

Laki beton

Radmilo, Ivan

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:527018>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-02**



Repository / Repozitorij:

[FCEAG Repository - Repository of the Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy, University of Split](#)



UNIVERSITY OF SPLIT



**SVEUČILIŠTE U SPLITU FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Završni rad

Ivan Radmilo

Split, 2014

**SVEUČILIŠTE U SPLITU FAKULTET GRAĐEVINARSTVA,
ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Ivan Radmilo

Laki beton

Završni rad

Split, 2014

Laki beton

Sažetak:

Laki betoni u odnosu na normalne betone imaju manju gustoću, a takva manja gustoća postiže se stvaranjem međuprostora između zrna krupnog agregata, stvaranjem pora u mortu ili upotrebom agregata sa velikim sadržajem pora. Zbog manje gustoće uglavnom posjeduju manje čvrstoće, a najveće čvrstoće postižu lakoagregatni betoni s agregatom od ekspandirane pečene gline ili zgure, te s agregatom prirodnog porijekla. U eksperimentalnom dijelu rada napravljene su 3 različite mješavine samozbijajućeg lakog agregata s dodatkom metakaolina te prirodnog i drobljenog agregata. Prikazani su i analizirani rezultati ispitivanja u svježem i očvrslom stanju.

Ključne riječi:

Laki beton, liapor, obradivost, kameno brašno, pore, gustoća, čvrstoća

(lightweight concrete with addition of metakaolin and natural and crushed aggregate)

Abstract:

Lightweight concrete compared to normal concretes have a lower density, and such smaller density is achieved by creating a space between the grains of coarse aggregate, creating voids in the mortar or using aggregates with large pores. Due to the lower density they generally have lower strength and maximum strength is achieved using aggregates of expanded baked clay or slag or the aggregate of natural origin. In the experimental part of work there were made 3 different blends of selfcompacting lightweight aggregate with the addition of metakaolin and natural and crushed aggregate. Results and analysis are presented in fresh and hardend state.

Key words:

Lightweight concrete, liapor, concrete workability, rock flour, pores, density, strength

SVEUČILIŠTE U SPLITU

FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ: **PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ
GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Ivan Radmilo

BROJ INDEKSA: 3939

KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**

PREDMET: Građevinski materijali

ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD

Tema: Laki beton

Opis zadatka: Zadatak kandidata je proučiti lake betone. U eksperimentalnom dijelu radu potrebno je izraditi mješavine lakog betona sa dodatkom metakaolina te prirodnog ili drobljenog agregata, te je usporediti sa referentnom. Betonu je potrebno ispitati obradivost u svježem stanju metodom slijeganja te odrediti sadržaja zraka. U očvrslom stanju potrebno je na uzorcima starosti od 3, 7 te 28 dana odrediti tlačnu čvrstoću. Dobivene rezultate potrebno je prikazati te analizirati.

U Splitu, 04.09.2014

Voditelj završnog rada:

Izv.prof.dr.sc. Sandra Juradin

Sadržaj

<u>1. Laki beton</u>	1
<u>1.1. Povijest i razvoj lakih betona</u>	2
<u>1.2. Svojstva lakih betona</u>	2
<u>2. Vrste lakih betona</u>	5
<u>2.1. Lakoagregatni betoni</u>	5
<u>2.1.1. Prirodni agregati za lakoagregatni beton</u>	5
<u>2.1.2. Ekspandirani i umjetni agregati za lakoagregatni beton</u>	7
<u>2.1.3. Sekundarne sirovine</u>	10
<u>2.2. Laki betoni od jednozrnatog agregata</u>	11
<u>2.3. Čelijasti betoni</u>	12
<u>2.3.1. Pjenobeton</u>	13
<u>2.3.2. Plinobeton</u>	13
<u>3. Dosadašnja istraživanja lakih betona</u>	14
<u>3.1. Čvrstoća i elastična svojstva lakih betona</u>	14
<u>3.1.1. Uvod</u>	14
<u>3.1.2. Materijali i metodologija</u>	15
<u>3.1.3. Rezultati ispitivanja i diskusija</u>	17
<u>3.1.4. Zaključak</u>	21
<u>3.2. Utjecaj volumne frakcije i prirode finog lakog agregata na mehanička i termalna svojstva strukturalnog betona</u>	21
<u>3.2.1. Uvod</u>	21
<u>3.2.2. Kemijski i mineraloški sastav lakih agregata</u>	21
<u>3.2.3. Fizikalna svojstva lakih agregata</u>	22
<u>3.2.4. Eksperimentalna procedura</u>	24
<u>3.2.5. Utjecaj lakog agregata na svojstva betona</u>	25
<u>3.2.6. Zaključak</u>	26
<u>3.3. Početno ispitivanje mješavine betona s laganim agregatom</u>	26
<u>3.3.1. Uvod</u>	26
<u>3.3.2. Podaci o lakom betonu</u>	27
<u>3.3.3. Formulacija jednadžbi</u>	27

3.3.4. Valjanost postupka	30
3.3.5. Zaključak	30
4. Eksperimentalni dio rada	31
4.1. Materijali	31
4.1.1. Cement	31
4.1.2. Agregati	32
4.1.3. Dodaci betonu	36
4.2. Proračun sastava betona	38
4.3. Način pripreme pokusnih mješavina lakog betona	38
4.4. Ispitivanja provedena na pokusnim mješavinama	39
4.4.1. Metoda slijeganja	39
4.4.2. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu	41
4.4.3. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona	43
5. Zaključak	45
Literatura	46

1. Laki betoni

Betoni kod kojih se volumna masa kreće u rasponima od otprilike 600 - 1500 kg/m³, a može doseći i 2000 kg/m³ mogu se nazivat laki betoni. Zbog toga svojstva svrstavaju se u skupinu specijalnih beton jer se volumna masa običnih betona kreće u rasponima od 2400 - 2500 kg/m³. Do takvog smanjenja volumne mase dolazi zbog više razloga:

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

Manja volumna masa sa sobom nosi dobre i loše stvari, pa tako laki beton ima bolja izolacijska svojstva posebno izolaciju na toplinu, međutim njegova čvrstoća i otpornost na habanje su slabiji nego kod običnih betona te je općenito skuplji za proizvodnju i kompliciraniji za ugradnju. No uz sve nedostatke primjena lakog betona je velika, te u nekim specijalnim svrhama pokazuje svoje malobrojne ali bitne vrline.

Prema namjeni lake betone može se podijeliti na:

- konstrukcijske,
- izolacijske,
- konstrukcijsko - izolacijske.

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

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

1.1. Povijest i razvoj lakih betona

Može se reći da je u antičko doba razvoj samog lakog betona pratio razvoj rimske civilizacije. Mnogobrojne bitne građevine u Rimu kao što su Koloseum, ceste te Panteon su građeni uz pomoć tadašnje tehnologije lakog betona. Kupola samog Panteona je izgrađena od jednog dijela promjera 43.5 metara te je ujedno najveća kupola ikada izrađena uporabom zidne konstrukcije, a nebi bila moguća bez upotrebe tadašnje tehnologije lakih betona. Rimljani su u svojim građevinama koristili materijal vulkanskog podrijetla zvan "pozzolana", "gypsum"-sulfatni mineral te vapno. Bitno je napomeniti da rimljani nisu dovoljno dobro poznavali karakteristike lakog betona da bi znali gdje ga je efikasno ugraditi a gdje ne. Jednostavno su koristili agregate koji su bili pristutni u njihovoj okolini. Ozbiljni razvoj lakih betona počinje u 19. stoljeću gdje se koristi agregat vulkanskog podrijetla, a u isto vrijeme se eksperimentira sa otpadnim materijalima potaknutim industrijskom revolucijom (zgura, školja i troska). Početkom 20. stoljeća pojavljuju se i laki betona sa krupnozrnatima lakim agregatom (ekspandirana glina, škriljevac i zgura). Povijest je opet utjecala na razvoj lakih betona pa se tako nakon drugog svjetskog rata u nedostatku konkretnih materijala koristili otpadci opekarske proizvodnje i materijala iz ruševina da bi se dobio laki beton. Nakon tog razdoblja tehnologija lakih betona nastavlja u pravom smjeru pa se danas laki betoni prave od modernih materijala.

1.2. Svojstva lakih betona

Kao što je već kazano volumna masa lakih betona kreće se od 600 - 1500(2000) kg/m³. Volumna masa je bitno svojstvo jer želimo da nam beton bude što lakši da stvara manje opterećenje od vlastite težine. Tu se javlja mali problem lakih betona, a to je da su količine cementa za 1 m³ lakog betona i do 70% veće od onih potrebnih za 1 m³ običnog betona. Volumna masa služi samo kao ocjena kvalitete, jer svojstva lakog betona koja se gledaju pri projektiranju i ugradnju su njegova čvrstoća, otpornost, koeficijent toplinske vodljivost, otpornost na mraz itd. Kod ispitivanja se koriste uzorci kocaka brida 15 cm.

Laki betoni imaju manji modul elastičnosti te su krutiji u odnosu na obične betone pa se zbog toga ponašaju skoro totalno elastično sve do samog sloma. Modul elastičnosti lakih

betona uglavnom varira oko vrijednosti 20 GPa, dok obični betoni imaju modul elastičnosti od oko 35 GPa.

Čvrstoća na pritiska lakih betona ima velika amplitude koje se kreću u granicama manjima od 1 MPa pa sve do 60 MPa. Ove varijacije su velike zbog velikog izbora raznolikih vrsta lakih agregata. No čvrstoća na pritisak osim o vrsti agregata ovisi i o volumnoj masi, količini i vrsti veziva te o vodocementnom faktoru. Ovisno o vrsti lakog betona i čvrstoći koja se želi postići količina cementa će uglavnom biti u granicama od 150 - 550 kg/m³. Najveću čvrstoću beton postiže s agregatom os ekspanzirane pečene gline te s agregatom prirodnog porijekla. Takav se beton koristi kod nosivih konstrukcija a djeluje kao i izolacija. Najmanju čvrstoću (manju od 1 MPa) daje agregat od perlita, vermikulita ili ekspanziranog polimernog materijala. Gustoća mu je kreće u granicama od 300 - 600 kg/m³, i iako mu je čvrstoća vrlo mala on ima veliku primjenu zbog odličnih izolacijskih svojstava.

U pravilu smanjenjem volumske mase toplinska izolacijska svojstva lakog betona se povećavaju. Pa tako u odnosu na volumensku masu imamo betone sa koeficijentima toplinske provodljivosti od 0,05 W/mK (za izolacijske lake betone) te 0,25 - 0,85 W/mK (za izolacijsko-konstruktivne lake betone). Izolacijska svojstva lakih betona su puno bolja od običnih (kojima je volumenska masa oko 2400 kg/m³) kod kojih se koeficijent kreće u granicama od 1,05 do 1,25 W/mK.

Još jedna prednost lakog betona u odnosu na obični beton je i bolja zvučna izolacija s obzirom na zvuk koji se širi zrakom, ali slabija izolacijska svojstva u odnosu na zvuk koji se prenosi udarcem. Zvučna izolacija kao i toplinska uglavnom ovisi o njegovoj volumskoj masi.

Kod pojave bubrenja i skupljanja laki beton ima veće probleme od običnog betona, što je posebno izraženo kod lakog betona s lakim agregatom. Uslijed gubitka vode sadržane u lakom betonu dolazi do pojave stvaranja mrežasti pukotina koje jako utječu na osnovna svojstva lakog betona. Agregat koji se nalazi u betonskoj smjesi prima naprezanje koje se javlja uslijed bubrenja i skupljanja, pa zbog toga problemi koji će se javljat uglavnom ovise i o elastičnim svojstvima tog agregata, odnosno kakve deformacije on može preuzeti u odnosu na deformacije cementnog kamena. Osim o agregatu skupljanje i bubrenje može ovisiti i o utjecaju vode, cementu i dodacima. Bubrenje nastaje u periodu kad kristalna struktura još nije poprimila potrebnu čvrstoću, a manifestira se uslijed razdvajajućeg utjecaja vode u prostoru između zrna i finih kapilara.

Puzanje je kod lakih betona uglavnom veće nego kod običnih betona, a uglavnom ovisi o vrsti agregata te o uvjetima u kojima se nalazi beton.

Laki betoni zbog svoje manje volumenske mase i većih pora lakše upijaju vodu nego obični betoni. Odabirom bolje volumenske mase može se utjecati na upijanje vode. Vodonepropusnost također ovisi o volumenskoj masi, odnosno što je manja volumenska masa bit će manja vodonepropusnost.

Otpornost na mraz bitna je samo kod lakih betona koji sudjeluju kako nosiva konstrukcija, dok kod ostalih uporaba gotovo uvijek pokazuju zadovoljavajuću otpornost. Relativno visoko upijanje vode ne izaziva negativan utjecaj na njihovu otpornost. Dodaci koji se stavljaju u smjesu i koji pomažu pri oblikovanju povećavaju otpornost na mraz.

Pošto je već rečeno da su laki betoni dobri izolatori, pogotovo na toplinu, lako je zaključiti da će imati i dobro opterećenje na djelovanje požara. Uglavnom ovisi o svojstvima agregata, pa tako agregati na vulkanskoj bazi daju bolja opterećenja nego ostali agregati.

Uz prisustvo vlažnosti kod lakog betona može doći i do korozije. Može se stvoriti kad u smjesu lakog betona uđu određene štetne primjese ili kad se laki beton nalazi u štetnoj okolini. Veličina otpornosti lakog betona ovisi o njegovoj gustoći, pa tako laki betoni veće gustoće imaju veću otpornost nego laki betoni manje gustoće. Za povećanje otpornosti i zaštite lakog betona najbolje je koristiti zaštitne premaze koje onemogućuju pristup vlažnosti i štetnih čestica lakom betonu.

2. Vrste lakih betona

2.1. Lakoagregatni betoni

Lakoagregatni betoni, kao što im i sam naziv kaže, dobivaju se smjesom betona s agregatima male težine. Agregati mogu biti i od prirodnog porijekla i umjetni. Svi lakoagregatni betoni imaju sposobnost velikog upijanja vode. Prilikom pravljenja smjese betona agregat će ili upijati ili ispuštati vodu u smjesu što ovisi o tome koliko je bilo vode u agregatu prvobitno. Zbog toga je nezgodno znati koliko staviti vode u recepturu.

Zrna lakog agregata se u mješavini mogu pojaviti sa velikim šupljinama, pa zbog manje volumne mase agregata od cementne paste često se dogodi da zrna isplivaju na površinu paste, odnosno dolazi do segregacije tipične za laki beton. Pri ovakom slučaju treba paziti sa dodavanjem vode, te ako se pogodi receptura segregacija bude minimalna.

Prema vrsti agregata koji se koristi za izradu lakoagregatnog betona može napraviti podjelu na:

- prirodni,
- ekspanzirani i pečeni (umjetni),
- sekundarne sirovine.

2.1.1. Prirodni agregati za lakoagregatni beton

Prirodni lakoagregatni betoni su sedimentnog i vulkanskog porijekla, a njihovo glavno svojstvo je visok stupanj poroznosti.

Agregati sedimentnog porijekla spadaju u sedimentne stijene koju su pretežito silikatnog sastava. Nastali su taloženjem ostataka drugih stijena djelovanjem vode, leda i vjetrova pa zbog toga imaju velike pore u svojoj strukturi. Zbog velikih pora imaju malu zapreminsku težinu pa se tako njihova primjena temelji samo na izolacijskim svrhama. Zbog svoje velike poroznosti ovakoj vrsti agregata potrebno je dodavati puno vode pri miješanju, pa zbog

velikih količina vode povećava se efekt skupljanja te dolazi do velikih pukotina, pa se pri izradi ovakog betona moraju poduzeti određene sigurnosne mjere.

Najčešće se rade s agregatom od diatomita u prahu čija poroznost iznosi 80 - 85%, sadržaj Si(OH)_4 iznosi 65 - 90%, a zapremninska težina iznosi 120 - 550 kg/m^3 .



Slika 2.1. Dijatomit [7]

Agregati vulkanskog podrijetla koji se najčešće koriste su plovućeac i pucolan. Ovakve stijene nastaju pri izlasku vruće lave na površinu zemlje i njenom stvrdnjavanju, pri čemu nastaje veći broj stijena od kojih pri izradi lakog betona koristimo samo plovućeac i pucolan.

Plovućeac ima porastu strukturu a veličina zrna mu se kreće u rasponu od 1 - 40 mm. Plovućeac je poželjno daljnje obraditi pečenjem pri čemu će se na površini zrna stvoriti opna koja smanjuje poroznost, a povećava čvrstoću i težinu. Plovućeac nastaje naglim hlađenjem lave. Zapremninska težina obrađenog plovućca u komadima iznosi 1450 - 1650 kg/m^3 .



Slika 2.2. Plovućeac [8]

Pucolan nastaje nešto sporijim hlađenjem lave i sa većom količinom uključenih plinova pa mu je zbog tih plinova struktura porastija odnosno pjenastija. Zapremninska težina im se kreće od 700 - 1200 kg/m^3 što ovisi o krupnoći zrna. Pretežito sadrže SiO_2 te Al_2O_3 .

2.1.2. Ekspandirani i umjetni agregati za lakoagregatni beton

Ekspandirani i umjetni agregati, kao što im naziv kaže, dobivaju se prerađivanjem već gotovih materijala. Postupci kojima se gotov materijal prerađuje su: sinteriranje, žarenje i ekspandiranje materijala. Sinteriranje je postupak okrupnjavanja sitnozrnatog materijala zagrijavanjem na temperaturu površinskog taljenja, na kojoj se zrna staljuju u čvrste, ali porozne aglomerate. Žarenje je toplinska obrada kojom se materijal zagrijava na visoku temperaturi i onda hladi na sobnoj temperaturi. Ekspandiranje je postupak stvaranja ćelijaste strukture u materijala zagrijavanjem na temperaturu preko 1000 °C što izaziva pojavu plinova i prijelaz materijala u piroplastično stanje. U daljnjem dijelu teksta opisano je nekoliko ovakvih agregata.

Perlit je amorfno vulkansko staklo koje sadrži relativno veliku količinu vode u svojim porama, a uglavnom nastaje hidratacijom obsidiana. Volumenska masa mu se kreće u granicama od 50 - 640 kg/m³, a sastoji se većinom od SiO₂ (70-75%) i Al₂O₃ (12-15%). Prije obrade perlit se usitnjava te drobi da bi se dobila njegova željena granulacija koja je potrebna za postupak ekspandiranja. Ekspandiranje perlita vrši se pri temperaturama od 700 - 1200 °C te tada nastaje ekspandirani perlit koji ima ćelijastu strukturu zbog velikog sadržaja unutarnjih zatvorenih pora. Gotovi, obrađeni perlit ima malu gustoću, veoma malu čvrstoću te veliko upijanje i skupljanje vlage. Zbog tih mana nekoristi se kao agregat za nosive betone, međutim njegova primjena je velika u izolacijskim betonima zbog toga što ima malu toplinsku vodljivost.



Slika 2.4. Izgled perlita u procesima obrade [9]

Vermikulit je silikatni mineral klasificiran kao filosilikat a velika mu je odlika što jako ekspandira kad se zagrijava. U površini zemlje nastaje hidrotermalnim promjenama biotita i flogopita. Ekspandira pri temperaturama od 600 - 1000 °C i povećava svoj volumen za 35 puta. Prije procesa se kao i perlit drobi na željenu granulaciju, a nakon procesa dobiva porastu, ćelijastu strukturu koja je jako pogodna za izolacijske lake betone gdje je i njegova glavna primjena. Glavne osobine su mu: velika toplinska izolacijska svojstva zbog velikih pora i šupljina, te mala toplinska provodljivost što je jako bitno kod protupožarnih betona.

Ekspandirana glina ili modernije zvano glinopor je mineralni zasipni materijal od finoporoznih, čvrstih perlica gline. Posjeduje relativno malu gustoću (400 - 600 kg/m³), što znači da je pogodna kao dodatak estrihu i betonu. Posebno je pogodna i kao izolacijski materijal. Koeficijent toplinske vodljivosti kreće se u granicama 0.08 - 0.2 W/mK. Materijal od kojeg se proizvodi glinopor je glina ili škrljac s visokim sadržajem SiO₂. On se miješa s različitim ostalim primjesama da bi se dobio optimalan sastav te se zatim miješa s vodom i gnječi kako bi se od mješavine dobile granule. Pečenje takve smjese vrši se na temperaturama većima od 1200 °C. Gotove granule dobivaju opnu koja povećava mehanička svojstva te granule, dok se u unutrašnjosti formiraju pore koje poboljšavaju izolacijska svojstva. Prosječna poroznost samih zrna kreće se u granicama od 30 - 80 %, dok je međuzrnata poroznost veća od 35%, zbog mogućnosti ugrađivanja dovoljne količine vezivnog materijala. Ekspandirana glina se koristi uglavnom za konstrukcijske i konstrukcijsko - izolacijske betone.

Ekspandirani polimerni materijal moderna (1950 g.) je vrsta agregata koja nastaje procesom propuhivanja polimernog materijala zrakom na odgovarajućoj temperaturi ili u kombinaciji s dodatkom sredstva za pjenjenje. Tada se stvaraju kuglasta zrna veličine i do 8 mm, koje sadrže velike količine ekspandiranog polistirena. Zbog male gustoće (100 kg/m³) i slabih mehaničkih svojstava ovaj agregat ima svoju ulogu samo u proizvodnji izolacijskog betona



Slika 2.5. Ugradnja ekspaniranog polimernog materijala (polistiren). [10]

Toplinsko - izolacijski laki betoni su vrsta lakoagregatnih betona koji se proizvode s otvorenom strukturom. Mogu se raditi od jednozrnatog agregata ili s dvije frakcije agregata, kod kojeg je međuzrnata poroznost nepotpuno ispunjena vezivnim mortom, gdje je volumen cementnog morta manji od 10% od volumena betona. Zbog male količine cementnog morta ova vrsta lakoagregatnog betona ima malu mehaničku čvrstoću. Ako planiramo napraviti laki toplinsko - izolacijski beton s agregatom od ekspanirane gline zatvorene strukture tada se ovaj laki agregat može upotrijebiti i u kombinaciji s drugim materijalima čija je zapremninska težina manja ili jednaka zapremninskoj težini upotrijebljene frakcije agregata.

Konstruktivski laki beton za razliku od toplinsko izolacijskog betona proizvodi se sa zatvorenom strukturom, te je kod njega količina vezivnog morta veća od 40%, što ga zapravo čini oko 4 puta jačim od toplinsko izolacijskog. Pošto je čvrstoća zrna agregata manja od cementnog morta tada će se prilikom loma ovaj beton slomiti u zrnima. Čvrstoća zrna može se povećati ugrađivanjem sitnijih frakcija.

Konstruktivsko - izolacijski laki beton predstavlja granicu između konstruktivskih i izolacijskih betona. U odnosu na strukturu ova vrsta lakoagregatnog betona može se izrađivati na sve tri vrste strukture, a najčešća je zatvorena s količinom cementa u granicama od 10 - 20

% volumena betona. Poboljšanje mehaničkih svojstava vrši se povećanjem količine cementnog veziva te ugrađivanjem sitne frakcije.

2.1.3. Sekundarne sirovine

Moderna industrija razvijala se zajedno s ekologijom, pa su tako nastali agregati dobiveni iz ostataka u industrijskim procesima. Olakotna okolnost je ta što sve sekundarne sirovine visokih peći imaju sličan kemijski sastav kao i prirodni porozni porculan. Neke sirovine se mogu koristiti nakon jednostavne obrade (drobljenje i sortiranje), a neke nakon detaljnije obrade (termička obrada).

Ložišna kotlova zgora je najčešća sekundarna sirovina a nastaje pri preradi raznih materijala u visokim pećima, gdje se skuplja kao otpad na vrhu peći. Osobine zgora će ovisiti o gorivu koje se koristilo u visokim pećima, a gustoća se kreće u granicama od 600 - 1500 kg/m³. Ohlađena zgora sadrži u sebi ostatke sulfata koji u dodiru s vlagom povećavaju svoj volumen pa tako mogu deformirati beton u kojem se nalaze. Može doći do sulfatne korozije nakon što zgora reagira s cementom u cementnom kamenu, zbog toga je potrebno smanjiti količinu SO₃ na manju od 1% da bi se ovi problemi umanjili.

Ekspandirana zgora se dobije također iz visokih peći ali samo pri obradi željeza, gdje se skuplja na vrhu kotla kao otpad koji se skupi mrežama. U tom trenutku zgora ima temperaturu od otprilike 1400 °C te se izlijeva u spremnike u tankim slojevima. Takvoj zgori se dodaje voda pod pritiskom, te pri dodiru sa zgorom instantno isparava zbog njene velike temperature. Tim postupkom u zgori nastaju pore zraka koje ravnomjerno čine porastu strukturu zgora. Nakon hlađenja zgora se ohladi te se zdrobi na željene frakcije. Zdrobljena zrna zgora su hrapava što je dobra vrlina jer će se prilikom miješanja s cementom stvoriti veće adhezivne sile između cementa i agregata, što će se manifestirati kao veća čvrstoća samog betona. Gustoća ovakve zgora kreće se u granicama od 400 - 800 kg/m³.

Granulirana zgora se dobije procesom u kome se zgora iz visokih peći naglo hladi potapanjem u vodu. Tada se dobivaju zrna s velikom količinom zračnih pora koje nastaju pri miješanju vode sa zgorom. Najčešće se koristi kisela zgora pri ovom procesu, a bazična zgora

se uglavnom koristi kao dodatak samom cementu. Upijanje vode ovakve zgre iznosi 5 - 23 %, dok joj se gustoća najčešće kreće u granicama od 500 do 1300 kg/m³.

Kristalna zgura dobiva se sporim hlađenjem zgre iz visokih peći na način da se odlijeva u slojevima. Tim postupkom plinovi pri hlađenju rade porastu strukturu u zguri a gustoća takve zgre kreće se u granicama od 500 - 1700 kg/m³.



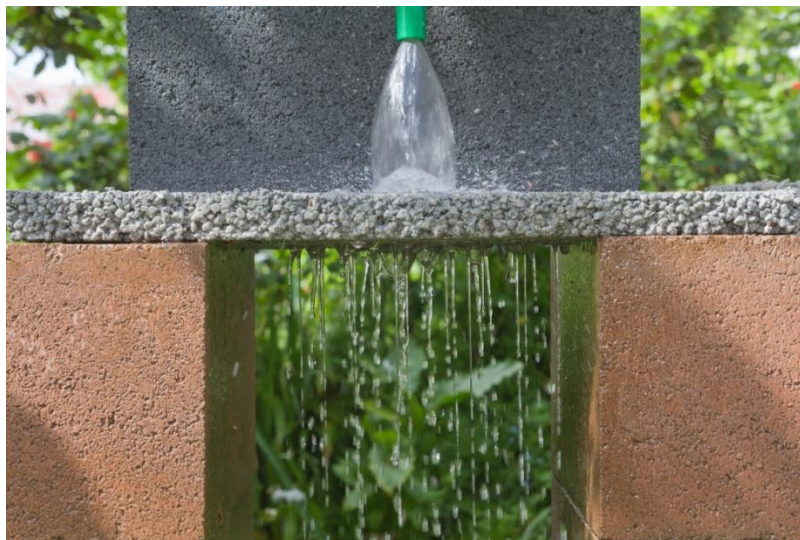
Slika 2.6. Zgura(crno) "pluta" na rastaljenom metalu. [11]

Leteći pepeo iz termoelektrana nastaje izgaranje uglavnom ugljena u termoelektranama, a zajedno sa otpadnim plinova prolazi kroz čistaće-filtre na vrhu dimljaka gdje se taloži i skuplja. Pomiješan sa 20 - 25 % vode čini granule koje se zatim peku na temperaturama malo manjima od točke sinterirana. Takve obrađene granule u sebi sadrže veliku količinu pora. Leteći pepeo za izradu lakog betona ne smije u sbi sadržavati velike količine sumpora ili drugih štetnih materijala sličnih sumporu. Gustoća se kreće u granicama od 600 - 900 kg/m³.

2.2. Laki betoni od jednozrnatog agregata

Izostavljanjem sitne frakcije iz granulometrijskog sastava agregata ili uzimanjem samo jedne frakcije dobit ćemo jednozrnatu agregat. Kod takvog granulometrijskog sastava, zbog izostanka sitnijih frakcija, dogodit će se to da će između zrna jednakih veličina ostati relativno velike šupljine i pore. Ubacivanjem u sastav drugih frakcija dobit će se beton manjih pora i

veće gustoće, što sami određujemo. Bolje zbijanje također doprinosi smanjenu veličine pora, ali je i dalje glavni čimbenik više granulacija.



Slika 2.7. Ponašanje beotna od jednozrnatog agregata [4]

Značajna stvar za ovakav beton je to da je on otporan na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, jer u sebi nema kapilarnih pora. Količina cementa treba biti najmanje 250 kg/m^3 , i pri dodavanju cementa treba paziti, jer prevelika količina će smanjiti broj šupljina

2.3. Čelijasti betoni

Čelijasti betoni su oni u čije je tijelo prije stvrdavanja utisnut zrak ili je kemijskim putem proizveden plin čiji mjehurići ekspandiraju u betonu. Čelijasti betoni na bazi portland i metalurškog cementa čija je struktura porozna mogu se dobiti ako se čistoj cementnoj pasti dodaju aktivni ili inertni fini agregati kao što su: pijesak, kvarc, šećerna glina, škriljac, leteći pepeo, pucolan, itd. Gustoća ovakvih betona se kreće u granicama od $600 - 1200 \text{ kg/m}^3$, a čvrstoća na pritisak od 3,5 do 10 MPa. Zbog velikih pora imaju odlična izolacijska svojstva a uglavnom se koriste za ispune među glavnim konstruktivnim elementima i slično.

Podjela čelijastih betona je sljedeća:

- pjenobetoni,
- plinobetoni.

2.3.1. Pjenobeton

Pjenobeton je materijal dobiven spajanjem izrazito tekuće cementne paste u koju je injektirana stabilna pjena koja se najčešće proizvodi na terenu. Najčešće se upotrebljava za izradu glazura ili estriha. Za dobivanje pjenobetona se uobičajenim sastojcima betona najčešće dodaje aluminijski prah s kalcijevim karbidom. Kemijskim utjecajem na vezivo dolazi do stvaranja mjehurića plina koji ostaju fiksirani pri vezanju cementa. Gustoća im se kreće u granicama od 300 - 900 kg/m³, a tlačna čvrstoća 3 do 20 MPa.

Prednosti pjenobetona su te što nema slijeganja ni potrebe za vibriranjem. Također zbog male gustoće ima malu težinu, slobodno teče odnosno popunjava sve praznine, jednom kad se ugradi ne zahtjeva održavanje te je odličan izolator. Najveća mu je mana što njegovim korištenjem dolazi do segregacije pjene.

2.3.2 Plinobeton

Plinobeton se proizvodi u autoklavima, na visokoj temperaturi i pritisku. Uglavnom se koristi za tvorničku izradu blokova za zidanje i prefabriciranih elemenata. Sirovine za proizvodnju su: cement, leteći pepeo, sitno mljeveni kvarcni pijesak, vapno te dodatak za ekspanziju. Uloga dodatka za ekspanziju je ta da stvara veliku količinu mjehurića plina čime nastaje ćelijasta struktura u još svježem betonu. Ako se kao dodatak za ekspanziju koristi kalcijev karbid tada se u svježem betonu razvija acetilen te se takav proizvod naziva ytong. Ako je dodatak aluminijski prah, u svježem betonu razvija se vodik te gotovi proizvod nosi naziv siporeks.

Siporeks ima poroznu strukturu sa zatvorenim porama, te je zbog tih vrlina upijanje vode i vlage svedeno na minimum. Upravo zbog toga je ovaj materijal otporan na mraz, a također se koristi i kao odličan izolator. Nezapaljiv je materijal te se veoma jednostavno obrađuje različitim alatima, čak laganije i jednostavnije nego drvo. Skupljanje siporeksa je znatno i kreće se u granicama od 0,1 do 0,5 mm/m.

3. Dosadašnja istraživanja lakih betona

Kako je znanost o lakim betonima visokih čvrstoća napredovala došlo je do toga da se takvi laki betoni počinju koristiti u jednakoj mjeri kao i obični betoni. Podaci o mehaničkim svojstvima lakih betona jako su bitni kod primjene lakih betona visoke čvrstoće kao konstruktivnih elemenata. Također je potrebno poznavati svojstva samog agregata i primjesa jer će i o njima uvelike ovisiti svojstva samog betona. Međutim iako je znanost jako napredovala i dalje dolazi do određenih nepoznanica kod mehaničkih svojstava pa su tako potrebna dodatna istraživanja.

Objavljeni su razni radovi u kojima su prikazani rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava lakih betona te mehaničkih svojstava agregata. Turčini Niyazi Ugur Kockal i Turan Izturan napravili su izvještaj istraživanja čvrstoće i elastičnih svojstava lakih betona. Nguyen, Beaucour, Ortola i Noumowe sa francuskog Cergy-Pontoise sveučilišta proučavali su utjecaj volumne frakcije i prirode finog lakog agregata na mehanička i termalna svojstva strukturalnog betona. Keun-Hyeok Yang, Gwang-Hee Kim i Yong-Hwa Choi u svojem su istraživanju su proučavali početnu mješavinu betona s lakim agregatom.

3.1. Čvrstoća i elastična svojstva lakih betona

3.1.1. Uvod

Kockal i Izturan proučavali su utjecaj karakteristika 4 vrste agregata (2 od sinteriranog letećeg pepela te po jedan od hladno prešanog laganog letećeg pepela i vapnenca) na snagu i elastična svojstva betona. Različiti modeli su korišteni da bi se pretpostavile vrijednosti čvrstoća i modula elastičnosti.

Velike količine letećeg pepela i dalje se nalaze u prirodi i na odlagalištima što uzrokuje veliko onečišćenje zraka, tla i vode. Da bi se smanjio takav utjecaj na prirodu leteći pepeo se počeo koristiti kao agregat za laki beton.

3.1.2. Materijali i metodologija

Kemijski sastavi Portland cementa (CEM I 42,5 R), letećeg pepela, bentonita, staklenog praha i silicija prikazani su u tablici 3.1. Fizikalna svojstva i rezultati tlačne čvrstoće cementa i letećeg pepela određeni su prema TS 639.

Oxide (%)	C	FA	BN	GP	SF
SiO ₂	20.55	59.00	57.84	70.62	94.12
Al ₂ O ₃	4.78	19.58	13.77	1.38	0.57
Fe ₂ O ₃	3.64	7.23	6.14	0.82	0.55
CaO	63.94	0.54	3.75	8.75	0.50
MgO	1.50	4.64	3.04	3.54	1.30
SO ₃	2.77	0.69	1.34	1.85	0.42
Na ₂ O	0.25	0.48	2.80	10.85	0.54
K ₂ O	0.77	5.95	2.80	1.53	1.75
Cl ⁻	0.035	0.011	0.004	0.003	0.0049
Loss on ignition	1.24	0.49	8.40	0.12	0.19
CaCO ₃ + MgCO ₃	-	-	6.50	0.75	-
Insoluble residue	1.36	-	-	-	-
Free CaO	1.25	-	-	-	-
Specific gravity (g/cm ³)	3.16	2.06	2.40	2.50	2.28

Tablica 3.1. Kemijski sastav portland cementa, letećeg pepela, bentonita, staklenog praha i silicija. [1]

Od 18 različitih vrsta sinteriranih lakih agregata od letećeg pepela uzetih za ovo istraživanje, izabrana su dva (agregat sa 10% bentonita sinteriran na 1200 °C te agregat sa 10% staklenog praha sinterira također na 1200 °C). Izabrani su zbog svoje male gustoće i visoke čvrstoće iz kojih će se dobiti laki beton velike čvrstoće. Agregat od hladno prešanog laganog letećeg pepela (CB) i agregat od lomljenog vapnenca (NW) su također korišteni u izradi betona za usporedbu njihovih svojstava.

Da bi se odredila čvrstoća lakih agregata, individualne čestice tog agregata postavljene su između paralelnih ploča i spljoštene. Minimalno 20 kuglica agregata promjera 10 mm testirane su da bi se proračunala čvrstoća na drobljenje svakog agregata. Ukupna poroznost i distribucija pora čestica agregata određene su instrumentom sa živom pri pritisku od 220 MPa. Specifična težina i upijanje vode određeni su po ASTM C 128 i ASTM C 127. Specifična težina prirodnog pijeska je bila 2.62 a zdrobljenog pijeska 2.63. Krupni agregat je testiran u

peći, u suhom stanju kako bi se utvrdila jedinica težine i sadržaj pora. Tablica 3.2. prikazuje rezultate testova na agregatima korištenim u proizvodnji betona. Hladno prešani leteći pepeo je imao najmanju težinu a najveću čvrstoću na drobljenje. Čvrstoća na drobljenje umjetnih agregata je manja nego ona od prirodnih agregata zbog različite porne strukture.

Characteristics	Aggregates			
	Cold-bonded	10B1200	10G1200	Normalweight
Specific gravity based on SSD condition	1.63	1.57	1.60	2.71
Apparent specific gravity	1.89	1.58	1.60	2.71
Specific gravity based on OD condition	1.30	1.56	1.59	2.70
28-h water absorption (%)	25.5	0.7	0.7	0.8
Total porosity (%)	31.1	8.4	6.2	-
Critical pore diameter (nm)	398.4	28.03	12.49	-
Rodded bulk density (kg/m ³)	842	993	999	1537
Loose bulk density (kg/m ³)	789	933	936	1433
Voids (%) loose	39.2	40.1	41.0	46.8
Voids (%) rodded	35.1	36.2	37.0	43.0
ACV (%)	35	28	30	23
Pellet crushing strength (MPa)	3.7	12.0	9.6	-

Tablica 3.2. Karakteristike agregata korištenih u proizvodnji betona [1]

U industriji su radi praktičnosti upotrebe betoni dobili skraćenice, odnosno kodirani su po vrsti agregata korištenih u izradi: LWGC (laki beton od letećeg pepela s dodatkom bentonita), LWCC (laki beton s hladno prešanim letećim pepelom), NWC (beton standardne težine) te LWBC (laki beton od letećeg pepela s dodatkom bentonita). Prvobitne mješavine betona su napravljene da bi se dobilo slijeganje od 150 mm, količina zraka od 4% i željena tlačna čvrstoća. Uzorci lakog betona su napravljeni koristeći obični portland cement (CEM I 42.5 R), superplastifikator, aerant, vodu, obični pijesak, smrvljeni pijesak i lagani grubi agregat s omjerom vode i veziva 0.26. Recepture su dane u tablici 3.3.

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)

Tablica 3.3. Sastav mješavina [1]

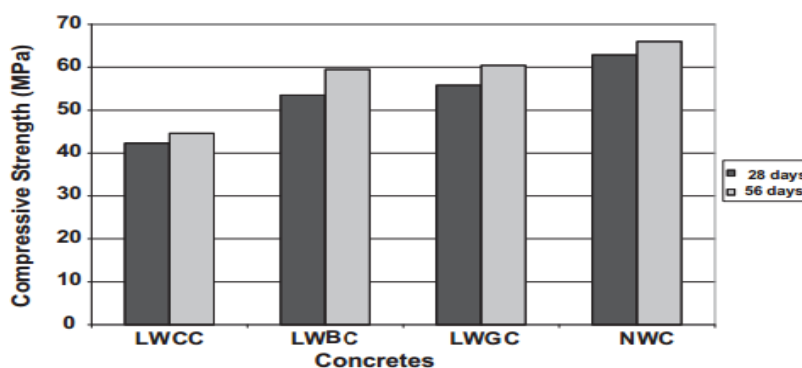
Test slijeganja na svježem betonu je učinjen odmah nakon pravljenja i to po ASTM C 143. Gustoća i količina zraka takvog svježeg betona izmjerena je po ASTM C 138 i ASTM C 231. Oba testa dala su jako slične rezultate.

Za testiranje očvrstlog betona korišteni su cilindrični uzorci dimenzija 10 x 20 cm da bi se odredila gustoća takvog betona. Tlačna čvrstoća, modul elastičnosti i čvrstoća na cijepanje izmjerene su prema ASTM C 39, ASTM C 469 i ASTM C 496, i to za 28 i 56 dan starosti uzorka.

3.1.3. Rezultati ispitivanja i diskusija

U slučaju da bi se dobio laki beton sličnog slijeganja i količine zraka kao i normalni beton potrebno je koristiti manju količinu superplastifikatora i aeranta, što ujedno i smanjuje cijenu proizvodnje. Što je manje težina mješavine betona, manje je slijeganje jer sila gravitacije ima manje djelovanje što je težina manja. Zbog svoje manje gustoće agregata, laki beton se nije slijegao kao i normalni beton iste nosivosti.. Preporučeni iznos zraka u betonu po istraživanju je 4-8% za maksimalno zrno agregata 19 mm.

U tablici 3.4. i grafu 3.1. dane su vrijednosti tlačnih čvrstoća i modula elastičnosti. Zamjenom normalnog agregata u visoko-čvrstim betonima s lakim agregatom rezultiralo je smanjenjem tlačne čvrstoće nakon 28 dana. Čvrstoća LWGC-a je pala za 13%, LWBC-a za 18% te LWCC-a za 49%. Ovaj omjer je nakon 56 dana smanjen na 9%, 11% i 48%. Najveći rast čvrstoće od 28 do 56 dana od LWBC može se pripisati većoj pucolanskoj aktivnosti agregata, dok je NWC pokazao najmanji rast čvrstoće.



Graf 3.1. Tlačna čvrstoća za uzorke betona nakon 28 i 56 dana [1]

Concrete	Slump (cm)	Fresh density (kg/m ³)	Air content (%)	28-Day saturated surface dry density (kg/m ³)	28-Day oven-dry density (kg/m ³)	56-Day oven-dry density (kg/m ³)
LWCC	15	1991	3.9	2025	1860	1868
LWBC	15.5	1960	4.3	1979	1915	1922
LWGC	16.5	1975	4.1	1997	1943	1963
NWC	17	2381	3.8	2387	2316	2323

Tablica 3.4. Svojstva svježeg i očvrstlog betona [1]

Wasserman i Bentur su otkrili da veća čvrstoća agregata ne mora nužno dovesti do visoko čvrstog betona. U svojoj studiji su pokazali da se pri ranijoj dobi manja čvrstoća dobije s agregatom koji ima malo upijanje i manje pore nego s ugrijanim agregatom, a to se može pripisati većim pucolanskim aktivnostima. Međutim Kockal i Izturan u svojoj studiji su koristili sinterirane aggregate s jednakim upijanjem vode.

Kao što se može vidjeti iz tablice 3.3. relativno veća tlačna čvrstoća LWGC-a u usporedbi s LWBC-om može se pripisati razlici u gustoćama između ta dva betona. Tlačna čvrstoća uzorka nakon 28 dana varirala je od 42.3 do 55.8 MPa a gustoća suhog betona od 1860 do 1943 kg/m³. Isto tako LWGC je teži nego LWBB, a teži beton je rezultirao jačim betonom. Nemes i Josza pokazali su da dobivena maksimalna tlačna čvrstoća ovisi o gustoći čestica LWA. Međutim nepostoji opći odnos između klasa gustoće i čvrstoće za različite tipove lakog agregata. U ovoj studiji regresijska analiza je učinjena na tlačnu čvrstoću i gustoću za lake aggregate koristeći modele linearne regresije koji daju najbolji rezultat u odnosu na ostale regresijske modele. Linearni model je pokazao linearnost između tlačne čvrstoće i gustoće. Tlačna čvrstoća je direktno proporcionalna gustoći očvrstlog betona. Velika vrijednost R² od 0.88 linearnog modela je pokazala da je regresija dobro uspostavljena, što znači da nema značajne varijacije u rezultatima tlačne čvrstoće i gustoće betona. Lo i Cui su također pokazali da tlačna čvrstoća raste s porastom gustoće betona. Mala razlika u rezultatima čvrstoće pokazuje male varijacije u kvaliteti lakog agregata. Čvrstoća i ukočenost čestica lakog agregata ovisi o distribuciji, obliku i volumeni pora u česticama. Velike i nepravilno oblikovane šupljine oslabit će čestice što će dovesti do betona slabije čvrstoće.

Za računanje tlačnih čvrstoća zadane su jednadžbe. U tim jednadžbama parametri koji utječu na tlačnu čvrstoću lakog betona su: efektivni omjer vode i cementa lakog betona, gustoća lakog krupnog zrna, stvarna potrošnja lakog agregata, stvarna čvrstoća cementa i

tlačna čvrstoća lakog agregata. Modul elastičnosti ovisi o tlačnoj čvrstoći betona, ukočenosti, volumenu LWA, površini između agregata paste i elastičnim svojstvima sastavnih materijala. U ovoj studiji su, kao što je već rečeno, samo tipovi agregata različiti. LWGC je pokazao malo manji modul elastičnosti nego LWBC, ali je zato imao malo veću čvrstoću. Za jednake vrijednosti čvrstoća, vrijednost modula elastičnosti NWC-a je bila otprilike 42% veća nego ona od LWBC-a i LWGC-a. Isto tako, vrijednosti modula elastičnosti nakon 28 dana od LWBC-a i NWC-a su bile za 33% i 88% veće od LWCC-a. Modul elastičnosti ovisi ne samo o gustoći već i o strukturi pora i teksturi površine lakog agregata. Zbog toga laki agregat s gustom strukturom i jednolikim rasporedom pora daje veći modul elastičnosti i bolju krutost betona nego porozniji agregat. Tri parametra: gustoća, totalna poroznost i kritični dijametar pora lakih agregata, podržali su rezultate modula elastičnosti. 10G12000 i 10B1200 su imali približne i najveće specifične težine i gustoće a najmanji totalni porozitet i kritični dijametar pora dok je CB imao najmanju specifičnu težinu i gustoću a najveće vrijednosti totalnog poroziteta i kritičnog dijametra pora. Što je manji kritični promjer pore, finija je struktura pora. Jasno je da sinterirani agregati pokazuju gušću strukturu s niskim totalnim porozitetom i imaju jednoliko raspoređenu finu strukturu pora nego hladno prešani agregati. U usporedbi s normalnim agregatom mnogo manji modul elastičnosti očekuje se za lake agregate. Porast modula elastičnosti je bio veoma nizak nakon 56 dana za sve vrste betona. Ovisnost između modula elastičnosti i tlačne čvrstoće je analiziran i otkriveno je da je najbolja regresija dobivena izrazom:

$$E = 0.6258\sigma^{0.9815} \quad [1]$$

$$R^2 = 0.9114; \text{ za LWC nakon 28 i 56 dana.} \quad [2]$$

$$E = 0.1155\sigma^{1.3558} \quad [3]$$

$$R^2 = 0.8237; \text{ za LWC i NWC nakon 28 i 56 dana.} \quad [4]$$

Gdje je modul elastičnosti (E) izražen u GPa a tlačna čvrstoća (σ) u MPa.

Za test na cijepanje se kaže da daje najbolji opis prave vlačne čvrstoće. Za konstruktivne lake betone minimalna vlačna čvrstoća mora iznositi 2.0 MPa po ASTM C 330. Graf 3.2.

prezentira vlačnu čvrstoću lakih i normalnih betona koji su testirani u studiji. LWCC je dao najmanju čvrstoću i to 3.7 MPa nakon 28 dana i 3.9 MPa nakon 56 dana. Razlika u vlačnoj čvrstoći između ostalih betona je bila mala, s tim da je NWC davao malo veću čvrstoću od ostalih. Iako je u prijašnjim studijama zaključeno da korištenjem lakog agregata u visoko čvrstim betonima uzrokuje veće smanjenje vlačne čvrstoće i dinamičkih modula elastičnosti nego tlačne čvrstoće, korištenjem sinteriranih lakih agregata u betonu dovodi do većeg smanjenja u modulima elastičnosti i tlačne čvrstoće nego vlačne čvrstoće. Vlačna čvrstoća LWCC-a je bila 72.5%, LWBC-a 94.1% te LWGC-a 96.1% od čvrstoće normalnog betona. Ovaj rezultat je potvrdio izreku da vlačna čvrstoća lakog betona varira od 75% do 100% vlačne čvrstoće normalnog betona jednake tlačne čvrstoće.

Vežu između tlačne i vlačne čvrstoće možemo prikazati kao:

$$\sigma_t = 0.1109\sigma^{0.9389}; R^2 = 0.9912; \text{ za LWC nakon 28 i 56 dana.} \quad [5]$$

$$\sigma_t = 0.0738\sigma^{1.046}; R^2 = 0.9971; \text{ za LWC nakon 28 dana.} \quad [6]$$

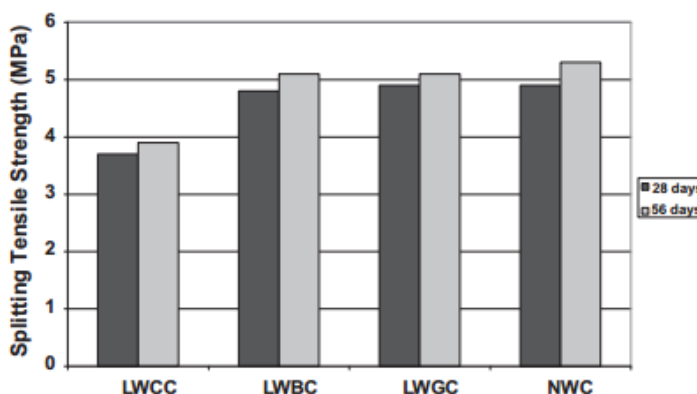
$$\sigma_t = 0.1254\sigma^{0.9053}; R^2 = 0.9990; \text{ za LWc nakon 56 dana.} \quad [7]$$

$$\sigma_t = 0.1572\sigma^{0.8496}; R^2 = 0.9682; \text{ za LWC i NWC nakon 28 dana.} \quad [8]$$

$$\sigma_t = 0.1721\sigma^{0.8239}; R^2 = 0.9893; \text{ za LWC i NWC nakon 56 dana.} \quad [9]$$

$$\sigma_t = 0.171\sigma^{0.8269}; R^2 = 0.9781; \text{ za LWC i NWC nakon 28 i 56 dana.} \quad [10]$$

Gdje je σ_t vlačna čvrstoća cijepanja u MPa, a σ tlačna čvrstoća u MPa.



Graf 3.2. Vrijednosti vlačne čvrstoće cijepanja nakon 28 i 56 dana. [1]

3.1.4. Zaključak

Jasno je da u slučaju da želimo dobiti slično slijeganje i sadržaj zraka u lakim betonima kao i u normalnim betonima trebamo stavljati manju količinu superplastifikatora i aeranta. Svi laki betoni su imali svježiu i suhu gustoću manju od 2000 kg/m^3 . Laki betoni su imali malo manju tlačnu čvrstoću nego normalni betoni zbog veće poroznosti i manje čvrstoće agregata. Pri držanju svih sastavaka jednakim u proizvodnji, teži beton je rezultirao i čvršćim betonom, drugim riječima gustoća betona jako utječe na čvrstoću. Moduli elastičnosti lakih betona su bili manje u usporedbi s normalnim betonima.

3.2. Utjecaj volumne frakcije i prirode finog lakog agregata na mehanička i termalna svojstva strukturalnog betona

3.2.1. Uvod

U ovoj studiji uzeto je 7 tipova finih i grubih lakih agregata. Agregati u mješavini su bili kombinacija grubog laganog agregata s finim normalnim agregatom ili finim laganim agregatom. Zamjena finog normalnog agregata s finim laganim agregatom za posljedicu ima smanjenje čvrstoće betona ali i poboljšanje termičkih svojstava. Laki beton ima malu gustoću što može biti jako korisno ako je njegova tlačna čvrstoća dovoljna jer će sama konstrukcija biti veoma lagana. Omogućuje korištenje manjih poprečnih presjeka za grede i stupove kao i manje temelje. Osim toga laki beton je dobar zbog toga što nakon rušenja konstrukcije ostaje manje otpada od betona, što ga čini ekološki povoljnim.

3.2.2. Kemijski i mineraloški sastav lakih agregata

Kemijski sastav korištenih lakih agregata dan je u tablici 3.5. Svi agregati imaju veliki postotak silicija od 60 do 72%. Ekspandirana škriljca i glina imaju veliki postotak glinice (alumina) i željeznog oksida. Plavac ima manje glinice nego ostala dva agregata, a postotak ferita mu je skoro zanemariv. Zbog veće atomske mase željeza gustoća lakih agregata od gline i škriljca bi trebala biti veća od lakog agregata plavca.

Aggregates	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	S	Mn ₂ O ₃	TiO ₂	P ₂ O ₅
Expanded shale	63	21	8.5	1.5	3.6	1.5	0.008	0.02	-	-	-	-
Pumice	71.91	12.66	1.13	1.46	0.32	4.3	3.45	0.03	-	-	-	-
Expanded clay	59.5	17	14.3	2	1.5	3	0.5	-	1	0.2	0.9	0.1

Tablica 3.5. Kemijski sastav (u postotcima) lakih agregata [2]

3.2.3. Fizikalna svojstva lakih agregata

Zbog velikog poroziteta laki agregat ima manju čvrstoću i deformabilniji je od normalnog agregata. Pa je tako u lakom betonu, suprotno od normalnog betona, najslabija karika sami agregat a ne cement ili površina između zrna agregata i cementa. Mehanička svojstva lakog betona su kontrolirana volumenom agregata i njegovom kvalitetom a ne samo cementom. Betoni su uglavnom napravljeni od 65% - 75% agregata, tako da laki agregat ima veliki utjecaj na termalna svojstva lakog betona i izolacijska svojstva lako betonskih struktura. Mehanička i termička svojstva agregata teško je odrediti, ali je poznato da oni najviše ovise o gustoći, porozitetu i vlažnosti. Poznavanje tih podataka ključno je da bi shvatili kako laki agregat utječe na laki beton.

Gustoća lakog agregata i njegovo upijanje vode mora se uzeti u obzir prije određivanja volumena lakog agregata koji će se dodati mješavini betona. U ovoj studiji agregat je bio saturiran kako bi se izbjegla bilo kakva promjena vodocementnog faktora, jer nesaturiran agregat bi upio vodu za mješavinu. Svojstva lakog agregata dana su u tablici 3.6. Gustoća (ρ_v), gustoća suhog zrna (ρ_{rd}) i gustoća saturiranog, površinski suhog zrna (ρ_{ssd}) određene su nakon 24 sata po standardima EN 1097-3 i EN 1097-6. Fini laki agregat je uglavnom teži od grubog agregata, te se kod njega gustoća kreće od 800 do 1030 kg/m³, a kod grubog od 520 do 740 kg/m³. 0/5P plavac je najlakši fini laki agregat. 5/8P plavac i 4/8C ekspanzirana glina su teži nego ostali grubi laki agregati zbog njihovog malog promjera zrna. Koeficijent upijanja vode agregata (W_a^i) na prijelaznom trenutku tijekom uranjanja pri sobnim uvjetima određen je po EN 1097-6:

$$W_a^i = W_a^{48} - (M^{48} - M^i) / M^s \quad [11]$$

Gdje je W_a^{48} koeficijent upijanja vode nakon 48 sati određen testom s piknometrom. M^{48} i M^i predstavljaju masu piknometra koji sadržava uronjene agregate nakon 48 sati te u trenutku

prijelaza. M^s je masa osušenog lakog agregata. Agregati od ekspaniranog škriljca su imali najmanju promjenu koeficijenta upijanja vode. Agregati od ekspanirane gline i škriljca imaju poroznu unutrašnju strukturu okruženu ljuskom, koja je zapravo gusta ostakljena površina. Ljuska škriljca LWA 4/10S je deblja od gline LWA 4/10C, a to objašnjava zašto je manji koeficijent upijanja vode kod 4/10S nego 4/10C. Iako je fini laki agregat 0/4S škriljac zdrobljen iz većih agregata tako da se njegova vanjska ljuska uništi, on i dalje ima najmanji koeficijent upijanja vode zbog svoje gustoće.

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

Tablica 3.6. Fizikalna svojstva lakih agregata [2]

Mehanička i termička svojstva agregata su blisko vezana sa mineraloškim, kemijskim sastavom te mikrostrukтури zrna. Vododostupna poroznost agregata je testirana koristeći vakuumski uređaj. Eksperiment dalje teče sličnom procedurom po EN 1097-6. Vododostupna poroznost je izračunata omjerom volumena upijene vode i volumena zrna.

$$\phi = V_{\text{voda}} / V_{\text{zrno}} \quad [12]$$

Tablica 3.7 uspoređuje različite vrijednosti poroziteta dobivene eksperimentom: vododostupnu poroznost ϕ^{24} mjerenu na lakom agregatu potopljenom pri sobnim uvjetima na 24 sata, vododostupnu poroznost ϕ^{vac} mjerenu na lakom agregatu saturiranom u vakumu i poroznost ϕ^{Hg} izmjerenu živinim upadanjem.

Aggregates	W_a^{24} (%)	ϕ^{24} (%)	W_a^{vac} (%)	ϕ^{vac} (%)	Std Dev. (%)	ϕ^{Gg} (%)
0/4S	8.05	14.42	13.55	21.75	0.47	24.64
4/10S	10.01	9.15	32.59	29.78	1.91	59.96
0/5P	18.3	25.09	27.68	38.64	2.23	39.17
5/8P	17.32	21.36	36.11	42.54	0.71	43.04
0/4C	17.88	25.25	35.34	49.93	0.82	48.59
4/8C	19.17	23.87	37.58	46.8	0.46	–
4/10C	24.76	24.27	46.21	45.31	0.81	52.57

Tablica 3.7. Koeficijenti upijanja vode i porozitet lakog agregata [2]

4/10S agregat od škriljca je imao skoro 1.5 puta manju vododostupnu poroznost (30%) nego drugi laki agregati (42-46%), iako je najlakši grubi laki agregat (980-1250 kg/m³). Ova razlika u poroznosti lakih agregata različitih vrsta naglašava ulogu vanjske ljuske zrna kao "hidroizolacije".

Distribucija pora i njihova veličina se određuje testom sa živinim upadanjem. Totalni porozitet lakog agregata pri tom testu je iznosila od 25 do 60%. Promjer pora grubog plavca kretao se od 0.01 μm do 0.5 μm . Pore agregata od finog plavca su imale veći promjer koji je iznosio 0.5 μm do 2 μm . Agregat od grube gline je imao čak 80% pora većeg promjera od 0.1 μm , dok je 0/4C fini laki agregat istog tipa imao mnogo manje pora većih od 5 μm .

3.2.4. Eksperimentalna procedura

Gustoća u pećnici osušenog (ρ_d) i saturiranog površinski suhog uzorka betona su izračunate pomoću njihovog volumena, mase osušenog i mase saturiranog površinski suhog uzorka. Uzorak je potopljen u vodu dok nije dobio konstantnu težinu. Volumen saturiranog površinski suhog uzorka je dobiven vaganjem potopljenog uzorka u vodi. Uzorak je tada osušen koristeći suhi ručnik te je izvagan da bi se dobila masa saturiranog površinski suhog uzorka. Konačno, uzorak je zagrijan na 105 °C sve dok mu masa nije postala konstantna te je tada izvagan. Termalni eksperiment je rađen na osušenom uzorku po standardu EN 1745. Senzor je postavljen između dva jednaka uzorka betona dimenzija 14x7x4 cm. Analiza podataka je učinjena koristeći računalni software. Mehanička i termalna svojstva svih receptura prikazani su u tablici 3.8

Mixes	ρ_a (kg/m ³)	f_c (MPa)	E (GPa)	λ (W/m K)	(J/kg K)	α (mm ² /s)
OS-0	1440	37.6	19.3	0.71	1021	0.48
OS-50	1380	35.7	18.6	0.61	1055	0.44
OS-100	1320	34.3	17.3	0.57	1094	0.40
OP-0	1490	34.8	19.1	0.70	996	0.47
OP-50	1410	33.0	17.0	0.56	1039	0.39
OP-100	1340	31.4	15.3	0.46	1077	0.32
OC1-0	1410	30.8	16.3	0.67	1049	0.45
OC1-50	1290	25.6	13.6	0.53	1075	0.38
OC1-100	1170	22.2	11.1	0.43	1077	0.35
OC2-0	1520	40.3	18.2	0.73	1024	0.47
OC2-50	1400	35.4	15.7	0.61	1048	0.41
OC2-100	1280	31.3	13.6	0.49	1060	0.36
NWC	2030	45.3	32.7	1.60	837	0.94

Tablica 3.8 Mehanička i termička svojstva betona [2]

3.2.5. Utjecaj lakog agregata na svojstva betona

Zamjenom finog normalnog agregata s finim lakim agregatom smanjuje se gustoća betona i utječe na njegova svojstva. Pri 100% zamjeni agregata, gustoća osušenog uzorka lakog betona varira između 1170 i 1350 kg/m³, što ovisi o tipu lakog agregata. Jedino kombinacija agregata 4/10C i 0/4C smanjuje gustoću ispod 1350 kg/m³. Za usporedbu normalni beton napravljen od silikatno-vapnenačkog agregata ima gustoću osušenog uzorka 2030 kg/m³. U globalu eksperimentalna gustoća lakog betona kompaktilna je s teoretskom gustoćom izračunatom iz mješavine. Međutim zamjenom finog normalnog agregata s finim lakim agregatom dolazi do male razlike između 50% zamjene i 100%. Na primjer, gustoća OP betona smanjuje se za 80 kg/m³ pri zamjeni agregata od 50%, a zatim za 70 kg/m³ pri 100% zamjeni. Dodatno, 100% zamjena finog normalnog agregata s finim lakim smanjuje gustoću osušenog uzorka za otprilike 130 kg/m³ kod osušenog škriljevca, 150 kg/m³ kod plavca te 235 kg/m³ za ekspaniranu glinu.

Povećavanjem količine finog lakog agregata linearno se smanjuje tlačna čvrstoća lakog betona. Pri zamjeni 50% volumena normalnog agregata sa lakim smanjuje se tlačna čvrstoća za 5 do 17%, dok se pri 100% zamjeni smanji za 9 do 28%, te tada iznosi 22 do 35 MPa. Svi ovi betoni čija tlačna čvrstoća je veća od klase C16/20 po standardu EN 206-1, mogu se koristiti kao konstrukcijski betoni. Pri 100% zamjeni agregata Young-ov dinamički modul opada za 10% do 32%, te se on tada kreće od 11 do 17.5 GPa, što je 2 do 3 puta manje od normalnog betona. Može se zaključiti da pri zamjeni agregata dolazi do smanjenja tlačne

čvrstoće i dinamičkog modula. Smanjenje je manje bitno kod gušćeg finog agregata od škriljca nego kod agregata od gline i plavca. Modul elastičnosti opada za 10% pri zamjeni s škriljcem, te za 25-30% pri zamjeni s glinom ili plavcem. Tlačna čvrstoća opada po sličnom zakonu, osim pri zamjeni s agregatom od plavca kod kojeg opada za 10%. Mehanička svojstva uglavnom ovise o kvaliteti grubog agregata čija je količina u betonu dominantna.

Pri zamjeni agregata porozitet kojeg sa sobom dovodi laki agregat linearno smanjuje termalnu vodljivost betona. Najmanje smanjenje je pri zamjeni s finim škriljcem zbog toga što on ima najveću gustoću. Zavisno o agregatu pri 100% promjeni, termalna vodljivost se smanjuje za 20-35%. Najmanja termička vodljivost se dobije s 0C1 betonom koji je ujedno i najmanji. Specifična toplina lakih betona kreće se od 1000 do 1100 J/kg K, dok se kod normalnih betona uglavnom kreće oko 772 J/kg K.

3.2.6. Zaključak

Postoji linearno smanjenje tlačne čvrstoće i modula elastičnosti sa smanjenjem gustoće betona. Zamjena finog normalnog agregata s finim lakih dovodi do smanjenja tlačne čvrstoće za 2.3 do 3.8 MPa, te smanjenja modula elastičnosti za 1.7 do 2.6 GPA za svakih 100 kg/m³. Zamjenom agregata također pada termalna vodljivost sa 0.1 W/m K na 0.16 W/m K, te termalna difuznost sa 0.05 m²/s na 0.1 m²/s, za svakih 100 kg/m³ manje. Korštenjem betona od lakog finog agregata dobiva se beton slabijih mehaničkih svojstava, ali boljih izolacijskih svojstava.

3.3. Početno ispitivanje mješavine betona s laganim agregatom

3.3.1. Uvod

U ovoj studiji je razvijena jednostavna procedura za konstrukcijske lake betone za određivanje količine svakog sastojka da bi se dobilo željeno: slijeganje, tlačna čvrstoća, suha gustoća i količina zraka.

3.3.2. Podaci o lakom betonu

Korišteni agregati su kombinacije ili lakog grubog i finog agregata ili lakog grubog i prirodnog, težinski normalnog, pijeska. Baza podataka je sadržavala 39 laganih betonskih mješavina te 308 lakih betona s pijeskom. Suha gustoća grubih i finih agregata iznosila je 1000 - 1600 kg/m³, te 1000 - 1850 kg/m³. Upijanje vode oba agregata kretalo se u granicama od 5 do 28%. Tlačna čvrstoća nakon 28 dana iznosila je 11-40 MPa za lagani beton, te 15-57 MPa za laki beton s pijeskom. Suha gustoća lakog betona kretala se od 1236 kg/m³ do 1736 kg/m³, a za laki beton s pijeskom od 1320 kg/m³ do 2024 kg/m³. Ostali glavni parametri lakog betona te lakog betona s pijeskom iznosili su: vodocementni faktor: 0.28-0.65, količina vode 139-242 kg/m³ te 145-260 kg/m³ i volumenski omjer grubog agregata 0.45-0.82 te 0.03-0.065.

3.3.3. Formulacija jednadžbi

Mješavina lakog betona se uglavnom prave prema recepturama koje su utemeljene na nosivosti te tlačnoj čvrstoći nakon 28 dana. Međutim trenutne procedure za pravljenje recepture zahtijevaju prijašnje informacije o sličnim betonima koji koriste agregate iz sličnih izvora. Da bi dobili jednostavan pristup prvoj recepturi racionalne jednadžbe su formulirane koristeći nelinearnu multiregresiju, sa SPSS softverom.

Promjene u svojstvima betonskih sastojaka te promjene u mješanju dovode do promjena u čvrstoći stvrdnutog betona. Računska čvrstoća je uzeta kao osnova za biranje svojstava betona koristeći standardnu devijaciju. 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 vrijednost λ_v za prosječnu kontrolu trebala biti niža od preporučene vrijednosti od strane ACI-214, te λ_v za lake betone iznosi 7-8,5%. 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 LWAC iznosi:

$$f'_{CR} = f'_C + 1,34 \lambda_v \approx 1,167 f'_C \quad [13]$$

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

U cjelini, tlačna čvrstoća je obrnuto proporcionalna vodocementnom faktoru. f_c vrijednost lakog betona se povećava s γ_{con} što znači da je potrebna manja vrijednost vodocementnog faktora za laki beton s manjim γ_{con} da bi se dosegla željena vrijednost f_c . Suha gustoća značajno ovisi o zamjeni finog agregata sa prirodnim pijeskom $R_{LFA} (= \frac{v_{fl}}{v_{fl}+v_{fs}})$, gdje su v_{fl} i v_{fs} volumeni finog agregata i prirodnog pijeska. Kroz optimalnu NLMR analizu tih utjecajnih parametara, čvrstoća lakog betona može se formulirati.

$$\frac{f_c}{f_0} = 0,72 \cdot \left(\frac{\gamma_{con}}{\gamma_0} \cdot \frac{w}{c} \right) \cdot \left(\frac{1}{v_a} \right)^{0,2} \quad [14]$$

gdje je $f_0 = 10$ MPa referentna tlačna čvrstoća nakon 28 dana, a $\gamma_0 = 2300$ kg/m³ referentna suha gustoća betona. Iz toga slijedi:

$$\frac{w}{c} = 0,72 \left(\frac{1}{v_a} \right)^{0,2} \cdot \left(\frac{\gamma_{con}}{\gamma_0} \right) \cdot \left(\frac{f_0}{f_c} \right) \quad [15]$$

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 kemijskog vodo-redukcijskog sredstva. NLMR analiza je provedena na betonskim uzorcima, bez redukcijskog sredstva. Sljedeća jednadžba je dobivena kako bi se predvidjelo početno slijeganje:

$$\frac{S_i}{S_0} = (1 + R_{LFA})^{0,2} \left(V_G \cdot \frac{W}{W_0} \right)^3 \cdot v_a^{0,4} \quad [16]$$

Gdje je $S_0=300$ mm, referentna vrijednost od početnog slijeganja; $W_0=100$ kg/m³, referentna vrijednost udjela sadržaja vode. Rezultati predloženog modela su više u skladu s rezultatima pokusa, nego onima u preporuci koja je navedena u ACI 211,2-98. Očekuje se da će predloženi model praktičan za određivanje W za traženi S_i , kako je navedeno u sljedećoj jednadžbi:

$$W = \left(\frac{W_0}{W_g} \right) \cdot \left(\frac{1}{1+R_{LFA}} \right)^{0,067} \cdot \left(\frac{1}{v_a} \right)^{0,133} \cdot \left(\frac{S_i}{S_0} \right)^{0,333} \quad (\text{kg/m}^3) \quad [17]$$

Odgovarajući volumen agregata po jedinici volumena betona je neophodan za zadovoljavajuću obradivost u proizvodnji betona. Ova analiza uvela je matematičko rješenje za razumno utvrđivanje V_G uključujući parametre koji utječu na preoblikovanje. Ciljana vrijednost γ_{con} odabrana je kao granični uvjet. Poznato je da se sadržaj vode potrebne za hidrataciju najčešće kreće u rasponu između 20 i 25% sadržaja cementa. Ovaj fenomen uzet je u obzir u NMLR analizi, koji je proveden kako bi se formulirali γ_{con} od očvrslag betona iz određenog omjera smjese. Suha gustoća betona može se opisati na sljedeći način:

$$\gamma_{con} = 1,25C + G_L + F_S + F_L + 120 \quad (\text{kg/m}^3) \quad [18]$$

gdje su C , G_L , F_S , i F_L sadržaji (u kg/m^3) cementa, krupnog LWA, sitnog NWA i sitnog LWA po jedinici volumena betona. Konstanta 120 kg/m^3 kompenzira razliku između suhe gustoće (u pećnici) i izjednačene suhe gustoće, što ovisi o vrsti agregata. Apsolutna jedinica volumena svježeg betona primijenjena je kao drugi rubni uvjet kako bi se utvrdio V_G :

$$v_c + v_w + v_{GL} + v_{FS} + v_{FL} + v_A = 1 \quad [19]$$

gdje su v_c , v_w , v_{GL} , v_{FS} i v_{FL} količine cementa, vode, krupnog LWA, sitnog NWA i sitnog LWA po jedinici volumena svježeg betona. Na temelju jedn. (14) i definicija R_{LFA} i V_G , jedn. (16) može se napisati u sljedećem obliku:

$$\frac{A_1}{\gamma_w V_G} + \frac{A_1}{\gamma_c X_1 V_G} + \frac{\rho_{GL} V_G}{\gamma_{GL}} + \frac{v_{FL}}{R_{LFA}} + v_A = 1 \quad [20]$$

$$A_1 = W_0 \left(\frac{1}{1 + R_{LFA}} \right)^{0,067} \left(\frac{1}{v_A} \right)^{0,133} \left(\frac{S_i}{S_0} \right)^{0,333} \quad [21]$$

gdje je X_1 vrijednost W/C , a γ_w i γ_c su stvarne gustoće (kg/m^3) vode i cementa. F_S i F_L mogu se izraziti kao $\gamma_{FS} v_{FS}$ i $\gamma_{FL} v_{FL}$, odnosno, gdje su γ_{FS} i γ_{FL} gustoće (u kg/m^3) od sitnog LWA i NWA. Dakle, jedn. (15) može se napisati na sljedeći način:

$$1,25 \frac{A_1}{X_1 V_G} + \gamma_{GL} v_{GL} + \gamma_{FS} v_{FS} \left(\frac{1 - R_{LFA}}{R_{LFA}} \right) + \gamma_{FL} v_{FL} + 120 - \gamma_{con} = 0 \quad [22]$$

Ako uredimo jedn. (17) u odnosu na v_{FL} i zamjenom u jedn. (19), dobivamo sljedeću kvadratnu funkciju V_G :

$$p_1 V_G^2 + p_2 V_G + p_3 = 0 \quad [23]$$

$$p_1 = \frac{-\rho_{GL} + \frac{\gamma_{FL} R_{LFA} \rho_{GL}}{\gamma_{GL}}}{(1 - R_{LFA}) \gamma_{FS}} + \frac{\rho_{GL}}{\gamma_{GL}} \quad [24]$$

$$p_2 = \frac{\gamma_{con} - \gamma_{FL} R_{LFA} (1 - v_A) - 120}{(1 - R_{LFA}) \gamma_{FS}} + v_A - 1 \quad [25]$$

$$p_3 = \frac{A_1}{\gamma_W} + \frac{A_1}{\gamma_C X_1} + \left[\gamma_{FL} R_{LFA} A_1 \left(\frac{1}{\gamma_W} + \frac{1}{\gamma_C X_1} \right) - \frac{1,25 A_1}{X_1} \right] \frac{1}{(1 - R_{LFA}) \gamma_{FS}} \quad [26]$$

3.3.4 Valjanost postupka

Da bi se potvrdila pouzdanost predloženog postupka, pripremljeno je te testirano 5 konstrukcijskih lako betonskih mješavina. Glavni parametar koji se promatrao je R_{LFA} koji je varirao od 0 do 1 u intervalima od 0.25. U svim mješavinama potrebna količina zraka je bila 0.035, a kao vezivo je korišten obični portland cement. Izmjerena količina vlage za laki grubi agregat iznosila je 23%, za laki fini agregat 18%, te za prirodni pijesak 4%. Za tražene zahtjeve, vodocementi faktor se kretao od 0.34 do 0.39. Može se reći da predloženi postupak za određivanje svojstva mješavine konstrukcijskih lakih betona daje usvojiv vodič za dobivanje prve smjese betona.

3.3.5. Zaključak

Iako su mješavine lakih betona usvojene koristeći serije pokušaja u laboratorijima, teško je odrediti recepturu i potrebne korekcije za pokusne mješavine. No zbog limitiranog raspona i informacija iz baze podataka ovaj postupak je koristan samo pri sljedećim uvjetima: tlačna čvrstoća betona mora se kretati između 18 i 50 MPa, gustoća suhog betona mora biti između 1200 kg/m^3 i 2000 kg/m^3 te maksimalna veličina zrna agregata mora biti između 19 i 25 mm.

4. Eksperimentalni dio rada

U eksperimentalnom dijelu završnog rada potrebno je usporediti dvije mješavine lakog betona s referentnom mješavinom. Mješavine koje imamo su LB1, LB6 te LB7. Referentnu mješavinu LB1 dobivamo tako da u mješalicu stavljamo cement te liapor agregate, koji poslije u procesu mješanja nadodajemo vodu i aditive (superplastifikator). Mješavine LB6 i LB7, koja testiramo, izrađuju se podjednako s razlikom što kod LB6 glavni agregat osim liapora je drobljeni agregat frakcije 0 - 4 mm, dok je kod LB7 to prirodni agregat jednake frakcije. Kod obe mješavine dodaje se agregatu i metakaolin, te se voda i aditivi naknadno dodaju nakon što se suhi sastojci izmješaju. Za uspoređivanje betona korištene su tri metode ispitivanja. Metoda slijeganja kojom određujemo obradljivost, ispitivanje sadržaja zraka i ispitivanje tlačne čvrstoće betona.

4.1. Materijali

U pripravljanju pokusnih mješavina betona upotrijebljeni su sljedeći materijali:

- Bijeli portland cement CEM I 52,5 R,
- Liapor lagani agregat 4-8 i 0-2 mm,
- Sitni drobljeni agregat 0-4 mm,
- Sitni prirodni agregat 0-4 mm,
- Metakaolin
- Superplastifikator

4.1.1 Cement

Za pripravljanje mješavine betona upotrijebljene je obični bijeli portland cement CEM I 52,5 R, proizvođač Dalmacijacement, Hrvatska. Koristeći ovaj cement dobit će se beton visoke rane čvrstoće i povoljnog omjera čvrstoće i količine cementa. Idealan je izbor za obojene i dekorativne žbuke i betone. Svojstva tog cementa prikazana su u tablici 4.2.

CEM I 52,5R - BIJELI	Tipična analiza	Zahtjev norme
Fizikalna svojstva		
Postojanost volumena (Le Chatelier)	1 - 2 mm	≤ 10
Početak vremena vezivanja	130 ± 30 min	≥ 45
Luminiscencija (L)	93,5 - 94,0	-
Mehanička svojstva		
Rana čvrstoća (2 dana)	45 - 50 MPa	≥ 30
Rana čvrstoća (7 dana)	57 MPa	
Normirana čvrstoća (28 dana)	66 ± 2 MPa	≥ 52,5
Kemijska svojstva		
Gubitak žarenjem	2,0 ± 0,5 %	≤ 5
Udio sulfata (SO ₃)	3,5 - 4,0 %	≤ 4
Netopivi ostatak	0,5 ± 0,2 %	≤ 5
Udio klorida (Cl)	0,03 - 0,06 %	≤ 0,1

Tablici 4.2. svojstva cementa CEM I 52,5 R [4]

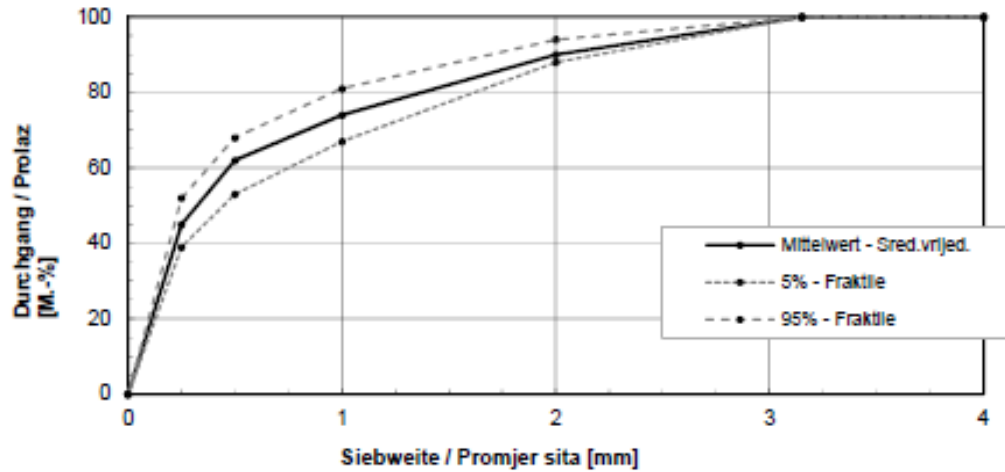
4.1.2. Agregati

Liapor je prirodno čista i oko 180 milijuna godina stara glina iz razdoblja lias, ere jura, kvalitetna je sirovina za liapor proizvode. U proizvodnom procesu ta se sirovina melje, miješa te oblikuje u kuglice koje se nakon oblikovanja peku na temperaturama od oko 1200 °C. Pri tom procesu sagorijevaju organski sastojci gline, a kuglice ekspandiraju. Tako nastaju kuglice sa zatvorenom strukturom pora, porozne na zrak, potrebne čvrstoće, s visokim svojstvima kao toplinski izolator i istovremeno kao akumulator topline. Takvi proizvodi su nezapaljivi i negorivi građevinski materijali koji se po standardu DIN 4102 svrstavaju u najviši požarni razred A1. Liapor lagani agregati upotrebljavaju se za izradu nearmiranih i armiranih laganih betona, kao i za izradu prednapetih laganih betona. U našim ispitivanjima koristili smo dvije vrste liapor agregata:

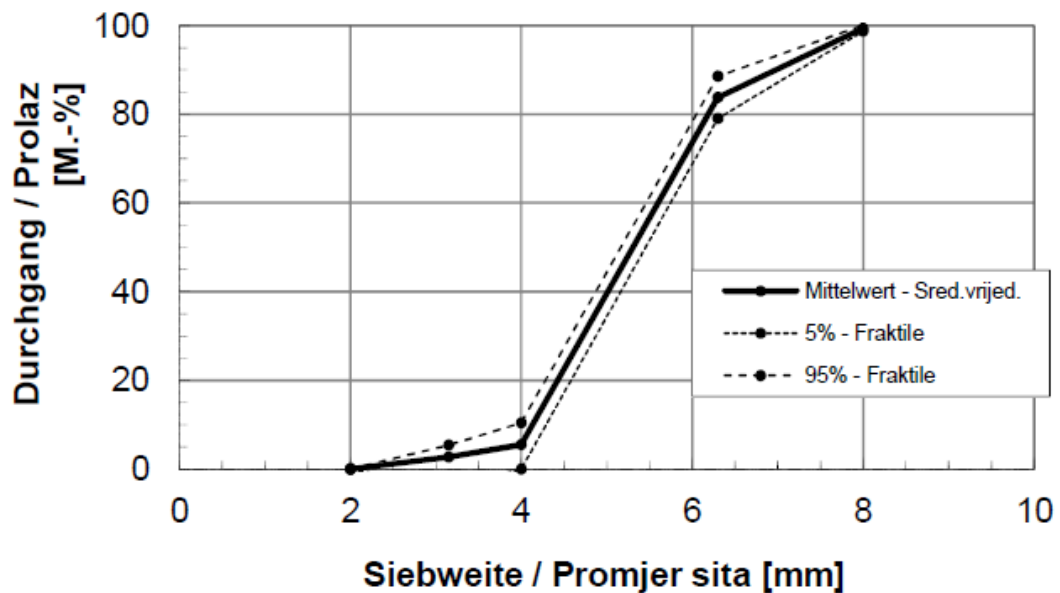
- Liapor F9-5 4-8 mm,
- Liapor K 0-2 mm.

Granulometrijske krivulje liapora 0-2 mm i 4-8 prikazane su na grafovima 4.1 odnosno

4.2, a njihova osnovna svojstva u tablicama 4.3. odnosno 4.4.



Graf 4.1. Granulometrijska krivulja Liapora frakcije 0-2 mm. [4]



Graf 4.2. Granulometrijska krivulja Liapora frakcije 4-8 mm. [4]

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 ₂ O ₃	24 ± 5	%
	Fe ₂ O ₃	14 ± 5	%
	CaO	5 ± 5	%
	Elementi u tragovima	2 ± 2	%

Tablica 4.3. Osnovna svojstva Liapora frakcije 0-2 mm. [4]

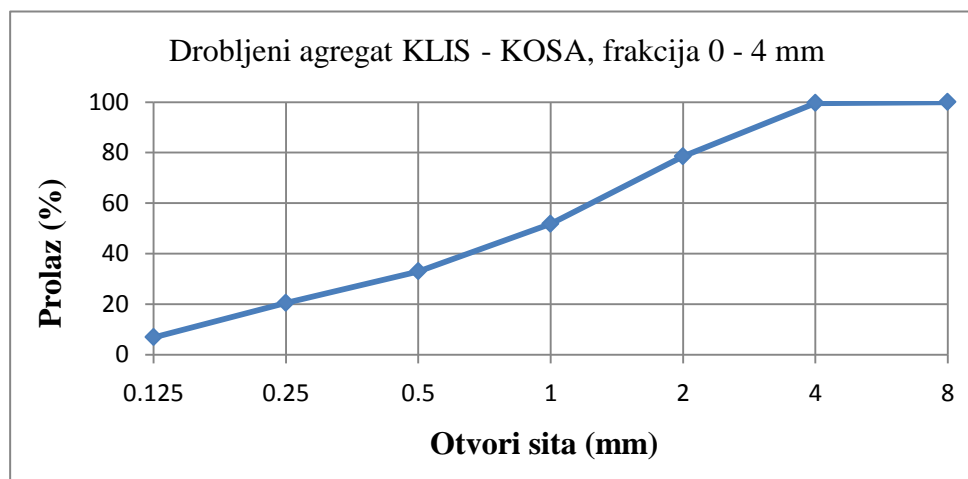
Osnovne osobine	Vrsta materijala	Ekspandirana glina	
	Oblik zrna	Okruglo	
Geometrijske osobine	Granulometrijska grupa	4 - 8	mm
	Sitne čestice (<0,063 mm)	< 1,0	M.-%
Fizikalne osobine	Nasipna gustoća	950 ± 25	kg/m ³
	Specifična gustoća	1700 ± 50	kg/m ³
	Upijanje vode w ₃₀ (30 min)	8 ± 4	M.-%
	Upijanje 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 ₂ O ₃	18 ± 5	%
	Fe ₂ O ₃	15 ± 5	%
	CaO	6 ± 5	%
	Elementi u tragovima	2 ± 2	%

Tablica 4.4. Osnovna svojstva Liapora frakcije 4-8 mm. [4]

Za neke mješavine korišten je drobljeni agregat frakcije 0-4 mm, s nalazišta KLIS-KOSA. Neka njegova osnovna svojstva dana su u tablici 4.5., a granulometrijski sastav u grafu 4.3.

	Frakcija	0 - 4
Apsorpcija	Mzps	545,5
	Md	540,3
	A	0,96%
Vlažnost	Mp	1011,0
	Md	1009,9
	W	0,11%
Površinska vlažnost	Vp	-0,85%

Tablica 4.5. Apsorpcija i vlažnost drobljenog agregata [4]

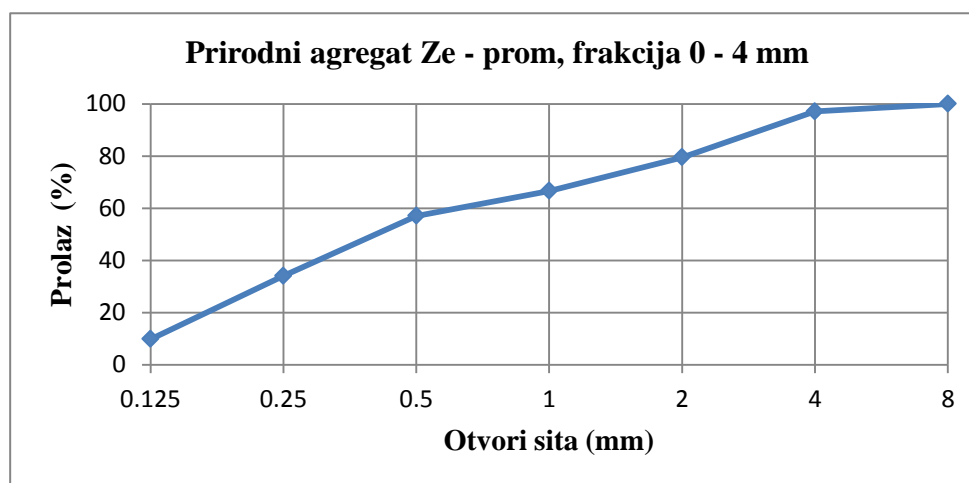


Graf 4.3. Granulometrijska krivulja drobljenog agregata frakcije 0-4 mm. [4]

Prirodni sitni agregat korišten u ovim labaratorijskim testovima je Ze - prom riječnog podrijetla frakcije 0-4 mm. U daljnjim tablicama i grafovima su također prikazana njegova osnovna svojstva i granulometrijski sastav.

	Frakcija	0 - 4
Apsorpcija	Mzps	911,9
	Md	896,7
	A	1,70%
Vlažnost	Mp	920,9
	Md	918,4
	W	0,27%
Površinska vlažnost	Vp	-1,42%

Tablica 4.6. Apsorpcija i vlažnost prirodnog agregata [4]



Graf 4.4. Granulometrijska krivulja prirodnog agregata frakcije 0-4 mm. [4]

4.1.3. Dodaci betonu

Superplastifikator koji je dodavan u mješavinu je RHEOMATRIX 230 koji je nova generacija superplastifikatora posebne namjene za samorazlijevajuće betone. Posebno je dizajniran za beton od kojih se izrađuju prefabricirani AB elementi. Regulira razinu viskoziteta u mješavini, omogućujući da se postigne ravnoteža između fluidnosti, sposobnosti prolaska i otpornosti na segregaciju - zapravo potpuno suprotnih svojstava. Primjenjuje se u proizvodnji samorazlijevajućih betona visoke kvalitete uz smanjenu potrošnju cementa i značajno reduciranu potrebu za finim česticama. Dozira se u količinama od 0,5 do 2 % od ukupnog sadržaja veziva.

Metakaolin je također dodatak betonu, a on je zapravo rafinirana kaolinska glina koja je zagrijavana pod kontroliranim uvjetima s ciljem proizvodnje amornog aluminij silikata koji je reaktivan u betonu. Ponaša se kao i drugi pucolani, a u betonu reagira s produktima kalcij hidroksida nastalih tijekom hidratacije cementa. Upotreba metakaolina kao dodatka betonu ima sljedeće prednosti:

- Smanjenje propusnosti,
- povećanje tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje,
- povećana izdržljivost i otpornost na udar,
- smanjeno skupljanje,
- poboljšana obradljivost i završna obrada.

U ovim ispitivanjima upotrebljen je metakaolin metavern N, mineralni dodatak koji može značajno poboljšati svojstva betona, a dobiven je grijanjem čistog kaolina. Bijele je boje i važan je amorfni aluminij - silikat koji reagira s kalcij hidroksidom pri čemu nastaju C-S.H veze. Lako se miješa, djeluje stabilizirajuće te olakšava završnu obradu. Dodaje se betonu u količini 5 do 10% na masu cementa. u tablici 4.7. prikazana su neka osnovna svojstva tog metakaolina.

Fizička svojstva – <i>Metavern N</i>		
Gustoća zrna		2,6 g/cm ³
Boja		Bijela
Zapreminska težina	rasuta	0,32 - 0,37 g/cm ³
	zbijena	0,45 - 0,52 g/cm ³
d ₅₀		3,4 - 4,5 μm
d ₉₅		12 - 18 μm

Tablica 4.7. Osnovna svojstva metakaolina Metavern N [4]

4.2. Proračun sastava betona

U svrhu istraživanja napravljene su tri mješavine (LB1, LB6 te LB 7), a njihove recepture prikazane su u tablici 4.8.

Sastav [kg]	LB1	LB6	LB7
Cement	430	430	430
Metakaolin	0	50	50
W/C	0,52	0,55	0,55
W/B	0,52	0,45	0,45
Voda	224	237	237
Dodatak vode za upijanje	0	13	13,3
Liapor 0-2 mm	323	-	-
drobljeni agregat 0-4 mm	-	460	-
prirodni agregat 0-4 mm	-	-	460
Liapor 4-8 mm	753	710	710
Superplastifikator	4,3	4,3	4,3

Tablica 4.8. Recepture mješavina [4]

4.3. Način pripreme pokusnih mješavina lakog betona

Potrebne količine komponenti koje zajedno čine beton su precizno izvagane i dozirane prema gornjoj tablici.

LB1 - Svi sastojci osim vode i aditiva stavljeni su u mješalicu te su jedanput promiješani. Zatim je dodana voda sa superplastifikatorom te je nastavljeno s miješanjem betona. Kod ove mješavine uočilo se veliko upijanje vode kod agregata te da je zato odlučeno u drugim mješavinama dodati vodu za upijanje.

LB6 - U mješalicu su stavljeni svi suhi sastojci (cement, metakaolin, liapor 4-8 te drobljeni agregat 0-4) te su međusobno nakratko pomiješani. Zatim je tijekom miješanja postepeno dodavana voda sa superplastifikatorom, te voda za upijanje agregata.

LB7 - Miješavina LB7 je pripravljena jednako kao i LB6 jedino je drobljeni 0-4 agregat zamijenjen s prirodnim agregatom 0-4 u jednakim količinama.

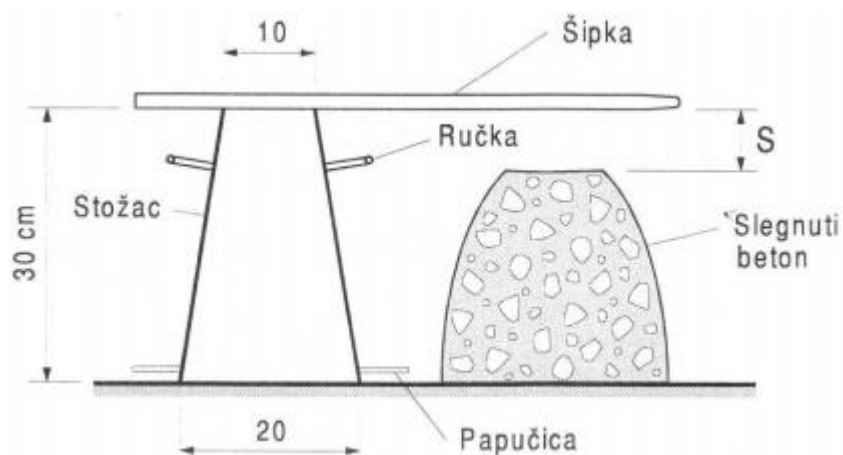
4.4. Ispitivanja provedena na pokusnim mješavinama

Ispitivanja koja su provedena na ove tri mješavine su: metoda slijeganja, ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu te ispitivanje tlačne čvrstoće.

4.4.1. Metoda slijeganja

Konzistencija betona je mjera obradljivosti betona, a ispitana je metodom slijeganja prema propisu EN 12350-2:1999 i to odmah po završetku miješanja betona te ponovo nakon 30 minuta. Jedan od ciljeva ovog rada je dobivanje betona koji prema slijeganju spada u razred S4. Prilikom ispitivanja upotrijebljena je sljedeća aparatura:

- Abramsov kalup dimenzija prema slici 4.4.,
- standardna šipka ϕ 16 mm, dužine 60 cm,
- metalno ravnalo,
- prikladno mjerilo dužine.



Slika 4.4. Aparatura za ispitivanje metodom slijeganja. [4]

Kao podloga se iskoristio najlon koji je postavljen na površinu na kojoj se radilo ispitivanje jer podloga na kojoj se ispituje nesmiije upijati vodu iz mješavine. Prije ispitivanja kalup i podloga lagano se navlaže, tako da na površinama nema slobodne vode. Beton se stavlja u tri navrata, a nakon svakog stavljanja potrebno je beton u kalupu nabiti s metalnom šipkom i to s 25 udaraca. Pri zbijanju šipka nesmiije udarati o dno te mora malo ulaziti u sljedeći sloj. Na kraju se površina betona poravna, kalup izvuče vertikalno te izmjeri slijeganje u cm.

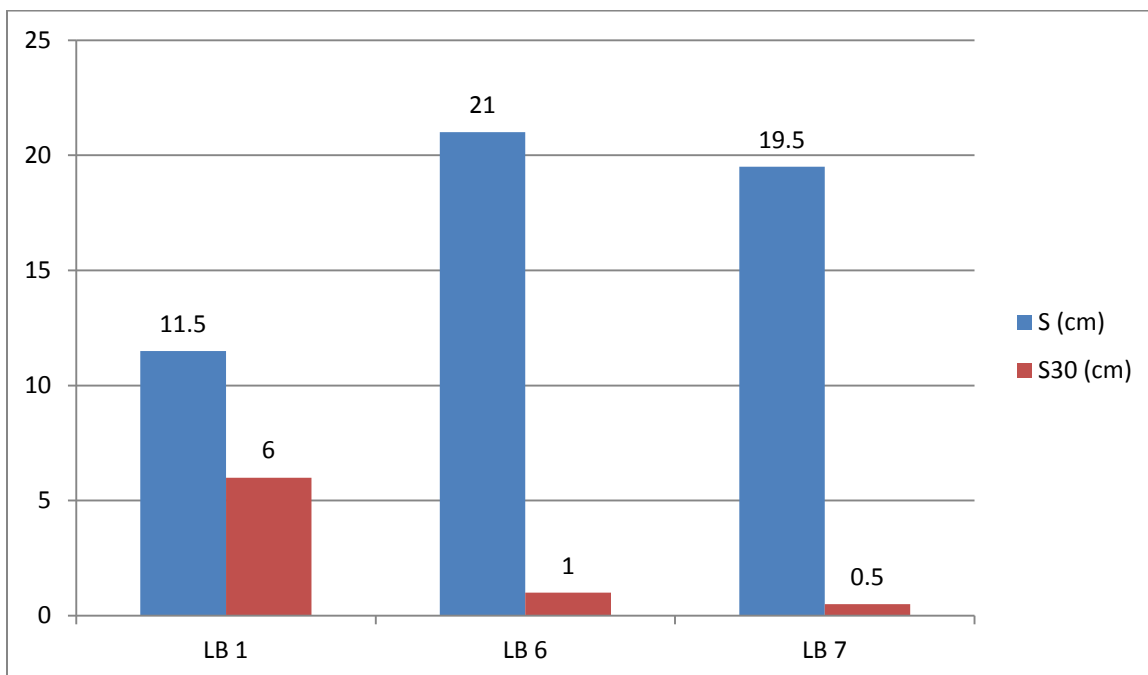


Slika 4.5. Slijeganje mješavine LB6 neposredno nakon miješanja (lijevo), te 30 minuta nakon miješanja (desno). [4]



Slika 4.6. Slijeganje mješavine LB6 neposredno nakon miješanja (lijevo), te 30 minuta nakon miješanja (desno). [4]

Rezultati metode slijeganja prikazani su na grafu 4.5.



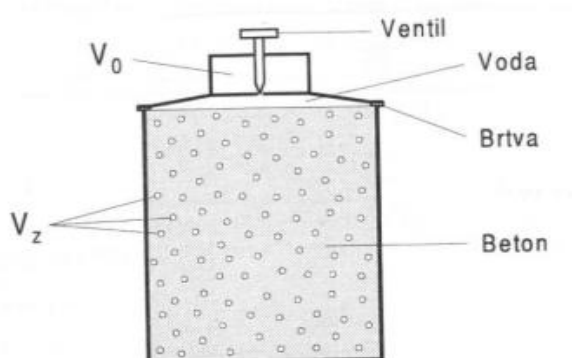
Graf 4.5. Rezultati ispitivanja metodom slijeganja (S-slijeganje neposredno nakon miješanja, S30-slijeganje 30 minuta nakon miješanja) [4]

Kod LB 6 i LB 7 obradljivost nakon miješanja je bila dosta dobra, ali nakon 30 minuta oba betona su se jako stvrdnula i bila su teško obradljiva. To se može pripisati Liapori koji ima veliko upijanje vode, što suši beton i čini ga teško obradljivim. Također udio u tome ima i metakaolin, koji zahtjeva veću količinu vode da bi se dobila željena obradivost. LB 1 je imao lošiju obradljivost nakon miješanja što se može pripisati tome što nije imao dodatne vode na početku. Međutim nakon 30 minuta je imao prihvatljivu obradivost, u odnosu na druga dva betona. Obradljivost se može kod LB 6 i LB 7 poboljšati povećanjem količine vode u recepturi, međutim time će nam se smanjiti čvrstoća betona. Može se i liapor zasititi određenom količinom vode, te se takvi agregat iskoristiti.

4.4.2. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu

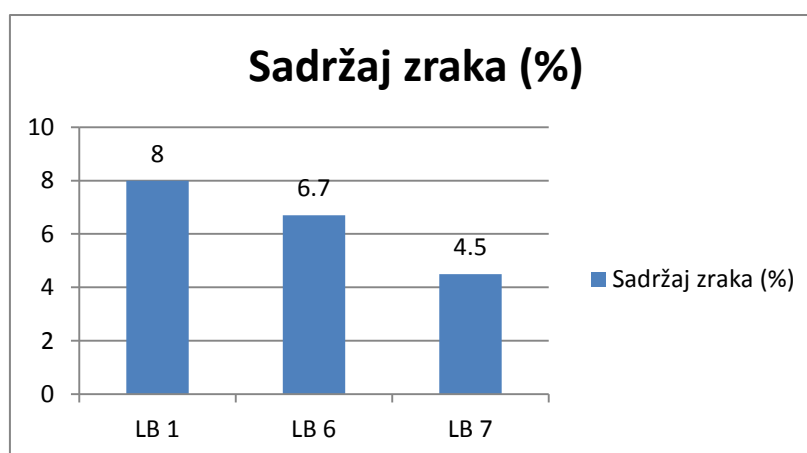
Sadržaj zraka u svježem betonu je ispitan pomoću porometra, a ispitivanje je provedeno odmah nakon ispitivanja metodom slijeganja. Porometar se sastoji od čvrste, valjkaste posude

volumena 8 dm^3 i poklopca na kojem je mali rezervoar zraka volumena V_0 , manometar, ručna pumpa i ventil. Uređaj je prikazan na slici 4.7.



Slika 4.7. Manometar [4]

Posuda i poklopac se prije testa moraju lagano navlažiti tako da na površinama nema slobodne vode. Nakon što se beton postavi u uređaj mora se izvršiti zbijanje pomoću uranjajućeg vibratora, zatim se površina betona poravna te se dobro obriše rub posude i pokrije poklopcem. Između rezervoara 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 očitava sadržaj zraka, z , u % volumena posude za beton.



Graf 4.6. Rezultati ispitivanja sadržaja zraka [4]

Količine zraka u betonu se kreću od 4.5 do 8 %. LB 1 ima najveću količinu zraka što se može pripisati tome da nije imao sitnih dodataka koji bi popunili šupljine. LB 6 i LB 7 su u recepturi imali dodatni metakaolin čije su čestice popunile šupljine. Manji sadržaj zraka kod LB 7 nego u LB 6 može se pripisati tome što je LB 7 napravljen od prirodnog (riječnog

agregata) čija je površina glatka te se međusobno bolje popune nego drobljeni grubi agregat kod LB 6.

4.4.3. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Za ovo ispitivanje beton je ugrađen u kalupe pomoću uranjajućeg vibratora kako bi se dobili uzorci dimenzija 15x15x15 cm. Uzorci tako stoje u kalupima 24 sata u kontroliranim uvjetima, odnosno pri relativnoj vlažnosti zraka većoj od 90% i na sobnoj temperaturi. Nakon 24 sata uzorci se vade iz kalupa i potapaju u vodu gdje se čuvaju do dana ispitivanja. Na dan ispitivanja uzorci se vade iz vode, obrišu ručnikom, da im površina bude suha, važu se te su nakon toga spremni za ispitivanje.



Slika 4.8. Ispitivanje tlačne čvrstoće [4]

Tlačna čvrstoća je ispitana na zasićenim, površinski suhim uzorcima pomoću preše za određivanje tlačne čvrstoće betona prema propisu EN 12390-3:2001. Ispitivanje se vrši tako da se prethodno pripremljeni uzorci stave u uređaj i opterećuju dok ne dođe do njihovog

sloma, a zatim se očita naprezanje i sila u trenutku sloma. Ispitivanja su provedena nakon 3,7 i 28 dana. Za svaki ispit korištena su tri uzorka jer vrijednost naprezanja varira, pa se kao mjerodavna uzme srednja vrijednost kod tri uzorka. Rezultati su prikazani u tablici 4.9.

Mješavina	Tlačna čvrstoća, f_c (MPa)		
	3 dana	7 dana	28 dana
LB1	50,50	56,00	63,78
LB6	55,85	61,73	74,56
LB7	65,50	65,90	84,10

Tablica 4.9. Rezultati tlačne čvrstoće [4]

U ovom ispitivanju betoni LB6 i LB7 su pokazali odlične rezultate u odnosu na LB1. Metakaolin koji je prisutan kod ta dva betona utjecao je na njihovu visoku čvrstoću. Osim toga ta dva betona umjesto liapora kao agregata imaju drobljeni odnosno prirodni agregat. LB7 pokazuje veću čvrstoću od LB6 zbog prirodnog (riječnog) agregata u njegovoj recepturi koji je pod djelovanjem vode oblikovan tako da nema slabih dijelova, što je kod umjetnog, drobljenog agregata čest slučaj.

5. Zaključak

Laki betoni, sa svojom manjom gustoćom u odnosu na normalne betone, mogu odlično služiti u slučajevima kad tražimo manju težinu određenih konstrukcija, ali da i dalje svojom čvrstoćom zadovolje potrebe statike. Laki betoni imaju manji modul elastičnosti te su krutiji u odnosu na obične betone pa se zbog toga ponašaju skoro totalno elastično sve do samog sloma. Zbog svojih velikih pora laki betoni se najčešće ne koriste kao konstruktivni dio već kao izolacija. Velike pore koje imaju laki betoni, zbog agregata koji su takvi, služe kao odlični izolatori topline i zvuka. Sa lakim betonom je vrlo zahvalno raditi jer se sa puno različitih kombinacija primjesa, agregata i aditiva može dobiti veliki raspon različitih vrsta betona za različite primjene. Tim kombinacijama može zadovoljiti razne potrebe, od čisto izolacijskih i nekonstruktivnih lakih betona do izrazito čvrstih (ali i dalje manje čvrstih od normalnih betona) laganih te izolacijski zadovoljavajućih lakih betona. Laki beton, kao malo moderniji materijal, se mora smatrat kao jedna vrsta specijaliziranog betona za posebne potrebe, a nikako kao puno zamjena za obični beton. Njegova odlična svojstva se trebaju koristiti prvobitno za izolacijske sustave, te sa specijalne lake konstrukcije.

Cilj pokusnog sustava je bio pravljenje dvije slične mješavine betona i njihovo uspoređivanje s osnovnom mješavinom. Mješavina LB6 se razlikovala od LB7 jedino po vrsti agregata. Dok je kod LB6 agregat bio drobljeni, kod LB7 je bio prirodni. Osnovna mješavina LB1 se odlično pokazala u testu slijeganje, gdje je pokazivala odličnu obradljivost čak i nakon 30 minuta, a mješavine LB6 i LB7 su zakazale (obradljivost nakon 30 minuta im je bila od 6 do 12 puta manja nego kod LB1). U ostalim testovima mješavine LB6 i LB7 su pokazala odlična svojstva koja su nadmašila osnovnu mješavinu. Posebno prti testu tlačne čvrstoće gdje je mješavina LB7 imala čak preko 20 MPa veću čvrstoću od osnovne mješavine. To se može pripisati prirodnom agregatu koji je korišten pri izradi te mješavine. Na kraju ispitivanja se može zaključiti da će mješavina s najboljim (i najskupljim) agregatima, aditivima itd. uglavnom pokazivat najbolja svojstva.

Literatura

- [1] [Niyazi Ugur Kockal](#), [Turan Ozturan](#): Strength and elastic properties of structural lightweight concretes, [Materials & Design](#), 32 (2011), 2396 – 2403, Turkey, 2010.
- [2] L.H.Nyugen, A.L.Beaucour, S.Ortola, A.Noumowé: Influence of the volume fraction and nature of fine lightweight aggregates on the thermal and mechanical properties of structural concrete, *Construction and building materials*, 51 (2014), 121 – 132, 2013.
- [3] Keun-Hyeok Yang, Gwang-Hee Kim i Yong-Hwa Choi: An initial trial mixture proportioning procedure for structural lightweight aggregate concretes, *Construction and building materials*, 55 (2014), 431 – 439, 2014.
- [4] Vukoje S.: Diplomski rad (tema: laki betoni visokih čvrstoća), Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije sveučilišta u Splitu, Split, 2012.
- [5] Juradin S., Krstulović P.: Građevinski materijali II, Samozbijajući beton, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije sveučilišta u Splitu.
- [6] Liapor - lagani beton, Liapor za dobre ideje, Lias Osterreich GesmbH
- [7] <http://www.imerys-oilfieldsolutions.com/>
- [8] <http://upris.hr/>
- [9] <http://www.perlite.net/>
- [10] <http://en.wikipedia.org/>
- [11] <http://proleksis.lzmk.hr/>
- [12] <http://www.betoni.hr/>

