestane širiti. Izmjeri se najveći promjer razasutog betona d_{max} te promjer okomit na njega d_{perp}.



Slika 4.3. *Mjerenje promjera razastiranja* [2]

Rezultati ispitivanja

Promjer rasprostiranja S definira se kao srednja vrijednost dva izmjerena promjera d_{max} *i* d_{perp}.

LB1- $d_{max=}$ 770 mm, $d_{perp=}$ 755 mm, S= 752,5 mm

T50= 1,16 s

LB2- $d_{max=}$ 660 mm, $d_{perp=}$ 650 mm, S= 655 mm

T50= 2,47 s

Prema EFNARC- u, mješavina LB1 pripada razredima SF2 i VS1, a mješavina LB2 razredima SF1 i VS2.

4.4.3. L-box test

L-box aparaturom ispituje se sposobnost prolaska betona kroz uske prostore između šipki armature. Sposobnost prolaska definira se visinom i duljinom koju beton zauzme prilikom tečenja. Postoje dva tipa L-box uređaja ovisno o preprekama, jedan sa 3 glatke šipke i drugi sa 2 glatke šipke profila Ø12 mm, slika 4.4.. Šipke su na međusobnom razmaku 41 mm, odnosno 59 mm.

Postupak ispitivanja

L-box uređaj se postavi na ravnu horizontalnu podlogu. Vertikalni dio uređaja se popuni svježim betonom. Nakon 10 sekunda klizna vrata se podignu te se pričeka dok se beton ne zaustavi prilikom tečenja iz vertikalnog dijela u horizontalni. Izmjeri se visinska razlika na kraju uređaja između površine betona i gornjeg dijela uređaja na 3 mjesta, dva na krajevima i jedan u sredini, te se izračuna njihova prosječna vrijednost Δh.



Slika 4.4. *L- box uređaj* [*slika zabilježena tijekom ispitivanja*]

Rezultati ispitivanja

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.8..

Tablica 4.8. *Rezultati ispitivanja L- posudom*

LB	ΔH_{11} (mm)	ΔH_{12} (mm)	ΔH_{13} (mm)	ΔH_{1sr} (mm)	ΔH_{21} (mm)	ΔH_{22} (mm)	ΔH_{23} (mm)	ΔH_{2sr} (mm)	H_1=600- ΔH_{1sr} (mm)	H_2=150- ΔH_{2sr} (mm)	Pl=H_2/H_1 (mm)
LB1	500	510	505	505	60	60	60	60	95	90	0,94
LB2	500	505	500	502	70	65	70	68	98	82	0,84

Kako bi se postigla dovoljno dobra sposobnost zaobilaženja prepreka, potrebno je da beton ima dovoljno paste i da mu se osigura viskoznost. Obje mješavine su pokazale zadovoljavajuće svojstvo zaobilaženja prepreka.

U skladu s EFNARC standardima, mješavine LB1 i LB2 spadaju u klasu PL2.

4.4.4. J- prsten (J- ring)

Ovim se testom istražuje svojstvo popunjivosti i prolaznosti samozbijajućih betona. Može se koristiti i za ispitivanje otpornosti prema segregaciji usporedbom dva uzorka. Mogu se dobiti tri parametra: razastiranje, vrijeme razastiranja i stopa blokiranja. Razastiranje kod

J-prstena odnosi se na deformaciju betona dok se potrebno vrijeme razastiranja odnosi na brzinu deformacije.

Postupak ispitivanja

Navlažena ploča se postavi na ravnu površinu. Unutarnje površine stošca se također navlaže te se on postavi u centar kruga od 200 mm. J- prsten se položi oko stošca. Stožac se napuni uzorkom samozbijajućeg betona i nakon 30 sekunda se podigne i uključi se štoperica. Štopericu je potrebno zaustaviti kad beton dosegne krug od 500 mm.

Izmjereno vrijeme se označava s $T50_J$. Ravna strana šipke se postavi na J- prsten i izmjeri se relativna visinska razlika između donjeg dijela šipke i površine betona u središtu Δh_0 i četiri visinske razlike van prstena u okomitim smjerovima Δh_{x1}, Δh_{x2}, Δh_{y1} i Δh_{y2}.
Izmjeri se najveći promjer razastiranja te promjer okomit na njega.



Slika 4.5. *Ispitivanje J- prstenom* [*slika zabilježena tijekom ispitivanja*]

Rezultati ispitivanja

Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 4.9..

Tablica 4.9. *Rezultati ispitivanja J- prstenom*

LB	*LB1*	*LB2*
T_{50J}	2,15	7,31
Δh_0	11,5 cm	10 cm
Δhx_1	13 cm	13,8 cm
Δhx_2	13 cm	12,5 cm
Δhy_1	13 cm	12,9 cm
Δhy_2	13 cm	13,5 cm
d1	750 mm	560 mm
d2	700 mm	540 mm

PJ = $(\Delta hx_1 + \Delta hx_2 + \Delta hy_1 + \Delta hy_2) / 4 - \Delta h_0$

LB1 – PJ = 1,5 cm

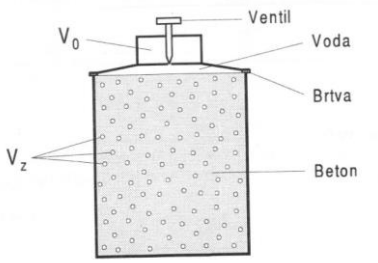
LB2 – PJ = 3,17 cm

Kod obje mješavine javlja se segregacija krupnog agregata u sredini prstena te blago odvajanje vode na rubovima.

Također, obje mješavine spadaju u razred PJ2, prema standardima EFNARC-a.

4.4.5. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu

Sadržaj zraka u svježem betonu ispituje se metodom pomoću porometra. Porometar se sastoji od čvrste, valjkaste posude volumena 8 dm^3 i poklopca na kojem je mali rezervoar zraka volumena V_0, manometar, ručna pumpa i ventil (slika 4.6.)



Slika 4.6. *Shema manometra* [1]

Postupak ispitivanja

Posuda i poklopac se prije ispitivanja lagano navlaže, tako da na površinama nema slobodne vode. Beton se zbije u posudu pomoću uranjajućeg vibratora. Zatim se površina betona poravna i pokrije poklopcem. Između poklopca i betona nalije se voda da se ispuni prazan prostor između betona. U rezervoar se napumpa zrak, zatim se otvori ventil i dio zraka se ispusti u donju posudu, te se pritisak u posudi i rezervoaru izjednači. Manometar porometra je baždaren tako da se direktno očita sadržaj zraka u % volumena posude za beton.

Rezultati ispitivanja

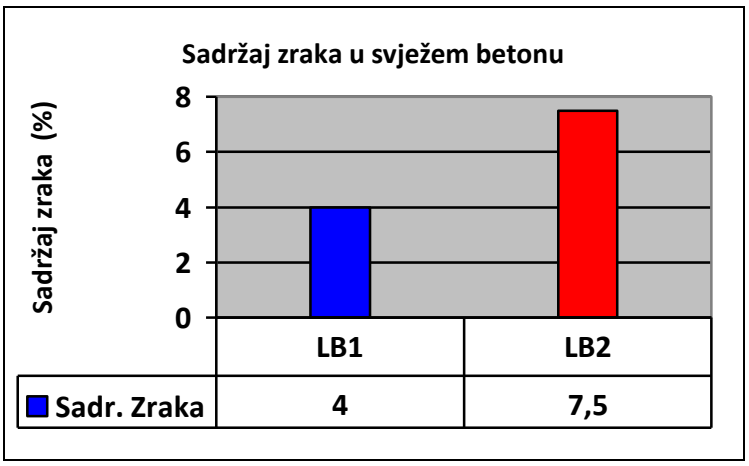
U dobro sastavljenom svježem betonu neizbježna količina zahvaćenog zraka ne prelazi 2 do 5 % volumena betona. To su nepoželjne šupljine u betonu. Međutim, uporabom dodataka u betonu sadržaj zraka se povećava i na količinu 3,8 do 8%.



Slika 4.7. *Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu pomoću porometra[slika zabilježena tijekom ispitivanja]*

LB1- 4,0 %

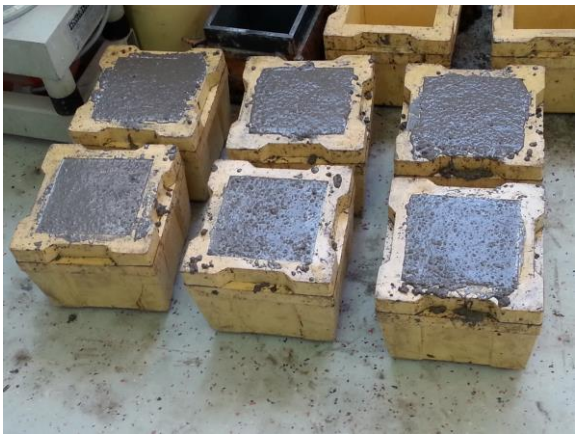
LB2- 7,5 %



Dijagram 4.4. *Sadržaj zraka u svježem betonu*

4.4.6. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Nakon završetka prethodnih ispitivanja, beton je ugrađen u kalupe kako bi se dobili uzorci kocaka dimenzija 15x15x15 cm. Uzorci stoje u kalupima 24 sata i to u kontroliranim uvjetima, odnosno pri relativnoj vlažnosti zraka većoj od 90% i na temperaturi 20 ±ºC. Nakon 24 sata uzorci se vade iz kalupa i potapaju u vodu gdje se čuvaju do dana ispitivanja. Na dan ispitivanja se obrišu tako da im površina bude suha i zatim se važu. Nakon toga su spremni za ispitivanje. Tlačna čvrstoća je ispitana na zasićenim, površinski suhim uzorcima pomoću preše za određivanje tlačne čvrstoće betona, prema propisima. Uzorak se stavi u prešu i opterećuje do sloma, a zatim se očita naprezanje i sila u uzorku u trenutku sloma. Ispitivanje je provedeno nakon 7 dana. Za svako ispitivanje su napravljene po 3 kocke. Kvaliteta uzoraka varira, pa se prilikom obrade rezultata kao mjerodavna vrijednost uzima srednja vrijednost od 3 uzorka.

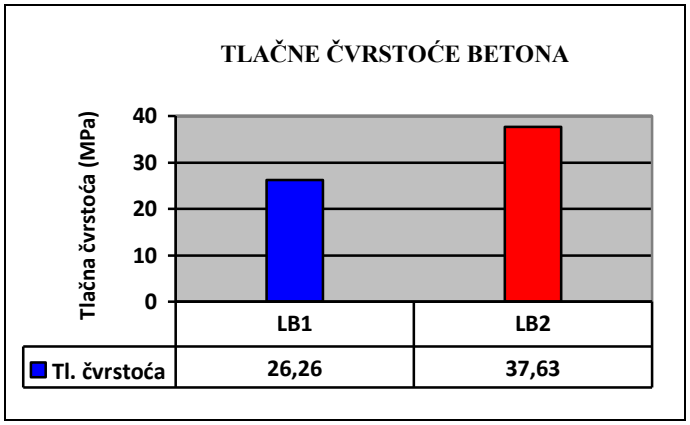


Slika 4.8. *Uzorci svježeg betona* [*slika zabilježena tijekom ispitivanja*]

Rezultati ispitivanja

Tablica 4.10. *Rezultati ispitvanja tlačne čvrstoće i sile pri lomu*

Mješavina	Tlačna čvrstoća, f_o (MPa)	Sila u trenutku loma, F (N)
LB1	26,26	591,2
LB2	37,63	846,57



Dijagram 4.5. *Tlačne čvrstoće betona nakon 7 dana*

Gledajući općenito, obje mješavine su postigle zadovoljavajuće rane čvrstoće s obzirom da se radi o lakim betonima. Razlog tome je upotreba kvalitetnog cementa visoke čvrstoće, ali se može pretpostaviti da tlačna čvrstoća lakog betona ipak ovisi o čvrstoći i kvaliteti lakog agregata, što je jedan od najvažnijih zaključaka svih dosadašnjih ispitivanja. U ovom slučaju to je Liapor lagani agregat koji se odlikuje izrazto visokim svojstvima čvrstoće i trajnosti. Obje mješavine imaju sličan sastav, s tim da je mješavina LB2 izrađena sa silikatnom prašinom, što opravdava i veću postignutu ranu čvrstoću ove mješavine.



Slika 4.9. *Ispitivanje tlačne čvrstoće [slika zabilježena tijekom ispitivanja]*

4.4.7. Ispitivanje ultrazvukom

Određivanje brzine longitudinalnog ultrazvučnog impulsa je provedeno prema odgovarajućoj normi. Uređaj za određivanje brzine ultrazvučnog impulsa se sastoji od generatora, para pretvarača, pojačala i elektroničkog uređaja za mjerenje vremenskog intervala utrošenog između početka impulsa generiranog predajnim pretvaračem i početka njegovog dolaska na prijemni pretvarač. U ovom radu, mjerenje je provedeno na laboratorijskim uzorcima oblika kocke, brida 15 cm.

Rezultati ispitivanja

Mjereno je vrijeme širenja ultrazvuka kroz betonske uzorke u tri točke. Kao rezultat se navodi srednja vrijednost svih dobivenih vrijednosti.

LB1 - t = 43,24 μs, v = 3469 m/s , ρ = 1794, 37 kg/m^3

LB2 - t = 42,07 μs, v = 3565 m/s, ρ = 1780,35 kg/m^3

Dinamički modul elastičnosti izračunava se kao:

$E_{din} = v^2 \times [(1+\nu) \times (1-\nu)] / (1-\nu)$

Za LB1, $E_{din=}$ 19,43 GPa

Za LB2, $E_{din=}$ 20,36 GPa

5. ZAKLJUČAK

Laki betoni se već dugi niz godina koriste kao konstruktivni betoni. Za takvu primjenu lakog betona često je važnija gustoća betona od njegove čvrstoće. Smanjena gustoća za istu razinu čvrstoće dopušta uštede u stalnom opterećenju kod projektiranja konstrukcija i temelja. Dosadašnja istraživanja pokazuju da se mehanička svojstva normalnih betona znatno razlikuju od svojstava lakih betona. Također, obilježja agregata su puno važnija za svojstva lakog betona, stoga je za proizvodnu lakog betona visoke čvrstoće bitno pružiti podatke o svojstvima agregata.

Samozbijajući beton može ispuniti svako mjesto i svaki kut u oplati samo pod djelovanjem vlastite težine i bez potrebe za vibriranjem. Kako bi se postiglo svojstvo samozbijanja, pasta, mort i beton u cjelini moraju biti stabilni i konzistencije unutar određenih granica. Beton se mora lako preoblikovati, a da pri tome ne dolazi do segregacija na bilo kojem nivou veličine zrna. Visoka trajnost postiže se izborom niskog vodovezivnog faktora, što je moguće jedino upotrebom superplastifikatora.

U svrhu ovog završnog rada provedeno je testiranje koje se temelji na 2 različite mješavine lakog samozbijajućeg betona. U obje mješavine je upotrebljen portland cement i superplastifikator i obje se baziraju na Liapor laganom agregatu frakcije 0 – 2 mm i 4 – 8 mm. Jedna mješavina je napravljena s dodatkom mljevene opeke (LB1), a jedna s dodatkom mljevene opeke i silikatne prašine (LB2).

Volumenske mase betona se kreću od 1780,35 kg/m^3 do 1794,37 kg/m^3, što je prihvatljivo za lake betone.

Rane čvrstoće betona (nakon 7 dana) se kreću od 26 – 37 MPa. Veću čvrstoću postigao je beton s dodatkom silikatne prašine. Gledajući općenito, mješavine su postigle zadovoljavajuće čvrstoće s obzirom da se radi o lakim betonima. Razlog tome je upotreba kvalitetnog cementa visoke čvrstoće, ali se može pretpostaviti da tlačna čvrstoća lakog betona ipak u najvećoj mjeri ovisi o čvrstoći i kvaliteti lakog agregata, što je jedan od najvažnijih

zaključaka svih dosadašnjih ispitivanja. U ovom slučaju to je Liapor lagani agregat koji se odlikuje izrazito visokim svojstvima čvrstoće i trajnosti.

S obzirom na konzistenciju betona, obje mješavine su gubile na obradljivosti. Loša obradljivost je posljedica velikog upijanja liapora, a dovodi u pitanje mogućnost ugradbe i upotrebe ovih betona. Posebno se ističe mješavina s dodatkom silikatne prašine (LB2), koja je s vremenom postala ljepljiva. Također, pokazala je nešto duže vrijeme istjecanja iz V- lijevka, manji promjer razastiranja i dosta veći udio zraka, u odnosu na mješavinu LB1. Razlog tomu je vjerojatno veća specifična površina silikatne prašine koja traži veću količinu vode. Međutim, povećanjem količine vode bi se izgubila stabilnost mješavine, a time bi najvjerojatnije opala i čvrstoća betona. Stoga je u budućim istraživanjima potrebno detaljnije ispitati svojstva i ponašanje lakog agregata.

6. LITERATURA

[1] Krstulović P.: Svojstva i tehnologija betona, Građevinsko – arhitektonski fakultet sveučilišta u Splitu i Institut građevinarstva Hrvatske, Split, 2000.

[2] Juradin S., Krstulović P.: Samozbijajući beton; Predavanja iz Građevinskih materijala 2, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije sveučilišta u Splitu.

[3] Juradin S.: Predavanja iz Građevinskih materijala 1, Fakultet građevinarstva arhitekture i geodezije sveučilišta u Splitu.

[4] Vukoje S.: Diplomski rad (tema: Laki beton visoke čvrstoće), Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije sveučilišta u Splitu, Split 2012.

[5] Niyazi Ugur Kockal, Turan Ozturan: Strength and elastic properties of structural lightweight concretes, *Materials and Design, 32 (2011), 2396 – 2403, 2010.*

[6] L.H. Nguyen, A.-L. Beaucour, S. Ortola, A. Noumowe: Influence oft he volume fraction and the nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concrete, *Construction and Building Materials 51 (2014), 121 – 132, 2013.*

[7] Keun-Hyeck Yang, Gwang-Hee Kim, Yong-Hwa Choi: An initial trial mixture proportioning procedure for structural lightweight aggregate concrete, , *Construction and Building Materials 55 (2014), 431 – 439, 2014.*

[8] Tehnički list za Liapor F9 - 5 4 – 8

[9] Tehnički list za Liapor K 0 – 2

[10] Tehnički list za Readyplast FTF1

[11] Tehnički opis za silikatnu prašinu Meyco MS 610

[12] Tehnički opis za mljevenu opeku

[13] http://www.en.wikipedia.org/wiki/Vermiculite

[14] http://www.cemex.hr/CEMI42,5R.aspx