Laki samozbijajući beton s dodatkom mljevene opeke

Lovrić, Mislav

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:123:862174

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-28**

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

Mislav Lovrić

Split, 2014.

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Mislav Lovrić

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:	**Mislav Lovrić**
BROJ INDEKSA:	**3978**
KATEDRA:	**Katedra za građevinske materijale**
PREDMET:	**Građevinski materijali I**

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Tema: Laki samozbijajući beton s dodatkom mljevene opeke

Opis zadatka: Zadatak kandidata je proučiti lake i lake samozbijajuće betone. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi mješavinu lakog samozbijajućeg betona s dodatkom mljevene opeke kao agregata 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 concrete

SADRŽAJ

1. LAKI BETONI 1
1.1. SVOJSTVA I UPOTREBA LAKOG BETONA 2
2. MATERIJALI ZA IZRADU LAKIH BETONA 3
2.1. AGREGATI 3
2.1.1. Prirodni laki agregati 3
2.1.2. Ekspandirani i pečeni (umjetni) laki agregat 4
2.1.3. Sekundarne sirovine 9
2.2. VEZIVA ZA IZRADU LAKIH BETONA 9
2.3. DODACI LAKIM BETONIMA 10
3. VRSTE LAKIH BETONA 11
3.1. LAKI BETONI OD JEDNAKOZRNATOG AGREGATA 11
3.2. LAKOAGREGATNI BETONI 11
3.2.1. Toplinsko – izolacijski laki beton 12
3.2.2. Konstrukcijsko – izolacijski laki beton 13
3.2.3. Konstrukcijski laki beton 13
3.3. ĆELIJASTI BETON 14
3.3.1. Plinobetoni 14
3.3.2. Pjenobetoni 16
4. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA LAKIH BETONA 17
4.1. ČVRSTOĆA I ELASTIČNA SVOJSTVA LAKIH BETONA 17
4.1.1. Ispitivanje provedeno na agregatima 17
4.1.2. Proizvodnja standardnih i lakih betona 18
4.1.3. Ispitivanja provedena na svježim i očvrslim betonima 18
4.1.4. Rezultati ispitivanja i komentari 19
4.1.5. Zaključak 21
4.2. UTJECAJ VOLUMENA FRAKCIJA LAKOG AGREGATA NA TOPLINSKA I MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA 22
4.2.1. Fizička svojstva lakog agregata 22
4.2.2. Utjecaj lakog agregata na svojstva betona 24
4.2.3. Zaključak 26
4.3. POČETNO ISPITIVANJE MJEŠAVINE BETONA S LAGANIM AGREGATOM 27
4.3.1. Podaci LWAC 27

4.3.2. Formuliranje jednadžbe 28
4.3.3. Zaključak 31
5. EKSPERIMENTALNI DIO – LAKI SAMOZBIJAJUĆI BETON 32
5.1. UVOD 32
5.2. MATERIJALI 33
5.2.1. Cement 33
5.2.2. Agregati 34
5.2.3. Mljevena opeka 38
5.2.4. Kameno brašno 38
5.2.5. Superplastifikator FTF 38
5.3. PRORAČUN SASTAVA BETONA 39
5.4. NAČIN PRIPRAVE 39
5.5. ISPITIVANJA PROVEDENA NA POKUSNIM MJEŠAVINAMA 40
5.5.1. V-lijevak (V-funnel) 40
5.5.2. Metoda razastiranja (Slump-flow) 41
5.5.3. L-box test 42
5.5.4. J-Ring 43
5.5.5. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu 44
5.5.6. Ispitivanje tlačne čvrstoće 45
5.6. REZULTATI ISPITIVANJA 46
5.6.1. V-lijevak (V-funnel) 47
5.6.2. Metoda razastiranja (Slump-flow) 47
5.6.3. L-box test 48
5.6.4. J-prsten (J-ring) 49
5.6.5. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu 51
5.6.6. Ispitivanje tlačne čvrstoće 51
5.6.7. Dinamički modul elastičnosti 53
6. ZAKLJUČAK 54
LITERATURA 56

1. LAKI BETONI

Gustoća lakih betona se najčešće kreće u rasponu od 600 do 1500 kg/m^3, ponekad i do 2000 kg/m^3, dok se gustoća normalnog betona kreće oko 2400 – 2500 kg/m^3. Smanjene gustoće u odnosu na normalni beton, postižu se na sljedeći način:

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

Zbog povećanog sadržaja pora, laki betoni imaju manju čvrstoću i otpornost na habanje u odnosu na normalni beton, međutim s druge strane postoji više prednosti, kao što su manja volumna masa i izolacijska svojstva. Trajnost lakih betona može biti ista kao i kod običnog betona. Laki betoni su skuplji, a proizvodnja, transport i sama ugradnja zahtijevaju više pažnje, upravo da bi se postigla zahtijevana kakvoća. U cjelini, prednosti lakog betona ipak nadmašuju spomenute nedostatke.

Prema načinu postizanja manje volumne mase, laki betoni se dijele na:

- laki beton od jednakozrnatog agregata
- lakoagregatni beton
- ćelijasti beton

Prema namjeni laki betoni se dijele na:

- konstrukcijski
- konstrukcijisko-izolacijski
- izolacijski

1.1. SVOJSTVA I UPOTREBA LAKOG BETONA

Laki betoni su krtiji, te imaju manji modul elastičnosti u odnosu na običan beton. Ponašaju se gotovo linearno elastično, sve do sloma. Kakvoća lakih betona varira više nego kod običnih betona. Količine cementa za $1m^3$ lakog betona su i do 70% veće od onih potrebnih za $1m^3$ običnog betona.

Kod primjene lakog betona kao konstruktivnog betona često je važnija njegova gustoća nego čvrstoća. Smanjena gustoća, za istu razinu čvrstoće, omogućuje uštede na stalnom opterećenju kod projektiranja konstrukcija i temelja.

Laki beton je dobar toplinski izolator, samo ako je dovoljno suh. Povećanjem vlažnosti, njegova se vodljivost povećava. Izolacijska svojstva također ovise i o čvrstoći betona. Čim je manja čvrstoća lakog betona, bolja su njegova izolacijska svojstva i obratno. Najbolja toplinsko – izolacijska svojstva ima beton ili mort s agregatom od perlita, vermikulita ili ekspandiranog polimernog materijala. Gustoća mu iznosi 300 – 600 kg/m^3, a čvrstoća najčešće od 1 MPa.

Najveću čvrstoću postiže beton s agregatom od ekspandirane pečene gline ili zgure, te s agregatom prirodnog porijekla. Takav beton koristi se za izradu lakih nosivih konstrukcija, ali djeluje i kao toplinska izolacija. Koeficijent toplinske vodljivosti mu je do 4 puta manji u odnosu na obični beton. Za izradu konstrukcija pogodnim se pokazao i jednozrnati beton, čija gustoća iznosi od 1200 – 2000 kg/m^3, a tlačna čvrstoća preko 15 MPa.

Jednozrnati beton od lakog agregata, plinobeton i pjenobeton postižu znatno manje čvrstoće. Tlačna čvrstoća iznosi od 3,5 – 10 MPa, a gustoća od 600 – 1200 kg/m^3. Ovi betoni imaju bolja toplinsko – izolacijska svojstva od prethodno opisanog betona za lake nosive konstrukcije.

Kod lakih betona javlja se veliko skupljanje i bubrenje, pogotovo kod betona od lakog agregata. Skupljanje i bubrenje kod lakog betona dovodi do stvaranja mrežastih pukotina koje nastaju nekoliko tjedana ili mjeseci nakon očvršćivanja. Na skupljanje lakih betona mogu utjecati voda, cement i dodaci, a osobito vrsta i kvaliteta agregata.

Bubrenje lakog betona nastaje uslijed povećanja debljine vodenog omotača u periodu kada kristalni spojevi nisu još dobili dovoljnu čvrstoću, a od trenutka kada kristalni spojevi očvrsnu bubrenje se smanjuje. U očvrslom betonu bubrenje nastaje zbog povećanja razdvajajućeg utjecaja vode u prostoru između zrna i finih kapilara.

Puzanje lakog betona je znatno veće nego kod običnog betona.

2. MATERIJALI ZA IZRADU LAKIH BETONA

2.1. AGREGATI

2.1.1. Prirodni laki agregati

Prirodni laki agregati mogu biti sedimentnog ili vulkanskog porijekla. Glavno obilježje ovih agregata je visok stupanj poroznosti.

Agregati sedimentnog porijekla spadaju u sedimentne stijene i pretežno su silikatnog sastava. Na njihovoj maloj zapreminskoj težini možemo zahvaliti velikoj količini pora i šupljina. Upravo iz tog razloga su idealni za izradu lakog betona male čvrstoće koji služi isključivo kao izolacijski beton. Također, zbog svoje velike poroznosti ova vrsta agregata zahtijeva mnogo vode prilikom izrade betona. Na ovo treba obratiti veliku pažnju i poduzeti odgovarajuće mjere, kako ne bi došlo do velikog skupljanja i stvaranja pukotina. Najpoznatija vrsta ovog agregata su dijatomiti, a nalazišta su im u Alžiru i Francuskoj. Međutim betoni, sa dijatomitima nemaju veliku primjenu.

Agregati vulkanskog podrijetla, odnosno njegovi predstavnici plovučac i prirodni porozni pucolani, međusobno se razlikuju po sastavu i strukturi. Plovučac nastaje pri brzom hlađenju lave, porozan je, a zrna mogu biti veličine od 1 do 40 mm. Poroznost mu se može smanjiti pečenjem, gdje se na površini zrna stvara opna koja smanjuje poroznost, a povećava čvrstoću i težinu. Plovučac pretežito sadrži SiO_2. Pored pečenog dijatomita, od prirodnih agregata, plovučac prestavlja najbolji agregat. Nalazišta plovučca su u Njemačkoj, Francuskoj i SAD-u.

Pucolani nastaju laganim hlađenjem lave i sa velikim sadržajem uključenih plinova. Pore su znatno krupnije i nepravilnijeg oblika kod pucolana nego kod plovučca. Dakle, pucolan je porozniji materijal s manjom čvrstoćom u odnosu na plovučac. Pucolani imaju ćelijastu strukturu i sadrže pretežno SiO_2 i Al_2O_3.

2.1.2. Ekspandirani i pečeni (umjetni) laki agregat

Umjetni agregati dobivaju se industrijskim putem, specijalnim tehnološkim postupcima kao što su žarenje, sinteriranje ili ekspandiranje materijala. Ekspandiranje je postupak stvaranja ćelijaste strukture u sirovom ili prerađenom materijalu zagrijavanjem do oko 1100 °C u peći, što izaziva oslobađanje plinova te prijelaz materijala u piroplastične stanje. U tehnološkom postupku proizvodnje, zrna nekih vrsta agregata formiraju se u kuglice ili slične oblike, dok zrna nekih drugih vrsta agregata poprimaju nepravilan oblik.

U nastavku su opisane pojedine vrste agregata koji spadaju u ekspandirane i pečene agregate.

Perlit

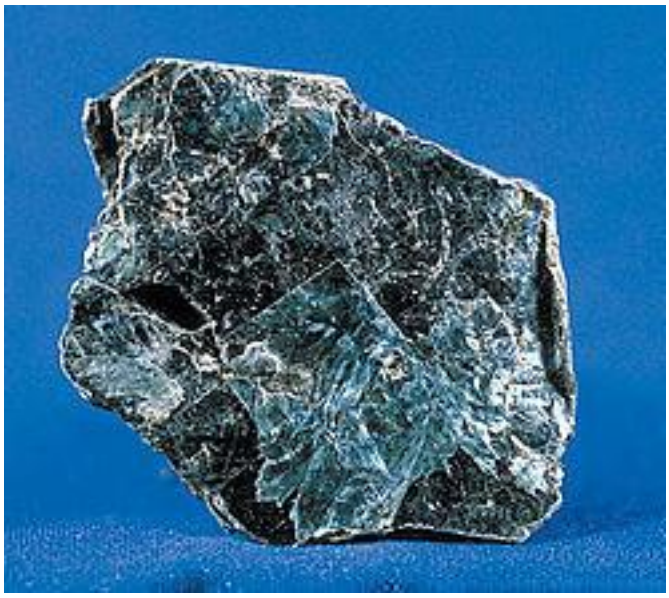
Staklasta, amorfna eruptivna stijena koja po kemijskom sastavu odgovara granitu. Sive je ili zelene boje, a može biti i plava, crvena ili smeđa. Biserna je sjaja. U strukturi se ističu mnogobrojne koncentrične i spiralne pukotine *(perlitna struktura)* nastale naglom kontrakcijom pri ohlađivanju lave. Sadrži 3 do 4% vode. Ekspandirani perlit ima malu toplinsku vodljivost. Betoni od perlita imaju malu gustoću i čvrstoću, a veliko skupljanje i upijanje vlage. Stoga se betoni od perlita isključivo koriste u izolacijske svrhe. Nalazišta perlita su u: Italiji, Rusiji, SAD-u, te na Islandu.



Slika 2.1. Perlit [12]

Vermikuilt

Stijena vermikulit nastaje u prirodi iz liskuna, a ekspandirani vermikulit spada u najrjeđe porozne agregate. Kemijski vermikulit sadrži aluminosilikate željeza i magnezija, a zagrijavanjem na temperaturi od 650 do 1000 °C ekspandira čak 30 – 35 puta. Ekspanzija nastaje zbog isparavanja kemijski vezane vode, a prilikom ekspandiranja dolazi do raslojavanja na tanje listiće koji se međusobno dodiruju. Zrna ekspandiranog vermikulita mogu biti prašinasta sve do veličine od 30 mm. Zahvaljujući svojoj poroznoj strukturi, unutar koje se nalaze zračni proslojci, vermikulit ima značajnu toplinsku i zvučnu izolacijsku moć, te protupožarnu moć. Nalazišta vermikulita su na Uralu, te u Sjevernoj i Južnoj Americi.



Slika 2.2. Vermikulit [13]

Ekspandirane granule polimera (EPS)

Propuhivanjem polimernog materijala zrakom, pri određenoj temperaturi odnosno u kombinaciji s dodatkom sredstva za pjenjenje, stvaraju se kuglasta zrna veličine do 8 mm. Ovaj agregat koristi se za izradu izolacijskih ploča i razne ambalaže tako da se preša na nešto povišenoj temperaturi. Posebnim postupkom drobljenja iskorištene ambalaže ili sličnih otpadaka mogu se također dobiti zrna nepravilnog oblika, koja se koriste kao laki agregat. Volumna masa zrna je veoma mala, a iznosi ispod 100 kg/m^3.

Beton od granuliranog ekspandiranog polistirena (EPS - beton), koji se također naziva stiropornim betonom, proizvodi se vrlo jednostavno. Najbitnija stavka u pripremi ovakvog betona je da se spriječi izlučivanje lakih stiropornih granula iz mješavine svježeg betona. Gustoće ovakvih betona se kreću od 600 do 1600 kg/m^3. Te imaju odgovarajuća izolacijska i konstruktivna svojstva.

Današnja proizvodnja lakog betona se vrši tako da se na gradilište u mikserima doveze cementno mlijeko (cement, voda, aditiv i pijesak) u koje se naknadno dodaje stiropor. Za ovakav način rada neophodno je na gradilištu imati vijčanu pumpu s mogućnošću doziranja stiropora.

EPS – laki betoni imaju dobra toplinsko – izolacijska svojstva. Kod volumne mase iznad 1000 kg/m^3, također imaju i primjerena mehanička svojstva za konstruktivne namjene, premda su kao i ostali laki betoni, krhki materijali. Žilavost im se može povećati dodavanjem polipropilenskih vlakana (PP vlakna).

Ekspandirana glina

Ekspandirana granulirana glina na tržište dolazi najčešće pod nazivom glinopor ili keramzit. U suvremenom građevinarstvu keramzit – beton je u širokoj primjeni. S ciljem da se nađu rješenja za što širu zamjenu običnog betona keramzit – betonom, ispituju se specifične osobine keramzita i njegov utjecaj na osobine svježeg i očvrslog keramzit – betona.

Što se tiče vlažnosti agregata, za transport lakog agregata najpovoljnije je da je agregat potpuno suh. Na taj način se smanjuju troškovi transporta, a proizvođač ima mogućnost da agregat dozira težinski. Vlažnost agregata ne bi smjela prekoračiti 2% od ukupne težine agregata. Laki agregat od ekspandirane gline ima vlažnost oko 0,1% što je zanemarivo. Ispitivanje otpornosti na mraz vrši se sa svakom pojedinom frakcijom osim sa sitnom ili najsitnijom, pri čemu se agregat podvrgava naizmjeničnom smrzavanju i odmrzavanju. Nakon ciklusa od 15 smrzavanja i odmrzavanja, gubitak težine iste frakcije agregata ne smije biti veći od 8% ukupne težine. Jedan ciklus smrzavanje – odmrzavanje traje 4 sata. Pri tome se agregat mrzava na -20 °C, a odmrzava na +20 °C.

Poroznost samih zrna i međuzrnata poroznost, osobine su koje potpunije definiraju kakvoću lakog agregata od ekspandirane gline. Prosječna poroznost samih zrna

kreće se od 30% do 80%. S druge strane, međuzrnata poroznost trebala bi biti veća od 35% da bi postojala mogućnost ugrađivanja dovoljne količine vezivnog materijala.
Na temelju velikog broja ispitivanja mogu se navesti sljedeća obilježja koja su zajednička glinama koje se ekspandiraju:

- plastičnost gline treba biti što veća,
- gline s velikim sadržajem kaolina su nepogodne,
- sadržaj neglinenih minerala ne smije znatno prijeći 40%,
- spojevi sa sadržajem sumpora i organski spojevi trebaju biti što više zastupljeni jer ubrzavaju proces ekspandiranja,
- za vrijeme pečenja, površina sirovine treba brzo postati piroplastična, kako bi oblikovala kompaktnu koru,
- svojstva hlađenja moraju se imati u vidu, kako pukotine koje nastaju kod hlađenja ne bi pogoršale dobivene rezultate,
- neke gline ne pokazuju dovoljno ponašanje na ekspandiranje, pa je dodatkom tzv. aktivatora moguće postići zadovoljavajuće ponašanje na ekspandiranje.

Sirovine za ekspandiranje (glina, škriljci,...) moraju zadovoljiti dva uvjeta:

- prilikom žarenja moraju doći u piroplastično stanje, tj. u fazu topljenja visoke viskoznosti, kako bi se spriječio odlazak nastalih plinova,
- moraju sadržavati tvari, koje pri nastanku piroplastičnog stanja, istovremeno pjenušaju piroplastičnu glinu.

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

Postoje razni postupci proizvodnje i pečenja, s obzirom da postoje različiti sustavi peći, koji se međusobno razlikuju. Najčešće primijenjena tehnologija za proizvodnju agregata od ekspandirane gline je postupak sa rotacijskom peći. Postoje različite konstrukcije rotacijskih peći, a svako postrojenje peći radi tako da se materijal najprije suši, zatim se predgrijava, nakon toga ekspandira i na kraju procesa hladi. Osnovni zahtjev za materijal koji se dodaje u peć je ujednačenost veličine zrna.

Agregat od ekspandirane gline je pogodan za upotrebu u proizvodnji lakih betona zbog svojih pozitivnih osobina, a to su:

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

Liapor

Prirodno čista i oko 180 mil. godina stara glina iz razdoblja 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 °C – 1200 °C . Prilikom pečenja sagorijevaju organski sastojci gline, a kuglice ekspandiraju. Težina, veličina kao i tvrdoća kuglica, mogu se vrlo točno kontrolirati u tehnički usavršenom procesu. Tako nastaju kuglice manje teţine, sa zatvorenom strukturom pora i porozne na zrak, koje postižu tvrdoću jezgre veću od optimalne. Liapor kuglice su otporne na vatru, smrzavanje, upijanje vode, agresivan utjecaj lužina i kiselina, te na pritisak.

Liapor kuglice predstavljaju lagani agregat visoke tlačne čvrstoće koji je istovremeno dobar toplinski izolator, a ujedno i 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.



Slika 2.3. Liapor [14]

2.1.3. Sekundarne sirovine

Kao laki agregat, mogu se upotrebljavati i sekundarne sirovine. Uporaba takvih sirovina je efikasna i ekonomična, jer svi otpaci koji nastaju pri termičkoj obradi kao sporedni proizvodi imaju manje ili više sličan sastav kao i prirodni porozni pucolani. Uporabom ovih sirovina u proizvodnji lakog agregata, smanjujemo onečišćenje okoliša, odnosno otpaci koji nastaju u tehnološkim procesima neće se odlagati na razna odlagališta otpada, nego će se korisno upotrijebiti.

U sekundarne sirovine spadaju:

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

2.2. VEZIVA ZA IZRADU LAKIH BETONA

Jedan od bitnih faktora pri odabiru vrste veziva za izradu lakog betona jesu zahtijevane osobine koje određeni beton treba imati u očvrslom stanju. Zahtijevane osobine betona ujedno ovise o budućoj namjeni promatranog betona te o uvjetima okolne sredine u kojoj će se beton nalaziti. Neke od zahtijevanih osobina lakog betona mogu biti: čvrstoća, otpornost na mraz, otpornost na požar, otpornost prema agresivnim utjecajima okoline itd. Na izbor veziva za izradu lakog betona također utječe način očvršćivanja lakog betona. Laki beton može očvršćivati u normalnim uvjetima, ali i pod uvjetima povišenog pritiska i temperature. Posebnu pažnju kod odabira veziva potrebno je obratiti ako se radi o lakim betonima autoklavnog očvršćivanja. Naime, autoklav je kemijsko izvođenje kemijskih reakcija pod visokim tlakom i uz visoku temperaturu. Stoga se za lake betone autoklavnog očvršćivanja najčešće koriste miješana veziva, i to:

- građevinsko vapno (10 – 50 %) s raznim dodacima, kao što su kvarcni pijesak, granulirana zgura, elektrofilterski pepeo, vulkanski tuf, plovućac itd
- portland cement (20 – 70 %) sa istim vrstama dodataka kao u prethodnom slučaju (30 – 80 %) i gipsom (5%);
- portland cement sa građevinskim vapnom u jednakom omjeru (20 – 70 %) sa istim vrstama i količinama dodataka kao u prethodno navedenim slučajevima.

Izbor veziva za izradu lakog betona ovisi i o vrsti agregata koji se koristi za laki beton. Ako se upotrebljava agregat s naglašenim pucolanskim ili sličnim svojstvima, nije poželjno koristiti cemente s pucolanskim dodacima, zbog mogućnosti pojave zapreminske nepostojanosti takvog lakog betona.
Kod nas se za izradu lakih betona najviše upotrebljavaju portland cementi sa i bez dodataka, a u manje slučajeva građevinsko vapno.

2.3. DODACI LAKIM BETONIMA

Dodaci za beton su tvari koje se dodaju betonu radi poboljšanja nekih njegovih svojstava ili mijenjanja jednog ili više svojstava, radi postizanja željenih efekata.
Kod betona u svježem stanju, pomoću dodataka se mogu smanjiti potrebe za vodom, povećati obradivost, smanjiti segregacija, smanjiti gubitak slijeganja, poboljšati ugradivost i zagladivost, usporiti vezivanje ili smanjiti izdvajanje vode. Isto tako se upotrebom dodataka, kod očvrslog betona mogu povećati otpornosti na smrzavanje i habanje ili se može smanjiti skupljanje i propusnost.
Dodaci za beton se dijele na mineralne i kemijske dodatke.

Mineralni dodaci mogu biti aktivni dodaci koji aktivno sudjeluju u procesu hidratacije cementa, te dodaci koji su praktično inertni ali djeluju fizikalno na svojstva betona.

Kemijski dodaci se koriste za stvaranje pora u mortu i cementnom tijestu lakog betona. Na taj način se smanjuje volumenska težina lakog betona, povećava ugradivost, te se smanjuje utrošak vode i snižava se vlažnost betona u gotovim elementima. Kemijski dodaci (aditivi) mogu se podijeliti u dvije grupe. Prvu grupu čine aditivi koji ne sudjeluju u kemijskom procesu hidratacije cementa, ali mogu utjecati na brzinu tog procesa (aeranti, plastifikatori, superplastifikatori, usporivači vezanja, dodaci za vodonepropusnost). Drugu grupu čine aditivi koji najčešće sudjeluju u kemijskom procesu hidratacije cementa i time bitno utječu na konačni mineraloški sastav i svojstva cementnog kamena (ubrzivači vezanja i očvršćivanja, dodaci za betoniranje na niskim temperaturama).

3. VRSTE LAKIH BETONA

Ovisno o načinu postizanja manje volumne mase, laki betoni se dijele na:

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

3.1. LAKI BETONI OD JEDNAKOZRNATOG AGREGATA

Laki betoni od jednakozrnatog agregata dobivaju se tako da se izostavi stina frakcija agregata, odnosno upotrijebi samo jedna frakcija iste veličine zrna. Ovakvom primjenom, ostavlja se mnogo šupljina u betonu. Volumna koncentracija je veća čim je zbijenost agregata veća, te ovisi i o obliku zrna agregata. Agregati, čija zrna većinom imaju oblik kugle, imaju znatno veću volumnu koncentraciju agregata. Međutim, gustoća ovakvih betona ovisi prije svega o granulometrijskom sastavu.

Za pripremu betona može se upotrijebiti i više od jedne frakcije agregata, međutim tada se dobije manji sadržaj pora i time veća volumna masa betona. Bilo bi poželjno kada zrna ne bi bila veća od 25 – 30 mm. Optimalna veličina je kada je najkrupnije zrno dvaputa veće od najsitnijeg.

Beton od jednakozrnatog agregata je otporan na cikuluse smrzavanja i odmrzavanja, jer gotovo nema kapilarnih pora.

Za pripremu beton potrebno je najmanje 250kg/m^3 cementa. Potrebno je paziti na količinu cementa, jer višak ugrađenog cementa smanjuje šupljine.

3.2. LAKOAGREGATNI BETONI

Za pripremu lakoagregatnog betona mogu se upotrijebiti svi agregati koji su opisani u poglavlju 2.1., međutim najčešće se upotrebljavaju određene vrste laganog agregata i to:

- ekspandirana pečena glina
- ekspandirana granulirana glina
- ekspandirani perlit ili vermikulit
- ekspandirani polimerni materijal

Svi laki agregati imaju veliko upijanje vode, te prilikom miješanja betona, agregat može upijati ili ispuštati vodu, ovisno vlažnosti kojom je ušao u miješalicu. Zbog toga nije moguće unaprijed u recepturi odrediti potrebnu količinu vode, već se ona mora prilagođavati pri miješanju, da beton postigne određenu konzistenciju.

S obzirom da neka zrna imaju zatvorene šupljine, dio zrna ima manju volumnu masu od paste, pa se agregat segregira na površinu betona. Međutim, ovakva pojava karakterizira nestabilan laki beton (beton koji ima preveliko izlučivanje vode). Zbog toga količinu vode treba ograničiti. Upotrebom aeranata znatno se poboljšava obradivost i stabilnost svježeg lakog betona te se smanjuje njegova sklonost segregaciji pri miješanju.

Lakoagregatni betoni prema namjeni dijele se na toplinsko – izolacijske lake betone, konstrukcijsko – izolacijske lake betone i konstrukcijske lake betone.

3.2.1. Toplinsko – izolacijski laki beton

Ovakav beton, uglavnom se izrađuje s otvorenom strukturom, a u tom slučaju se može izraditi od jednakozrnatog agregata ili s dvije frakcije agregata. Pore između zrna agregata kod ovakvih betona su nepotpuno ispunjene vezivnim mortom. Volumen cementnog morta je obično manji od 10% od volumena betona, zbog čega toplinsko – izolacijski laki betoni imaju malu mehaničku čvrstoću koja ovisi o čvrstoći na smicanje vezivnog morta. Lom nastaje između zrna agregata.

Za vrijeme pripreme betonske mješavine ovakvog betona potrebno je prethodno navlažiti agregat, kako bi kasnije pri očvršćivanju betona bilo dovoljno vlage za hidrataciju cementa. Agregat se može prskati ili potapati u vodu.

Također, prethodno vlaženje možemo raditi na način da prvo vršimo miješanje cementa i polovine količine vode u trajanju od 1 – 2 minute, pa se zatim dodaje agregat i ostatak vode, te se sve skupa miješa još 3 minute. Iskustva govore da se bolji efekt postiže kada je agregat prethodno prskan vodom. Međutim, prskanje agregata se može izbjeći na način da se agregat i polovina vode miješa u trajanju od 1 – 2 minute, zatim se dodaje cement i ostatak vode, te se sve skupa miješa još 3 minute.

Redoslijed doziranja (komponentnog materijala kao i aditiva) je jako bitan dio kod pripravljanja lakoagregatnih betona.

Način ugrađivanja može biti prilično raznovrstan i mora se definirati.

3.2.2. Konstrukcijsko – izolacijski laki beton

Konstrukcijsko – izolacijski beton prestavlja prijelaz između toplinsko – izolacijskog i konstrukcijskog lakog betona.

Ova vrsta betona može se izrađivati sa sve tri strukture, a najčešća je djelomično zatvorena struktura s cementnim mortom koji iznosi 10 – 20 % od ukupnog volumena betona. Kod ovakvog betona, lom nastaje i kroz zrno agregata i kroz vezivni mort, jer su im čvrstoće uglavnom podjednake.

Kod izrade ove vrste betona postoji mogućnost kombiniranja agregata s drugim materijalima.

Za izradu se također može upotrijebiti agregat u tri ili četiri frakcije.

3.2.3. Konstrukcijski laki beton

Za proizvodnju konstrukcijski lakog betona, potrebno je poznavati svojstva i ponašanje cjelokupnog komponentnog materijala i njihove međusobne utjecaje.

Ovakav beton se uglavnom izrađuje sa zatvorenom strukturom. Tada je količina vezivnog morta veća od 40% od volumena betona. Lom nastaje kroz agregat, budući da je čvrstoća agregata manja od čvrstoće morta.

Mehaničke čvrstoće možemo poboljšati na način da povećamo količinu i marku cementa, način ugradnje, povećamo količinu fine frakcije, te djelomično ili potpuno zamijenimo finu frakciju kvarcnim pijeskom.

Teško se može preporučiti samo jedan tipičan sastav konstrukcijskog lakog betona u tri ili više frakcija. Naime, na sastav betona utječu i količina cementa, klasa betona, zatim način ugrađivanja i njegovanja, a pri tome svi betoni moraju ispuniti osnovne uvjete u odnosu na tlačnu čvrstoću i koeficijent toplinske vodljivosti.

3.3. ĆELIJASTI BETON

Ovakvi betoni su vrlo laki betoni u čiju je masu prije očvršćivanja utisnut zrak ili je kemijskim putem proizveden plin čiji se mjehurići šire u betonu. Ako se čistoj cementnoj pasto dodaju aktivni ili inertni fini agregati kao što su: pijesak, kvarc, pečena glina, škriljac, leteći pepeo, pucolan, itd., mogu se dobiti ćelijasti betoni porozne strukture na bazi portland i metalurškog cementa. Osnovni način postizanja ćelijaste strukture su stvaranje plina kemijskim putem ili ubrizgavanjem zraka.

Prema načinu dobivanja ćelijaste strukture, ćelijaste betone dijelimo na:

- Plinobetoni
- Pjenobetoni

3.3.1. Plinobetoni

Plinobeton se proizvodi u autoklavima, na visokim temperaturama i pritisku. Osnovne sirovine za proizvodnju su portland cement, vapno, leteći pepeo, sitno samljeveni kvarcni pijesak i voda. Na visokoj temperaturi znatno se ubrzavaju pucolanske reakcije letećeg pepela i samljevenog kvarcnog pijeska.

Dodatak stvara veliku količinu mjehurića plina, pa tako nasta 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 upotrijebi kalcijev karbid u svježem betonu se razvija acetilen, a takav gotovi beton nosi zaštićeni naziv ytong. Plinobetoni imaju široku primjenu u građevinarstvu kao razne vrste krovnih i stropnih ploča, horizontalnih i vertikalnih zidnih ploča, zatim nearmiranih ploča malog formata za pregradne zidove i toplinsku izolaciju, te nearmiranih zidnih blokova malog formata za nosive i nenosive zidove.

Siporeks spada u skupinu takozvanih lakih plinobetona. Kao vezivno sredstvo za izradu siporeksa upotrebljava se portland cement, a kao agregat kvarcni pijesak. Kod proizvodnje siporeksa za stvaranje mjehurića u strukturi betona, odnosno kako bi se dobila ćelijasta struktura, koristi se aluminijski prah koji se nalazi u obliku fine koloidne prašine.

Siporeks se češće proizvodi kao armiran nego kao nearmiran. Armira se tako da se armatura postavi u kalupe, a zatim se u njih lijeva kompletno pripremljena mješavina, kao što se to radi kod proizvodnje nearmiranog siporeksa. Armatura se zaštićuje

specijalnim antikorozivnim premazima, koji štite armaturu od agresivnog utjecaja kemikalija i agresivnog utjecaja vanjske sredine koji je u velikoj mjeri izrađen zbog velike poroznosti ovog materijala.

Siporeks ima poroznu strukturu sa zatvorenim porama, pa je upijanje vode i vlage prilično smanjeno. Zbog toga je ovaj materijal otporan na mraz i izvrstan je izolator. Ovisno o namjeni proizvodi se sa zapreminskim težinama koje u suhom stanju iznose 400 – 700 kg/m^3. Povećanjem zapreminske težine se poboljšavaju mehanička svojstva, dok izolacijska svojstva pri tome slabe.

Čvrstoća na pritisak siporeksa se ispituje na kockama stranice 20 cm.

Siporeks ima dobru otpornost na mraz. To potvrđuje i niz konstrukcija i objekata izrađenih od ovog materijala. Naime, otpornost na mraz nije se promijenila i nakon 20 godina. Siporeks je 6 do 8 puta bolji termoizolacijski materijal od običnog nearmiranog betona, dok se pokazao kao ne baš dobar materijal za zvučnu izolaciju. Skupljanje siporeksa je veliko i kreće se od 0,1 – 0,5 mm/m. Siporeks je nezapaljiv materijal te se vrlo jednostavno obrađuje različitim alatima, čak laganije i jednostavnije nego drvo.

Zaključak je da je to materijal koji ima dosta pozitivnih svojstava koja ga čine jako zanimljivim građevinskim materijalom, pa stoga ima i široku primjenu.



Slika 3.1. Zidanje pregradnih zidova od siporeksa [15]

3.3.2. Pjenobetoni

Pjenobetoni su ćelijasti betoni koji se mogu izrađivati na gradilištu ili u industrijskim uvjetima. Problemi koji se pojavljuju u proizvodnji pjenobetona su:

- sprečavanje segregacije kao posljedice velike razlike u gustoći pjene odnosno granula ekspandiranih agregata u njima, te pijeska i vode,
- održavanje konstantnosti volumne mase i čvrstoće tijekom proizvodnje,
- postizanje povoljnog oblika i veličine pora, koje uvjetuju čvrstoću i trajnost betona.

Međutim, pojavom novih tehnologija za proizvodnju sredstava za pjenjenje i tehnologija pripreme betona, većina navedenih problema uspješno je riješena. Stoga je sada moguće proizvoditi pjenobeton u širokom rasponu gustoća, od 400 do 2000 kg/m^3, koji je prikladan konstrukcijski i izolacijski materijal te se jednostavno proizvodi na gradilištu, a koristi se za prefabrikaciju složenijih elemenata i za sanacijske radove i adaptacije u starim zgradama.

Sirovine za proizvodnju pjenobetona su cement i sitni pijesak te eventualno sitni laki agregat. Ćelijasta struktura dobiva se dodavanjem sredstava za pjenjenje u miješalicu. Takva sredstva u betonskoj masi, pri bržem ili sporijem miješanju, oblikuju zračne mjehuriće. Ovi mjehurići miruju i stabiliziraju se u betonskoj masi sve do stvrdnjvanja i vezanja betona. Kvaliteta i zrnati sastav pijeska, koji treba biti očišćen od gline i dovoljno sitan, značajno utječu na zapreminsku težinu i čvrstoću betona. Pravilni raspored i veličina zračnih mjehurića glavni su faktor u proizvodnji pjenobetona.

Očvršćivanje se vrši slično kao kod plinobetona, a preporučljivo je ubrzati postupak pomoću autoklava u pari na temperaturi od 180 °C i pod pritiskom. Snižavanje pritiska treba vršiti lagano kako ne bi došlo do prskanja elemenata. Vrijeme zadržavanja proizvoda u autoklavi i pod pritiskom ovisi o zapreminskoj težini i debljini komada.

4. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA LAKIH BETONA

4.1. ČVRSTOĆA I ELASTIČNA SVOJSTVA LAKIH BETONA

Istraživanje predstavlja utjecaj karakteristika četiri agregatna tipa (dva od sinteriranog letećeg pepela, hladno prešanog laganog 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 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. Korištenjem laganih agregata možemo očekivati smanjenje težine betona i druge pozitivne učinke na beton, ali i smanjenje zagađenja okoliša putem reciklaže otpada. Cilj ovog rada je istražiti učinke svojstava različitih agregata od laganog letećeg pepela na svojstva betona.

4.1.1. Ispitivanje provedeno na agregatima

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

Specifične težine i apsorpcija vode finih i grubih agregata su određeni u skladu s ASTM C 128 i ASTM. Specifične gravitacije prirodnog pijeska i lomljenog pijeska su 2,62 i 2,63. Krupni agregat je testiran u peći, u suhom stanju kako bi se utvrdila jedinica težine i sadržaj pora.

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.

4.1.2. Proizvodnja standardnih i 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. Jedina razlika između četiri vrste betona je vrsta agregata.

Tablica 4.1. Recepture mješavina [5]

Concrete	Cement	Silica fume	Water	Fine aggregate		Coarse aggregate	AEA[a] (%)	SP[b] (%)
				Natural sand	Crushed sand			
LWCC	551	55	158	318	318	592	1.2(0.2)	6.7(1.1)
LWBC	548	55	157	316	317	567	1.2(0.2)	6.7(1.1)
LWGC	549	55	157	317	317	580	1.2(0.2)	6.7(1.1)
NWC	551	55	158	317	319	981	1.6(0.265)	7.3(1.2)

4.1.3. Ispitivanja provedena na svježim i očvrslim betonima

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.

Cilindrični uzorci od 100 i 200 mm su korišteni kako bi se odredila gustoća očvrslog betona. 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.

$$\mathbf{E = w^{1.5} \cdot 0,043 \cdot \sqrt{\sigma}}$$

$$\mathbf{E = w^{2} \cdot 0,0017 \cdot \sigma^{0.33}}$$

E – modul elastičnosti

w – suha gustoća betona

σ – tlačna čvrstoća cilindra

4.1.4. Rezultati ispitivanja i komentari

Slijeganje, sadržaj zraka i gustoća betona

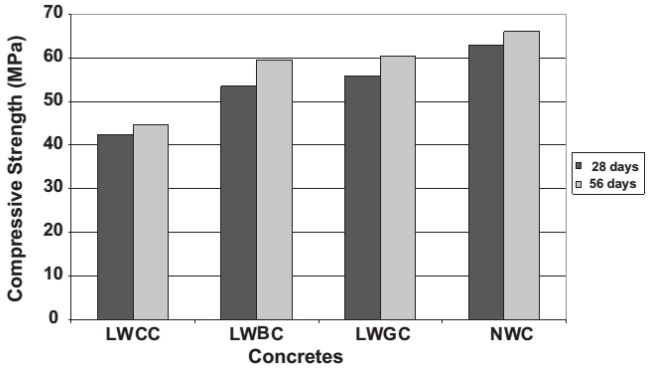
Kako bi se dobilo slično slijeganje i sadržaj zraka kod lakih betona u usporedbi sa standardnim betonima, potrebna je manja količina superplastifikatora i aeranta što rezultira smanjenjem troškova. Razlog tome može biti sferni oblik čestica lakog agregata u odnosu na pravokutni oblik čestica tucanika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

Unatoč manjoj gustoći agregata, gustoća betona nije pala, kao kod betona standardne gustoće. Preporučena količina zraka kod lakih betona od strane Američkog Instituta za Beton je 4-8% za maksimalno zrno agregata 19mm.

Puno lakši betoni mogu se dobiti djelomičnom ili potpunom zamjenom finog agregata, kao i punom zamjenom krupnog agregata kombinirajući fini i krupni lagani agregat.

Tlačna čvrstoća i modul elastičnosti

Vrijednosti tlačne čvrstoće i modula elastičnosti betona prikazani su na Slici 4.2. i tablici 4.3. 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.



Slika 4.2. Tlačna čvrstoća nakon 28 i 56 dana [5]

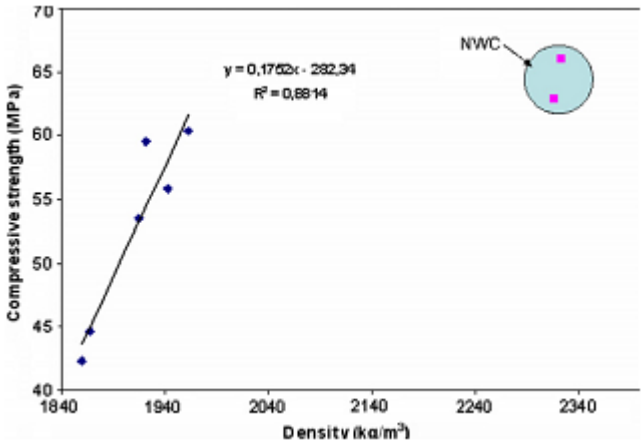
Tablica 4.1. Eksperimentalni i predviđeni rezultati modula elastičnosti [5]

Concretes	Modulus of elasticity (GPa)							
	Experimental		ACI 318		BS 8110		Numerical	
	28 day	56 day	28 day	56 day	28 day	56 day	28 day	56 day
LWCC	19.6	19.7	22.4	23.2	20.2	20.8	20.5	21.3
LWBC	26.0	26.3	26.4	27.9	23.2	24.2	25.0	26.5
LWGC	25.7	25.9	27.5	29.1	24.2	25.4	26.6	28.5
NWC	36.8	37.1	38.0	39.1	35.8	36.6	–	–

Wasserman i Bentur su istaknuli da agregat veće čvrstoće ne vodi nužno ka betonu veće čvrstoće.

Nemes i Jozza pokazuju da postignuta maksimalna tlačna čvrstoća ovisi o gustoći čestica LWA. Ovaj rezultat potvrđuje i Slika 4.3. 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.

Linearni model je pokazao linearnost između čvrstoće i gustoće. Tlačna čvrstoća je izravno proporcionalna gustoći očvrslog betona.



Slika 4.3. Omjer tlačne čvrstoće i gustoće [5]

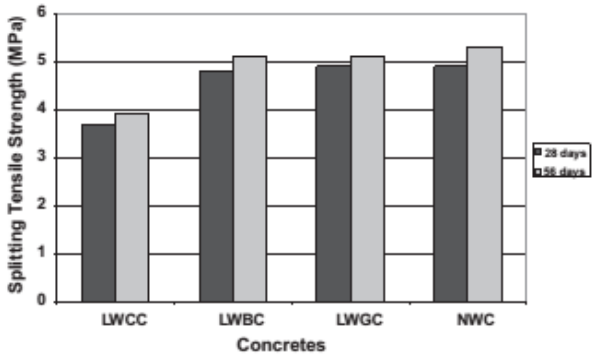
Modul elastičnosti je proračunat prema čvrstoći i gustoći:

$$\boldsymbol{E = 4.33 - 10 \cdot \sigma^{0.459} \cdot \gamma^{3.037}}$$ za LWC

$$\boldsymbol{E = 4.62E \cdot \sigma^{0.678} \cdot \gamma^{1.2249}}$$ za LWC i NWC

Čvrstoća na cijepanje valjka

Minimalna čvrstoća na cijepanje od 2.0 MPa je uvjet za građevinski laki agregat prema ASTM C 330. LWCC je imao najmanju čvrstoću 28 i 56 dan i to 3.7 i 3.9 MPA. Razlika u čvrstoćama je mala, normalno teški agregat je dao malo veću čvrstoću. Neki istraživači su kazali da je u usporedbi sa normalnim agregatom, laki agregat imao manji modul elastičnosti i manju čvrstoću. Međutim čvrstoća nakon 28 dana je bila samo 4% veća od LWBC i 6% veća od LWGC. Osim toga najveći i najmanji porast čvrstoće od 28 do 56 dana je bio 6.4% za LWBC i 3.9% za NWC.



Slika 4.4. Čvrstoća na cijepanje nakon 28 i 56 dana [5]

4.1.5. 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.[5]

4.2. UTJECAJ VOLUMENA FRAKCIJA LAKOG AGREGATA NA TOPLINSKA I MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

LWA korišten u građevinskim laganim betonima su uglavnom gline, škriljac i plavac. Gustoća građevinskog LWAC iznosi 1500 do 1800 kg/m3. U većini slučajeva građevinski LWAC je napravljen od grubog LWA i finog normalno težinskog agregata. Za poboljšanje LWAC-ovih termičkih svojstava njegova gustoća se još mora smanjiti. Jedna solucija bi mogla bit zamjena jedne ili svih frakcija sa finim LWA.

Cilj ovog istraživanja je dobiti LWAC sa boljom termičkim izolacijom bez toga da izgubi puno mehaničkih svojstava.

4.2.1. Fizička svojstva lakog agregata

Zbog toga što je jako porozan LWA ima manju čvrstoću i deformabilniji je nego NWA. Što znači da je u LWAC najslabija komponenta agregat, a ne cement. Mehanička svojstva LWAC-a nisu uvjetovana samo kvalitetom cementa već i volumenom LWA u betonu i njegovim svojstvima. Uglavnom su betoni napravljeni od 65-75% agregata tako da LWA ima vrlo velik utjecaj na termička svojstva LWAC-a i izolacijska svojstva LWAC-objekata.

Teško je izmjeriti mehanička i termalna svojstva LWA zbog njegove male veličine i poliedarske forme. Ova svojstva su karakterizirana prema njihovoj gustoći i poroznosti. Poroznost i gustoća se također koriste kod procjene utjecaja LWA na termalna i mehanička svojstva LWAC-a. Termička svojstva agregata su čvrsto ovisna o njihovoj poroznosti i količini vlage pa su tako i svojstva betona ovisna o tome.

Gustoća agregata i upijanje vode

Gustoća LWA i kapacitet upijanja vode moraju se uzeti u obzir prilikom određivanja volumena LWA koji će se dodati smjesi. U ovom istraživanju, korišteni su vodom zasićeni "LWA" kako bi se izbjegle bilo kakve promjene omjera vode i cementa zbog upijanja vode prilikom miješanja smjese.

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 je deblja nego što je glina. To objašnjava manji koeficijent upijanja vode. Iako je sitni škriljevac zdrobljen od većih zrna, njegova vanjska ljuska nestaje te ima najnižu koeficijent upijanja vode zbog veće gustoće.

Za plavac, nema razlike između unutarnje i vanjske strukture. Koeficijenti upijanja vode su slični za sitne i grube čestice plavca.

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

Vodo-dostupna poroznost i veličina pora

Mehanička i toplinska svojstva agregata vezana su o njihovom mineraloškom i kemijskom sastavu, ali i njihova mikrostruktura zrna, također. Eksperimenti vodo-dostupne poroznosti, poroznost mjerena prolaskom žive i raspodjela veličine pora nam omogućava da okarakteriziramo mikrostrukturu proučavanih agregata.

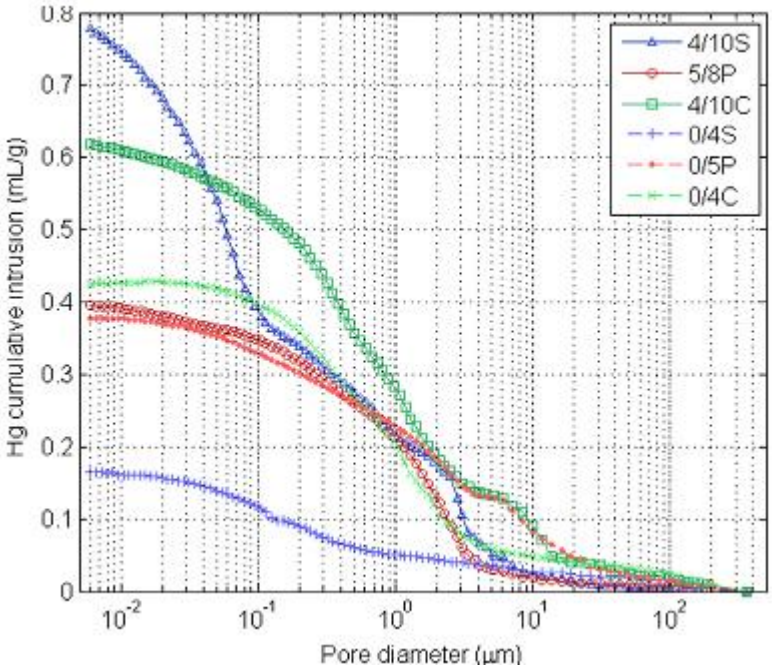
Vodo-dostupna poroznost agregata testira se pomoću zasićenja vakuum uređajem. S ciljem ispunjavanja svih dostupnih pora vodom nužno je da se iz pora ukloni zrak. U tu svrhu, na potpuno suhi uzorci smještaju se u vakuumu kako bi se izbacio zrak iz unutarnjih pora. Voda se zatim ulije u vakuumsku posudu kako bi uzorci bili uronjeni. Tijek eksperimenta sličan je postupku opisanim u EN 1097-6. Vodo-dostupna poroznost se računa iz omjera volumena upijene vode i volumena zrna (mjeren metodom piknometra):

$$\Phi = V_{vode} / V_{zrna}$$

Poroznost se također testira uvlačenjem žive u cilju analize distribucije pora i ukupne makroporoznost LWA. Veličina pora izračunava se sljedećim izrazom:

$$r = 2\sigma \cos\theta / P$$

gdje se polumjer pora (r) odnose na pritisak (P), površinsku napetost žive (σ) i kut kontakta između žive i krute tvari (θ).



Slika 4.5. Ukupna poroznost LWA bazirana na ukupni ulazak žive [6]

Ukupna poroznost lakog agregata Φ^{Hg} uslijed 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.

4.2.2. Utjecaj lakog agregata na svojstva betona

Utjecaj volumnog udjela finog agregata na gustoću betona

Zamjena normalnog finog agregata sa finim lakom agregatom smanjuje gustoću betona i utječe na svojstva betona.

Na 100% zamjene finog normalnog agregata, suha gustoća lako agregatnog betona varira između 1170-1350 kg/m^3 ovisno o vrsti lakog agregata

Generalno, eksperimentalna gustoća lako agregatnog betona je kompatibilna sa teoretskom gustoćom koja je proračunata iz sastava mješavine. Međutim, zamjenom finog normalnog

agregata sa finim lakim agregatom dolazi do blage razlike u gustoći betona pri volumnoj zamjeni od 50% i 100%.

Utjecaj volumne frakcije finog agregata i njegove prirode na mehanička svojstva betona

Rezultati mehaničkih ispitivanja su pokazali smanjenje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti kada je fini normalni agregat zamijenjen sa finim lakim agregatom. Smanjenje je manje važno sa gušćim finim lakim agregatom od škriljevca nego sa glinom i finim lakim agregatom od plovućca. Modul elastičnosti se reducira otprilike 10% nakon ukupne zamjene sa finim lakim agregatom od škriljevca i otprilike 25-30% sa glinom i finim lakim agregatom od plovućca. Tlačna čvrstoća se smanjuje u istim odnosima osim za laki beton od plovućca za koji zamjena finog agregata dovodi do ograničenog smanjenja od oko 10%. Mehanička svojstva proučavanog betona pojavljuju se uglavnom pod utjecajem kvalitete grubih agregata od onog čiji je volumni udio u betonu najveći. Modul elastičnosti i tlačna čvrstoća su očigledno povezani sa gustoćom lakog agregata ali i njihovom unutarnjom strukturom i prisutnosti ili ne vanjske ljuske. Bez obzira na prirodu lakog agregata, omjer čvrstoće i gustoće betona može biti optimiziran korištenjem gušćeg grubog lakog agregata u kombinaciji sa lakšim finim lakim agregatom.

Utjecaj volumne frakcije finog agregata i njegove prirode na mehanička svojstva betona

Poroznost donesena finim lakim agregatom čini smanjenje toplinske provodljivosti linearnim kada se udio lakog agregata povećava. Smanjenje provodljivosti OS betona praćeno zamjenom finog agregata je najmanje zbog najveće gustoće finog lakog agregata od škriljevca u usporedbi s drugim finim lakim agregatima. Ovisno o prirodi finog lakog agregata, toplinska provodljivost lakog betona smanjuje se od 20 do 35%. Vrijednosti toplinske provodljivosti variraju od 0,42 do 0,57 W/mK. Najmanja toplinska provodljivost je dobivena za OC1 beton koji je najlakši. S druge strane, povećanjem udjela finog lakog agregata na 50 i 100% dovodi do povećanja specifične topline lakog betona od 2,5-4,% i 3-8%, respektivno. Vrijednosti specifične topline lakog betona se kreću od 1000 do 1100 J/kgK, dok je njena vrijednost za normalni beton 772 J/kgK. Toplinska difuznost lakog betona sa 100% finog lakog agregata varira između 0,32 i 0,4 mm^2/s, što odgovara smanjenju od 0,09-0,15 mm^2/s (to je 16-32%) uspoređivano sa lakim betonom sa 0%

zamjene finog agregata. Ove vrijednosti su puno manje od onih kod normalnog betona koja iznosi 1 mm^2/s.

4.2.3. Zaključak

Priroda agregata utječe na svojstva lakog agregata. 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 sa nižim mehaničkim svojstvima ali sa manjom gustoćom tako da su izolacijska svojstva poboljšana.

Tlačna čvrstoća i modul elastičnosti lakog betona se linearno opadaju sa smanjenjem gustoće betona. Zamjena finog normalnog agregata sa finim lakom 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. Zamjena finog normalnog agregata sa 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 se 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. U našim studijama 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.[6]

4.3. POČETNO ISPITIVANJE MJEŠAVINE BETONA S LAGANIM AGREGATOM

U ovom ispitivanju, jednostavnim postupkom, cilj nam je odrediti slijeganje, čvrstoću, suhu zapreminu i sadržaj zraka u betonu. Pri rješavanju zadataka, jednadžba za određivanje omjera vode i cementa i sadržaja vode je empirijski dokazana izvođenjem regresijske analiza u 347 točaka. Te točke su mješavine, sastavljene od običnog Portland cementa, s dodatkom letećeg pepela ili agregata od lagane gline.

Lako agregatni beton često ima složeni proizvodni proces nego normalni beton, jer porozni agregati imaju visoku apsorpciju vode i male gustoće. Upijanje vode od strane agregata rezultira ozbiljnim gubitkom slijeganja i brzim vremenom očvršćivanja.

Chandra i Berntsson su predložili tehniku za izračunavanje sastava betona na temelju volumena i čvrstoće morta i čvrstoće agregata.

Cilj ovog istraživanja bio je utvrditi prvu probnu mješavinu postupkom doziranja za strukturne LWAC. Ovaj postupak može lako odrediti sadržaj svakog sastojka po jedinici volumena betona za postizanje ciljanog slijeganja, 28-dnevne čvrstoće, suhe gustoće i zraka. Da se ispita utjecaj različitih parametara na zahtjeve i formulira dizajn jednadžbe, sveobuhvatna baza podataka s 347 LWAC primjeraka su analizirani pomoću nelinearne višestrukog regresiju (NLMR) metoda analize. Pouzdanost predloženog postupka verificiran je testiranjem 5 gotovih betonskih mješavina koji koriste različite razine zamjena laganog finog agregata sa prirodnim pijeskom.

4.3.1. Podaci LWAC

Korišteni agregati su kombinacije ili laganih grubih i fini materijala (sve-lagan) ili laganih grubih materijala i pijeska normalne težine (pijesak-lagan). Suhe gustoće laganih i krupnih agregata su 1000-1600 kg/m^3 i 1000-1850 kg/m^3.

Vrijednosti upijanja vode laganih i krupnijeg agregata su između 5% i 28%. Maksimalna veličina krupnog agregata je obično 19 ili 25 mm, što rezultira finoća modula između 6,2 i 7,28. 28-dnevna tlačna čvrstoća je 11-40Mpa za sve LWAC, i 11-57Mpa ta LWAC s pijeskom. Suha čvrstoća LWAC betona varira između 1236kg/m3 – 1735kg/m3, dok za LWAC s pijeskom ide od 1320kg/m3 – 2024kg/m3.

Glavni parametri za sve LWAC (***LWAC s pijeskom***) su:

-omjer voda/cement w/c=0,28 - 0,68 ***(0,28-0,65)***

-sadržaj vode W=139 - 242 kg/m3 ***(145-260)***

-volumenski omjer grubog agregata po jedinici mase od agregata 0,45 - 0,82 ***(0,33-82)***

- količina zraka 0,03 - 0,065

4.3.2. Formuliranje jednadžbe

Čvrstoća

Promjena svojstava ili udjela u sastavu betona, kao i miješanje i ugrađivanje, dovode do promjene u čvrstoći betona. Dakle, čvrstoća (tj. Potrebna prosječna tlačna čvrstoća) se koristi kao osnova za odabir udjela u sastavu betona uz standardno odstupanje uzorka λ_s.

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:

$$\mathbf{f'_{CR} = f'_C + 1{,}34\,\lambda_s = 1{,}167\,f'_C}$$

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 ν_a. Osim toga čvrstoća lakog betona se povećava s njegovom suhom gustoćom, što dovodi do zaključka da je manji W/C potreban Lakom betonu sa manjom gustoćom da bi se postigla ciljana čvrstoća.

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

$f_0 = 10$ MPa ... referetntna tlačna čvrstoća nakon 28 dana

$\gamma_o = 2300\ \mathrm{kg/m^3}$ ... referentna suha gustoća betona

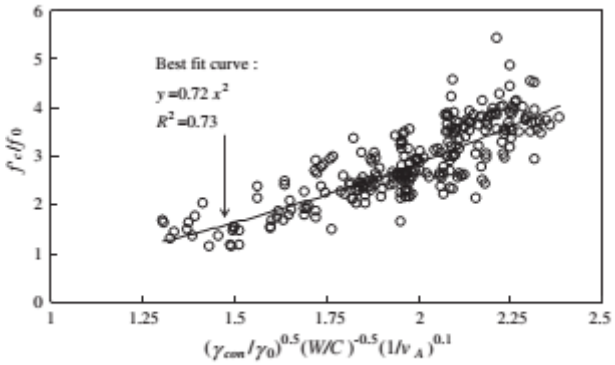


Fig. 2. Model to predict the compressive strength of LWAC.

Slika 4.6. Model za predviđanje tlačne čvrstoće LWAC [7]

Određivanje sadržaja 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).

Slijedeća jednadžba je dobivena za predvidjeti početno slijeganje (Si) (slika 4.7.):

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

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

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

S_O …referentno slijeganje =300mm

Si…početno slijeganje (mm)

R_{LFA}…volumenska zamjena lakog agregata za prirodni pijesak

V_G…volumenski omjer krupnog agregata po jedinici mase

W…količina vode (kg/m3)

Wo… referentna količina vode (100kg/m3)

v_a…količina zraka po jedinici volumena

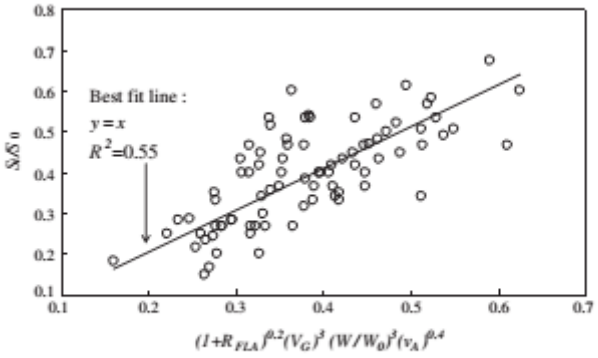


Fig. 3. Model of the initial slump of LWAC using no water-reducing agent.

Slika 4.7. Model početnog slijeganja LWAC bez korištenja redukcijskog sredstva [7]

Određivanje volumnog omjera krupnih 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 g_{con} ostvariva za zadana fizikalna svojstva agregata i za tlačnu čvrstoću betona. Suha gustoća betona može se opisati na sljedeći način:

$$\gamma_{con} = 1.25\ C + G_L + F_S + F_L + 120\ kg/m^3$$

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.

4.3.3. Zaključak

Iako su LWAC mješavine obično uspostavljene pomoću laboratorijske probne serije, teško je odrediti recepte i odgovarajuće korekcije probnih mješavina. Najbolji pristup prilikom prve izrade probne mješavine LWAC-a 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 mješavina s proširenim letećim pepelom ili glinenim agregatom lagane težine, ova analiza pruža jednostavan vodič za doziranje probne mješavine strukturalnog LWAC. 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/m3 i 2000 kg/m3, a maksimalna ukupna veličina je 19 mm ili 25 mm. Ako je potrebno dodati dopunski cementni materijal i/ili sredstva za smanjenje vode, cement ili sadržaj vode iz prve probne mješavine doziranja mora biti prilagođena. Na temelju pristupa doziranja za strukturalni LWAC i validacije usporednih ciljnih zahtjeva i rezultata ispitivanja dobiveni iz određenih doziranja mješavine, sljedeći se zaključci mogu povući:

1. Svi LWAC obično zahtijevaju niži omjer voda-cement od pijeska LWAC s identičnom čvrstoće.
2. 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.
3. Predloženo matematičko rješenje određuje volumni omjer krupnog agregata po jedinici mase za ciljanim zahtjevima.
4. Eksperimentalne vrijednosti betona koji su dozirani primjenom predloženog postupka osobito su blizu ciljanom slijeganju, tlačnoj čvrstoći i gustoći suhog betona koje su proizvedene pomoću ekspandirane gline agregata lagane težine.[7]

5. EKSPERIMENTALNI DIO – LAKI SAMOZBIJAJUĆI BETON

5.1. UVOD

U ovom radu, napravljene su 2 mješavine, na kojima se vrši ispitivanje u svježem i u očvrslom stanju. U obe mješavine je upotrijebljen portland cement i superplastifikator. Obe mješavine se baziraju na Liapor, laganom agregatu. Prva mješavina je napravljena s dodatkom sitno mljevene opeke koja je dodana kao filer (frakcija sitnija od 0,125mm), dok je druga s napravljena s krupnom mljevenom opekom koja ima ulogu agregata (frakcija krupnija od 0,125mm) te kamenim brašnom (filer). Svježi samozbijajući beton mora imati ista osnovna svojstva kao i beton za pumpanje. To znači da se mora lako preoblikovati, a da pri tome ne dolazi do segregacije na bilo kojem nivou veličine zrna.

Prvi zahtjev je da pasta mora imati visoku sposobnost tečenja, ali istodobno mora biti stabilna. Poznato je da se taj zahtjev može ispuniti upotrebom veziva s visokim sadržajem najsitnijih čestica. Za postizavanje visoke sposobnosti tečenja i istodobno stabilnosti, pasti se dodaju čestice sitnije od cementa.

Drugi zahtjev je da mort sam za sebe mora također biti stabilan. Taj zahtjev se ispunjava upotrebom sitnog agregata s dovoljnim sadržajem zrna sitnijih od 1mm, čime se spriječava segregacija između morta i paste.

Treći zahtjev je da beton kao cjelina mora biti stabilan i konzistencije unutar određenih granica.

Provedena su sljedeća ispitivanja: V-lijevak, Metoda razastiranja, L-box, J-ring, te sadržaj zraka u betonu. Tlačna čvrstoća i ultrazvuk uzoraka su ispitani nakon 7 dana. Na temelju dobivenih rezultata moći će se zaključiti kako koji od dodataka utječe na svojstva betona.

5.2. 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*,
- mljevena opeka,
- filer od kamenog brašna

5.2.1. Cement

Za pripremu mješavina betona upotrijebljen je bijeli portlandski cement *CEM I 42,5R,* proizvođač Dalmacijacement, Hrvatska. Upotrebom ovog cementa postižu se visoke rane i konačne čvrstoće. Kratak je period početka vezivanja, optimalna obradivost te znatan razvoj topline hidratacije. Primjenjuje se za sve betone s visokim zahtjevima za početnom mehaničkom otpornošću; također za izgradnju zahtjevnih inženjerskih konstrukcija i infrastrukturalnih objekata od betona visokih čvrstoća. Primjenjuje se također za izgradnju javnih i poslovnih objekata, predgotovljenih i montažnih elemenata, prednapete konstrukcije, te za mlazni beton i injektiranje. Osobito je prikladan za betonske radove pri niskim temperaturama, za izgradnju objekata gdje se traže brzo skidanje oplate, manipulacije elementima ili opterećenje konstrukcije u ranoj dobi; za izradu vodonepropusnih betona te onih otpornih na mraz i soli za odmrzavanje.

Tablica 5.1. Svojstva cementa [17]

CEM I 42,5R	Tipična analiza	Zahtjev norme
Fizikalna svojstva		
Postojanost volumena (Le Chatelier)	zadovoljava	
Početak vremena vezivanja	175+-25min	≥60min
Mehanička svojstva		
Rana čvrstoća (2 dana)	30+-2MPa	
Rana čvrstoća (7 dana)		≥20MPa
Normirana čvrstoća (28 dana)	55+-2MPa	≥42,5MPa; ≤62,5MPa
Kemijska svojstva		
Gubitak žarenjem	2,5+-0,5%	≤5,0%
Udio sulfata (SO_3)	3,0+-0,2%	≤4,0%
Netopivi ostatak	0,25+-10%	≤5,0%
Udio klorida (Cl)	0,01%	≤0,1%

5.2.2. Agregati

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 ℃. 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

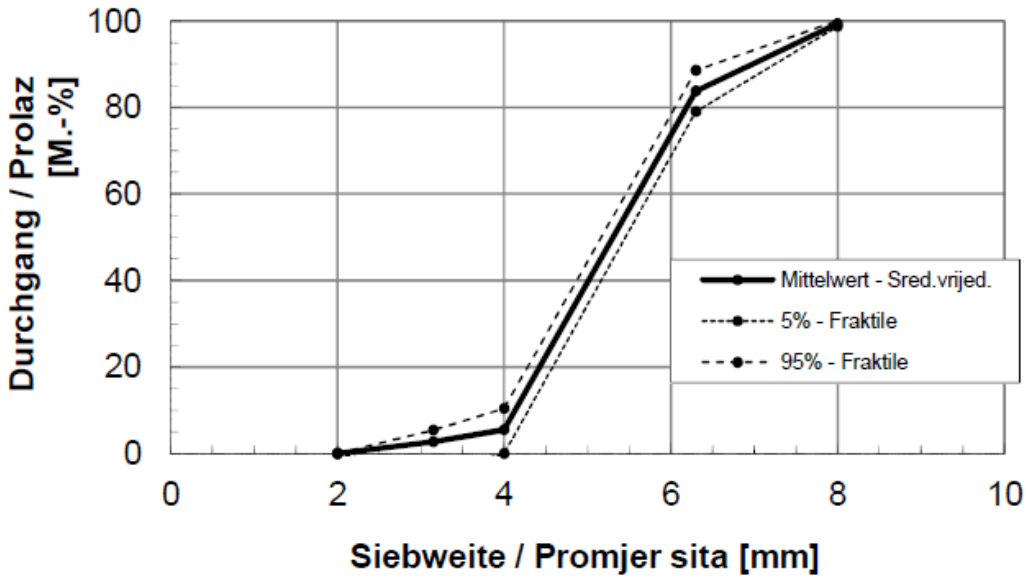
građevni materijal, koji se prema standardu DIN 4102 svrstava u najviši požarni razred A1, s neograničenim vijekom trajanja.

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 1., odnosno u tablici 2.

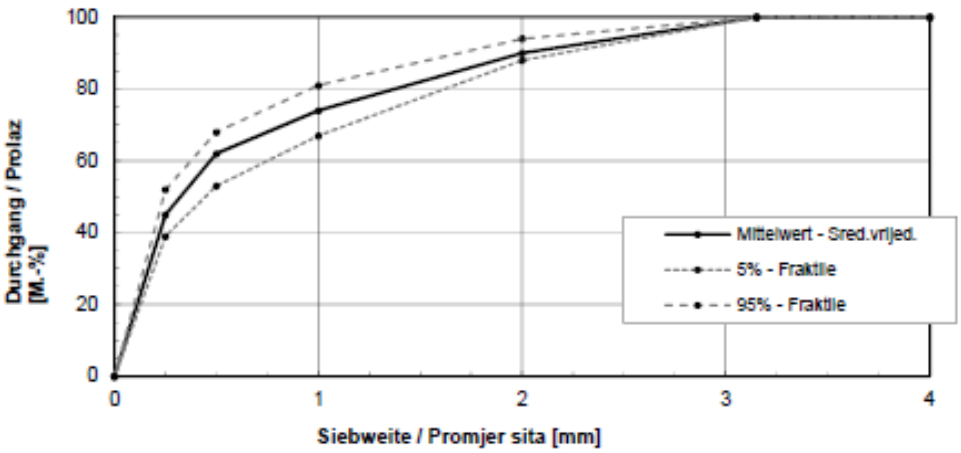


Dijagram 5.2. Granulometrijska krivulja Liapora frakcije 4 – 8 mm [8]

Tablica 5.3. 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., odnosno u tablici 5.



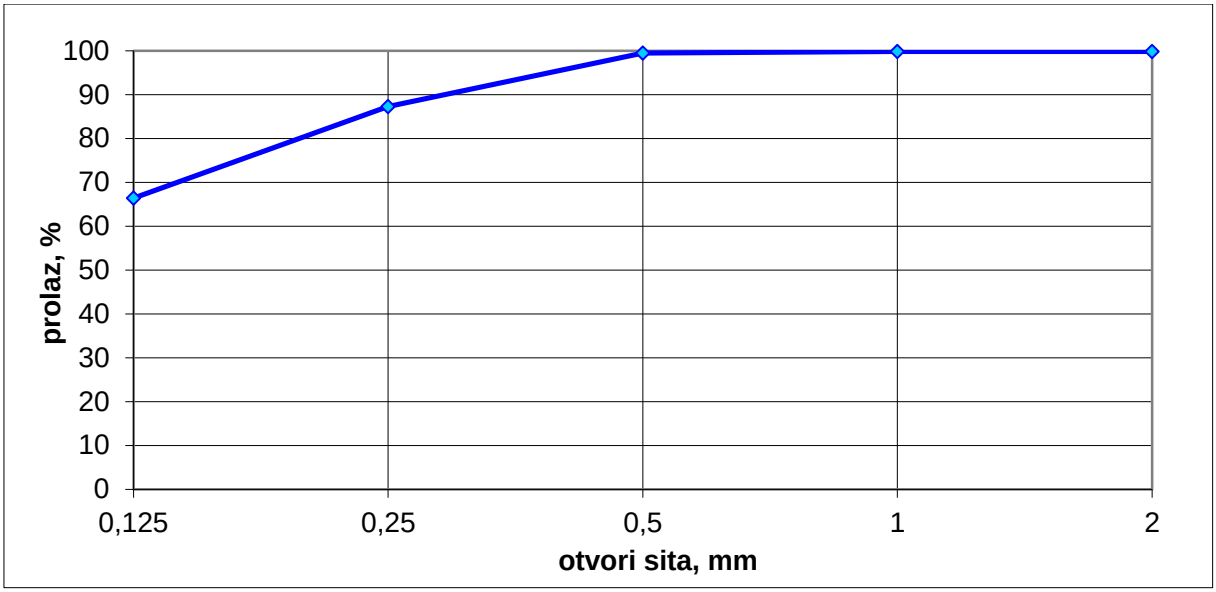
Dijagram 5.4. Granulometrijska krivulja Liapora frakcije 0 – 2 mm [9]

Tablica 5.5. 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 %

5.2.3. Mljevena opeka

Mljevena opeka je nastala mljevenjem opeke u mlinu sa kuglama. Dobiveni materijal je podijeljen u 2 frakcija: < 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



Dijagram 5.6. Granulometrijski sastav mljevene opeke [12]

5.2.4. Kameno brašno

Dobiva se mljevenjem agregata (vapnenca). Koristimo ga kao filer, odnosno punilo. Specifična težina 2,7 [g/cm^3]

5.2.5. Superplastifikator FTF

Svojstva Readyplast FTF1 superplastifikatora [10]:

- Zadržava tijek od 30 do 60 min
- Poboljšava obradivost kod niskog w/c omjera
- Ekstremno visoke rane čvrstoće
- Homogenost svježeg betona
- Preporuka doziranja 0,2-1,0% (max 1,2%)

5.3. PRORAČUN SASTAVA BETONA

Tablica 5.7. Sastav mješavina

Sastav (kg/m^3)	*MJEŠAVINA 8*	*MJEŠAVINA 11*
Cement	*400*	*400*
Voda	*180*	*200*
w/c	*0,45*	*0,5*
Mljevena opeka (D≤0,125)	*65,0*	*0*
Mljevena opeka (D≥0,125)	*0*	*173,71*
Kameno brašno	*0*	*156*
Liapor (0-2mm)	*498,33*	*334,07*
Liapor (4-8mm)	*513,33*	*491,85*
Superplastifikator	*4,7*	*4,8*

5.4. NAČIN PRIPRAVE

Potrebne količine komponenti, koji čine sastav betona, za sve mješavine izmjerene su na preciznoj vazi. Sve mješavine su miješane 6 min.



Slika 5.1. Mješalica betona [4]

5.5. ISPITIVANJA PROVEDENA NA POKUSNIM MJEŠAVINAMA

5.5.1. V-lijevak (V-funnel)

Princip: V-funnel test se koristi za određivanje viskoznosti i svojstva popunjavanja samozbijajućeg betona. V-funnel se popouni sa svježim betonom te se mjeri vrijeme za potpuno istjecanje betona iz lijevka, slika 2.



Slika 5.2. V-lijevak [slika zabilježena tijekom ispitivanja]

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 sa betonom te se poravna njegova gornja površina. Nakon početka 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. Instrument je potrebno očistiti nakon testiranja.

5.5.2. 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 veća od 40mm.

Postupak ispitivanja: Ploču postaviti na ravnu i stabilnu površinu, te je navlažiti sa spužvom ili krpom. Također navlažiti unutarnju površinu stošca te ga postaviti u centar ploče. stožac sa svježim betonom bez ikakvog nabijanja i vibriranja te poravnati gornju površinu betona. Nakon počeka od otprilike 30 sekunda prilikom čišćenja ploče, podignuti stožac vertikalno na način da beton isteče u svim smjerovima. Početi mjerenje vremena širenja u trenutku kad stožac otpusti beton. Zaustaviti štopericu čim beton dosegne krug promjera 500 mm. Izmjereno vrijeme označava se kao T50. Test je završen kad se beton prestane širiti. Izmjeriti najveći promjer razasutog betona d_{max} te promjer okomit na njega d_{perp}.



Slika 5.3. Razastiranje betona [slika zabilježena tijekom ispitivanja]

Promjer rasprostiranja se definira kao srednja vrijednost dva izmjerena parametra

$$S=\frac{d_{max}+d_{perp}}{2}$$

Vrijeme rasprostiranja T50 je izmjereno vrijeme od podizanja stošca do postizanja promjera 500mm. Kreće su vrijednosti od 5-12 sekunda.

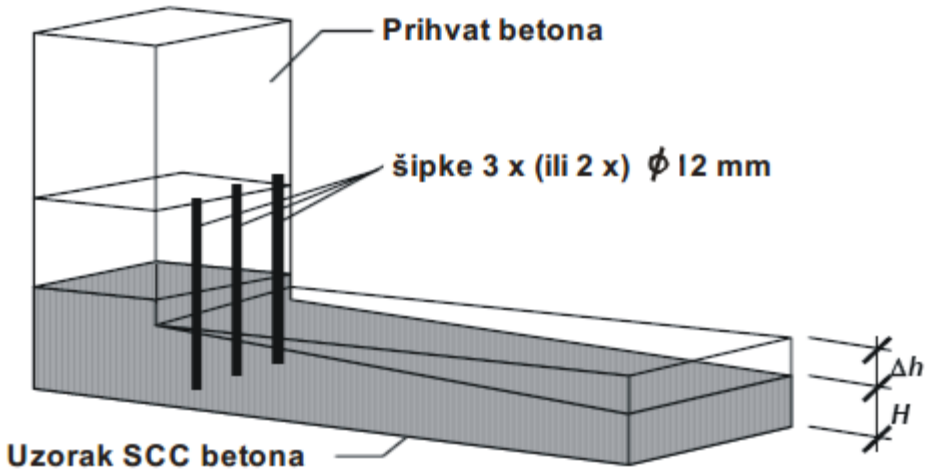
Metoda razastiranja se koristi i za određivanje deformabilnosti samozbijajućeg betona Γ_C

$$\Gamma_C = \frac{(S_{fl1} \cdot S_{fl2} - {S_{flo}}^2)}{S_{flo}^2}$$

Gdje su S_{fl1} i S_{fl2} izmjereni promjeri, a S_{fl0} promjer stošca.

5.5.3. L-box test

Princip: 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. Šipke su na međusobnom razmaku 41 mm, odnosno 59 mm.



Slika 5.4. L-box [2]

Postupak: Postaviti L-box uređaj na ravnu horizontalnu podlogu. Popuniti vertikalni dio uređaja sa svježim betonom. Nakon 10 sekunda podignuti klizna vrata te pričekati dok se beton ne zaustavi prilikom tečenja iz vertikalnog dijela u horizontalni. Izmjeriti visinsku razliku na kraju uređaja između površine betona i gornjeg dijela uređaja na 3 mjesta, dva na krajevima i jedan u sredini, te izračunati njihovu prosječnu vrijednost Δh.

5.5.4. J-Ring

Princip: 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 $T50_J$ (neobavezno) i stopa blokiranja. Razastiranje kod J-prstena odnosi se na deformaciju betona dok potrebno vrijeme razastiranja se odnosi na brzinu deformacije.

Postupak ispitivanja: Postaviti ploču na ravnu podlogu. Napuniti kantu sa 6-7 litara samozbijajućeg betona te ostaviti da miruje otprilike 1 minutu, a za to vrijeme blago navlažiti unutarnje površine stošca i ploču, te postaviti konus u centar kruga od 200 mm. Postaviti J-prsten oko stošca. Napuniti stožac uzorkom iz kante te očistiti beton koji se pao na ploču prilikom punjenja. Nakon otprilike 30 sekunda podignuti stožac i uključiti štopericu, slika 5. Zaustaviti štopericu kad beton dosegne krug od 500 mm. Izmjereno vrijeme označava se s $T50_J$. Postaviti šipku sa ravnom stranom na J-prsten te izmjeriti relativnu visinsku razliku 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}.
Izmjeriti najveći promjer razastiranja te promjer okomit na njega.
Rezultati: Razastiranje J-prstena S_J je srednja vrijednost promjera d_{max} i d_{perp}

$$S_J=\frac{d_{max}+d_{perp}}{2}$$

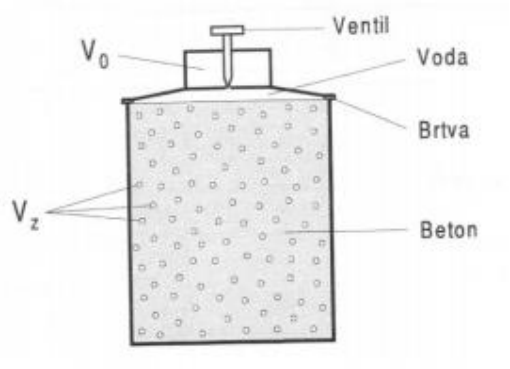
$T50_J$ se izražava u sekundama s točnošću od desetinke sekunde.



Slika 5.5. Ispitivanje J-prstenom [slika zabilježena tijekom ispitivanja]

5.5.5. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu

Sadržaj zraka u svježem betonu ispitan je 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 5.6. Shema manometra [1]

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



Slika 5.7. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu pomoću porometra [4]

5.5.6. Ispitivanje tlačne čvrstoće

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 od 20+- 2. Nakon 24 sata uzorci se vade iz kalupa i potapaju se u vodu gdje se čuvaju do dana ispitivanja. Na dan ispitivanja uzorci se vade iz vode, obrišu se tako da im površina bude suha i zatim se važu. Nakon toga su spremni za ispitivanje. Tlačna čvrstoća ispitana je na zasićenim, površinski suhim uzorcima pomoću preše za određivanje tlačne čvrstoće betona, prema propisu EN 12390-3:2001. Ispitivanje se izvodi na način da se uzorak stavi u prešu i opterećuje do sloma, a zatim se očita naprezanje i sila u uzorku u trenutku sloma (Slika 5.8.). Ispitivanja tlačne čvrstoće provedena su nakon 7 dana.



Slika 5.8. Ispitivanje tlačne čvrstoće [slika zabilježena tijekom ispitivanja]

5.6. REZULTATI ISPITIVANJA

Propisi koji definiraju kvalitetu i sastav samozbijajućeg betona EFNARC

Tablica 5.8. EFNARC propisi:

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 (with 2 rebars)
	PL2	≥0,80 (with 3 rebars)
J- ring	PJ1	≤10 (with 12 rebars)
	PJ2	≤10 (with 16 rebars)

5.6.1. V-lijevak (V-funnel)

Tablica 5.9. Vremena istjecanja betona:

Mješavina 8	Mješavina 11
6,96s	10,31s

Prema *EFNARC* propisima: - mješavina 8 spada pod skupinu VF1
- mješavina 11 spada pod skupinu VF2

Tijekom ispitivanja V-lijevka prostim okom se moglo primijetiti kako je mješavina 11 bila ljepljiva. Uzrok tome je vjerojatno prevelika količina sitnog agregata ≥50%.

5.6.2. Metoda razastiranja (Slump-flow)

Tablica 5.10. Vremena rasprostiranja betona (kada beton dosegne krug promjera 500mm):

Mješavina 8	Mješavina 11
1,16s	2,17s

Tablica 5.11. Veličina rasprostiranja:

Mješavina 8	Mješavina 11
$S = \frac{770 + 755}{2} = 762{,}5mm$	$S = \frac{550 + 595}{2} = 572{,}5mm$

Prema *EFNARC* propisima: - mješavina 8 spada pod skupinu SF3
- mješavina 11 spada pod skupinu SF1

Tablica 5.12. Deformabilnost samozbijajućeg betona:

$\Gamma_C=\frac{(s_{fl1}\cdot s_{fl2}-s_{fl0}{}^2)}{s_{flo}^2}$	
Mješavina 8	Mješavina 11
$\Gamma_C=\frac{(770\cdot 755-200^2)}{200^2}=13{,}53$	$\Gamma_C=\frac{(550\cdot 595-200^2)}{200^2}=7{,}18$

Tijekom izvođenja ovog pokusa, izvlačenjem kalupa, mješavina 11 se zalijepila za kalup, te je trebalo više vremena da postigne krug promjera 500mm.

5.6.3. L-box test



Slika 5.9. L-box [slika zabilježena tijekom ispitivanja, mješavina 11]

Tablica 5.13. Visinske razlike u L-boxu:

Mješavina 8	Mješavina 11
h_1=6cm	h_1=10cm
h_2=6cm	h_2=9cm
h_3=6cm	h_3=10cm
Δh=6,0cm	Δh=9,7cm
H_1=50cm	H_1=54,5cm
H_2=51cm	H_2=47cm
H_3=50,5cm	H_3=44cm
ΔH=50,5	ΔH=48,5cm
H_1=600-ΔH=95mm	**H_1**=600-ΔH=115mm
H_2=150-Δh=90mm	**H_2**=150-Δh=53mm
PL=$\frac{H_2}{H_1}$=0,94	**PL**=$\frac{H_2}{H_1}$=0,46

Prema *EFNARC* propisima: - mješavina 8 spada u skupinu PL2

- mješavina 11 nije zadovoljila propise (<0,80)

Kod ovog pokusa dobili smo jasnu sliku, kako mješavina 11 ne spada pod samozbijajuće betone. Naime, osim što mješavina 11 nije zadovoljila propise, na slici 5.9 se vidi kako su ostale „brazde“ prolaskom mješavine između prepreka. Ugradnja ovakvog betona u armiranu konstrukciju dovela bi do pojave gnijezda te se ne bi popunio sav prostor u oplati.

5.6.4. J-prsten (J-ring)

Tablica 5.14. Vrijeme rasprostiranja betona (kada beton dosegne krug promjera 500mm):

Mješavina 8	Mješavina 11
2,15s	∞ s*

* mješavina nije dosegnula promjer

Prema *EFNARC* propisima: - mješavina 8 spada u skupinu PJ2

- mješavina 11 nije zadovoljila propise (<0,10)

Tablica 5.15. Visinske razlike van prstena u okomitim smjerovima i u prstenu:

Mješavina 8	Mješavina 11
Δh_{x1}=13,00cm	Δh_{y1}=10,00cm
Δh_{x2}=13,00cm	Δh_{y1}=11,5cm
Δh_{x3}=13,00cm	Δh_{y1}=11,5cm
Δh_{x4}=13,00cm	Δh_{y1}=9,7cm
Δh_0=11,5cm	Δh_0=6,0cm

Tablica 5.16. Promjer razastiranja:

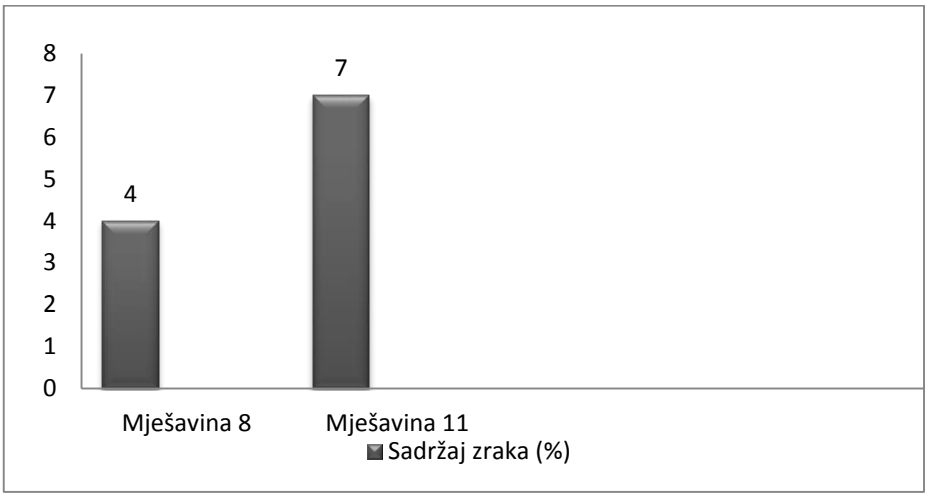
Mješavina 8	Mješavina 11
$S = \frac{750 + 700}{2} = 725mm$	$S = \frac{365 + 350}{2} = 357{,}5mm$



Slika 5.10. J-Ring (slika zabilježena tijekom ispitivanja, mješavina 11)

Kod izvođenja ovog pokusa, mješavina 11 uopće nije izašla izvan prstena, tj. zapela je o prepreke. Ovo nam je samo bio još jedan dokaz, da se ovakav beton ne može ugraditi bez uporabe vibratora.

5.6.5. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu

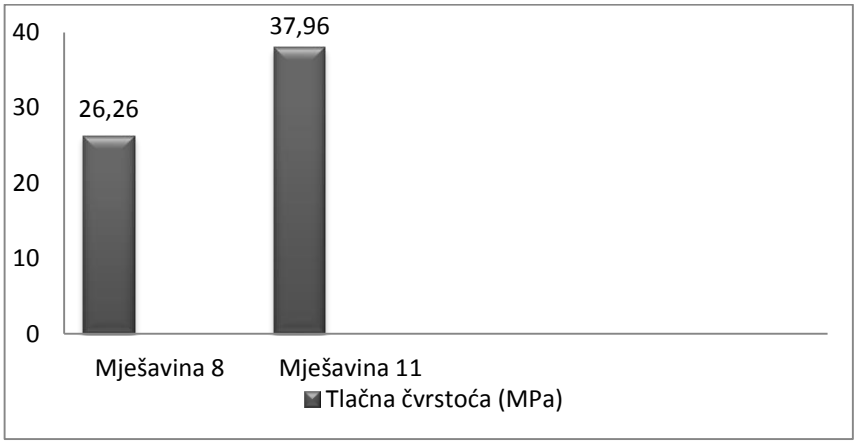


Dijagram 5.17. Sadržaj zraka u svježem betonu

Povećana količina zraka u mješavini 11 je zbog maksimalne upotrebe superplastifikatora te zbog veće količine sitnog agregata, a manje količine filera. Međutim, prema ACI za laki beton, dozvoljena je količina zraka do 8%.

5.6.6. Ispitivanje tlačne čvrstoće

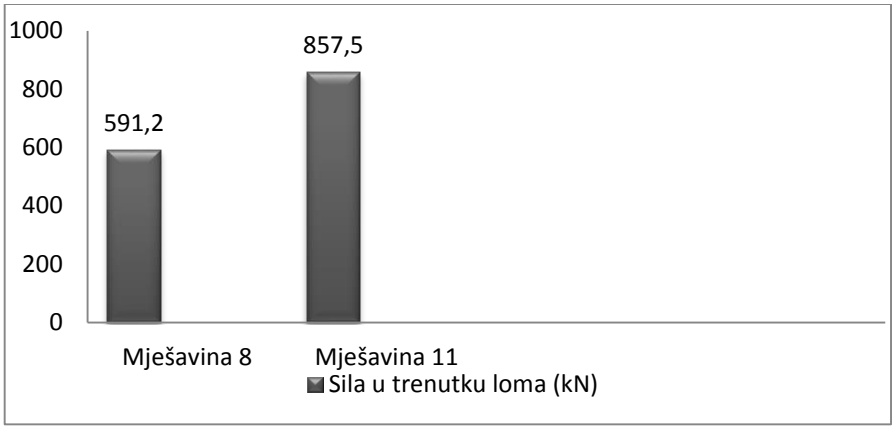
Tlačna čvrstoća nakon 7 dana:



Dijagram 5.18. Čvrstoća na pritisak nakon 7 dana

Obje mješavine su postigle zadovoljavajuće čvrstoće, međutim kao što možemo vidjeti iz priloženog dijagrama, mješavina 11 ima znatno veću čvrstoću na pritisak. Naime, prilikom ugradnje u kocke beton je lagano zbijen sa špatulom, za razliku od mješavine 8 koja je sama popunila kalup. Zbijanje betona doprinijelo je njegovoj čvrstoći.
Iako mješavina 11 ima veću količinu vode u odnosu na mješavinu 8, odabrani sastav i način ugradnje dali su bolju čvrstoću uzoraka.

Sila u trenutku loma:



Dijagram 5.19. Sila u trenutku loma nakon 7 dana

5.6.7. Dinamički modul elastičnosti

Za izračun dinamičkog modula elastičnosti, proveli smo nerazornu metodu – ultrazvukom. Svaku kocku (uzorak) smo površinski osušili te izvagali. Ultrazvukom smo odredili vrijeme potrebno da longitudinalni impuls, prođe kroz uzorak sa jedne na drugu stranu. Mjerenje smo vršili u trima točkama po visini 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.

Formula za izračun dinamičkog modula elastičnosti:

$$\boldsymbol{E_{DIN} = v^2 \cdot \rho \cdot \frac{(1+\mu)\cdot(1-2\mu)}{1-\mu}}$$

Gdje je:

v - brzina prolaska vala kroz uzorak *($v = \frac{s}{t}$)*

ρ – gustoća uzorka betona *($\rho = \frac{m}{V}$)*

μ – poissonov koeficijent betona *(μ = 0,2)*

Tablica 5.20. Izračun dinamičkog modula elastičnosti:

	masa-m (kg)	*vrijeme-t (s)*	*volumen-V (m^3)*	*brzina-v (m/s)*	*gustoća-ρ (kg/m^3)*	*Dinamički modul elastičnosti – **E_{DIN} (Gpa)***
Mješavina 8	6,056	43,3 $\cdot 10^{-6}$	0,003375	3468,21	1794,44	**19,42**
Mješavina 11	6,244	41,4 $\cdot 10^{-6}$	0,003375	3623,19	1850,07	**21,85**

6. ZAKLJUČAK

Laki betoni se već dugi niz godina uspješno koriste kao konstruktivni betoni. Za konstruktivnu primjenu lakog betona dosta često je važnija gustoća betona od njegove čvrstoće. Smanjena razina gustoće za istu razinu čvrstoće dopušta uštede u stalnom opterećenju kod projektiranja konstrukcija i temelja. Trajnost lakih betona može biti ista kao i kod običnog betona. Laki betoni su skuplji, a proizvodnja, transport i sama ugradnja zahtijevaju više pažnje, upravo da bi se postigla zahtijevana kakvoća. U cjelini, prednosti lakog betona ipak nadmašuju spomenute nedostatke.

Samozbijajući beton (eng. Self Compacting Concrete - SCC) nudi najbolju moguću specifikaciju za vrhunsku izvedbu samozbijajućih betona visoke čvrstoće i fluidnosti koja omogućava betonu da teče kroz složene strukture ili precizne kalupe uz izvanredne rezultate. Uvijek kada namjena predstavlja izazov za izvedbu betona zbog zbijenih radnih površina ili složene armature, samozbijajući beton je prigodni odabir. Samozbijajući betoni razvijeni su 80-tih godina prošlog stoljeća prije svega u svrhu dostizanja vrhunskih trajnosnih svojstava betonskih konstrukcija. Kasnije su razna istraživanja rađena u smjeru primjene u izvedbi klasičnih betonskih konstrukcija. Danas su ti betoni postali gotovo standardni betoni s gledišta izvedbe armirano betonskih konstrukcija u slučajevima kada se traže visoka trajnosna svojstva ili je otežana ugradnja.

U svrhu ovog završnog rada napravljeno je istraživanja koje se temelji na 2 različite mješavine lakog betona. Cilj je bio odrediti samozbijajući beton, koji se može lako ugraditi te da zadovoljava tražene čvrstoće. Uz upotrebu mljevene opeke kao filera (mješavina 8) i agregata (mješavina 11).

U obje mješavine je upotrijebljen portland cement i superplastifikator. Obje mješavine su izrađene od Liapor laganog agregata (frakcije od 0 – 2 mm i 4 – 8 mm).

Volumenske mase se kreću od 1777,19 kg/m^3 do 1856,00 kg/m^3 što je prihvatljivo za lake betone. Gornja granica je veća, jer predstavlja mješavinu 11 gdje smo koristili krupnu mljevenu opeku kao sitni agregat ($D \geq 0{,}125$), dok je u mješavini 8 sitno mljevena opeka korištena kao filer ($D \leq 0{,}125$).

Čvrstoće nakon 7 dana mješavine 8 se kreću od 22 – 36 MPa, dok mješavina 11 postiže čvrstoće od 36 – 39 MPa. Prilikom ugradnje u kocke beton 11 je lagano zbijen sa špatulom, za razliku od mješavine 8 koja je sama popunila kalup. Zbijanje betona

doprinijelo je njegovoj čvrstoći. Iako mješavina 11 ima veću količinu vode u odnosu na mješavinu 8, odabrani sastav i način ugradnje dali su bolju čvrstoću uzoraka

Dosadašnja ispitivanja pokazuju da tlačna čvrstoća lakog betona u prvom redu ovisi o vrsti lakog agregata, dok porast sadržaja cementa, te djelomična zamjena lakog finog agregata prirodnim pijeskom imaju zanemariv utjecaj na tlačnu čvrstoću betona. Slično se može zaključiti i na temelju rezultata dobivenih u ovom istraživanju. Gledajući općenito, obe mješavine su postigle izrazito dobre 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 najviše ovisi o čvrstoći i kvaliteti lakog agregata, što je jedan od najvažnijih zaključaka. U ovom slučaju to je Liapor lagani agregat koji se odlikuje izrazito visokim svojstvima čvrstoće i trajnosti.

S obzirom na ispitivanja koja se provode za samozbijajući beton, mješavina 8 se pokazala dobrom mješavinom, jer je zadovoljila sve uvjete od tečenja, preko viskoznosti do svojstava prolaznosti. Međutim, mješavina 11 se pokazala kao beton koji nije samozbijajući, jasno se moglo vidjeti na slikama 5.9. i 5.10. da ovakav beton ne prolazi kroz prepreke, što znači da se kao takav ne može ugraditi bez upotrebe vibratora. Razlog njegove netečnosti, je vjerojatno to što smo u projektiranju sastava betona stavili previše sitnog agregata. Naime, s obzirom da nam je krupno mljevena opeka predstavljala agregat, nije se trebalo ići sa količinom liapora frakcije 0 - 2 mm od 33,4 %, već ju je trebalo smanjiti, a možda je trebalo povećati količinu liapora frakcije 4 -8 mm.

Dobiveni beton je lagan, ima dobru čvstoću ali ne spada u kategoriju SCC - te bi se mogao koristiti samo kao običan lagani beton koji se klasično ugrađuje pomoću pervibratora.

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 mljevenu opeku

[12] http://www.njuskalo.hr/vrtna-oprema/vulkanski-pijesak-perlit-1l-oglas-7579082

[13] http://cs.wikipedia.org/wiki/Vermikulit

[14] http://www.kastell-pro.com/liapor-werkstoff.html

[15] http://www.ytong.hr/#_sub1327

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