

# Laki beton visoke čvrstoće

---

**Gotovac, Ana**

**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:123:341935>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-24**



*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**

**Ana Gotovac**

**Split, 2014.**

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

**Ana Gotovac**

**Laki beton visoke čvrstoće**

**Završni rad**

**Split, 2014.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Split, Matice hrvatske 15

**STUDIJ: PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ  
GRAĐEVINARSTVA**

**KANDIDAT: Ana Gotovac**

**BROJ INDEKSA: 3853**

**KATEDRA: Katedra za građevinske materijale**

**PREDMET: Građevinski materijali I**

## **ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD**

Tema: Laki beton visoke čvrstoće

Opis zadatka: Zadatak kandidatkinje je proučiti lake betone visoke čvrstoće. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi laki beton visoke čvrstoće ( <55 MPa ) koji prema slijeganju spada u razred S4 (S0 16-20cm ). Na raspolaganju su različite vrste frakcija 0-2 mm (liapor, prirodni i drobljeni agregat), a krupna komponenta je liapor 4-8 mm. Beton treba ispitati u svježem i očvrslom stanju, te analizirati dobivene rezultate.

U Splitu, 23.09.2014.

Voditelj završnog rada:

Izv.prof.dr.sc. Sandra Juradin

**Laki beton visoke čvrstoće**

***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 ekspanzirane pečene gline ili zgure, te s agregatom prirodnog porijekla. U eksperimentalnom dijelu rada napravljene su 3 različite vrste betonskih mješavina. Prikazani su i analizirani rezultati ispitivanja lakog betona visoke čvrstoće u svježem i očvrslom stanju.

***Ključne riječi:***

Laki beton, liapor, obradivost betona, silikatna prašina, laki beton visoke čvrstoće

**( High – strenght lightweight concrete )**

***Abstract:***

Lightweight concrete has a lower density compared to normal concrete. Reducing density is achieved 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, achieve maximum strength. In the experimental part of the work 3 different types of concrete mixes were made. Results obtained by testing properties of fresh and hardened high – strenght lightweight concrete are presented and analysed.

***Keywords:***

Lightweight concrete, concrete workability, silica fume, strenght lightweight concrete.

**Sadržaj**

1.	LAKI BETONI .....	2
1.1.	Svojstva lakih betona .....	2
2.	PODJELA LAKIH BETONA .....	5
2.1.	Laki betoni od jednakoznatog agregata .....	5
2.2.	Lakoagregatni betoni .....	6
2.2.1.	Prirodni laki agregat .....	6
2.2.2.	Ekspandirani i pečeni (umjetni) agregati .....	7
2.2.3.	Sekundarne sirovine .....	10
2.3.	Ćelijasti betoni .....	11
2.3.1.	Plinobetoni .....	12
2.3.2.	Pjenobetoni .....	12
2.3.3.	Ekspandirane granule polimera .....	13
3.	DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA BETONA VISOKE ČVRSTOĆE .....	14
3.1.	Čvrstoća i elastična svojstva lakih betona .....	14
3.1.1.	Ispitivanja provedena na agregatima .....	14
3.1.2.	Proizvodnja standardnih lakih betona .....	15
3.1.3.	Rezultati ispitivanja i diskusija .....	15
3.3.	Utjecaj volumena frakcija lakog agregata na toplinska i mehanička svojstva betona .....	18
3.3.1.	Fizička svojstva lakog agregata .....	18
3.2.2.	Gustoća agregata i upijanje vode .....	18
3.2.3.	Poroznost i veličina pora .....	21
3.2.4.	Utjecaj lakog agregata na svojstva betona .....	22
3.4.	Početo ispitivanje mješavine betona s lakim agregatom .....	24
4.	EKSPERIMENTALNI DIO RADA .....	28
4.1.	Uvod .....	28
4.2.	Materijali .....	28
4.2.1.	Cement .....	29
4.2.2.	Agregat .....	30
4.2.3.	Dodaci betonu .....	33
4.3.	Proračun sastava betona .....	34
4.4.	Rezultati ispitivanja .....	36
4.4.1.	Rezultat ispitivanja metodom slijeganja .....	36
4.4.2.	Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu .....	39
4.4.3.	Ispitivanje tlačne čvrstoće betona .....	40
5.	ZAKLJUČAK .....	42
6.	LITERATURA .....	43

## 1. LAKI BETONI

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

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

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

### 1.1.Svojstva lakih betona

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

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

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

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

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

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

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

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



Puzanje lakih betona je znatno veće nego kod običnih betona.

Upijanje vode lakih betona znatno je veće od upijanja normalnog betona za slučaj istih ili približnih tlačnih čvrstoća. To povećanje iznosi približno 40% za slučaj približnih tlačnih čvrstoća. Relativno visoko upijanje vode lakog betona ne uzrokuje negativan utjecaj na otpornost na mraz, zbog dodataka za oblikovanje zračnih pora koji je povećaju.

Zbog nedovoljne čvrstoće i vodopropusnosti sloj lakog betona bilo koje debljine nema svojstva da trajno štiti armaturu od korozije.

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

Vrlo važnu ulogu u projektiranju konstrukcija od lakog betona imaju temperaturne deformacije. Razna ispitivanja lakih betona pokazala su da laki betoni imaju manji koeficijent linearnog širenja u odnosu na čelik i obični teški beton pri istoj ugrađenoj količini cementa. Zbog toga treba očekivati da pri zagrijavanju u eksploataciji zajednički rad čelične armature i lakog betona neće biti u potpunosti osiguran. Naime, može doći nastanka većih naprezanja na istežanje, jer deformacije čelika prelaze deformacije betona

## 2. PODJELA LAKIH BETONA

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

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

### 2.1. Laki betoni od jednakozrnatog agregata

Laki betoni od jednakozrnatog agregata se dobivaju izostavljanjem sitne frakcije agregata i upotrebom praktično jedne frakcije nominalno iste veličine zrna. Jedna normalna frakcija kamenog agregata, primjerice 4 – 8 mm ima volumnu koncentraciju agregata 0.55 – 0.60, zbog čega u gotovom betonu ostaje dosta šupljina. U betonu su zrna obavijena cementnom pastom debljine cca 1.3 mm, pa između zrna ostaju velike šupljine. Prema principu geometrijske sličnosti agregata, volumna koncentracija uzorka agregata ne ovisi o veličini zrna agregata i najmanja je za jedan razred zrna agregata. Miješanjem više razreda povećava se volumna koncentracija agregata. Zrna agregata ne bi trebala biti veća od 25 – 30 mm. Pogodna je veličina kad je najkrupnije zrno dvaput veće od najsitnijeg. Ovakav beton se može izrađivati i od lakog agregata.

Beton od jednakozrnatog agregata je otporan na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, jer gotovo nema kapilarnih pora. Potrebna količina cementa je najmanje 250 kg/m<sup>3</sup>. Vrlo dobro apsorbira zvuk, ukoliko se površina ne zagladi, te je zbog toga prikladan u zgradama gdje su presudni uvjeti u pogledu akustike.



**Slika 2.1.** Laki beton od jednakozrnatog agregata; izvor [2]

## **2.2.Lakoagregatni betoni**

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

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

### **2.2.1. Prirodni laki agregat**

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

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

Budući da ima veliku poroznost, ovaj agregat zahtjeva mnogo vode pri izradi betona što pak dovodi do velikog skupljanja i pojave pukotina ukoliko se ne poduzmu odgovarajuće mjere.

*Agregati vulkanskog porijekla* - Proizvode vulkanskog porijekla predstavljaju plovuće i prirodni porozni pucolani, a razlikuju se po strukturi i sastavu.

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

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



**Slika 2.2.** Pucolan [13]

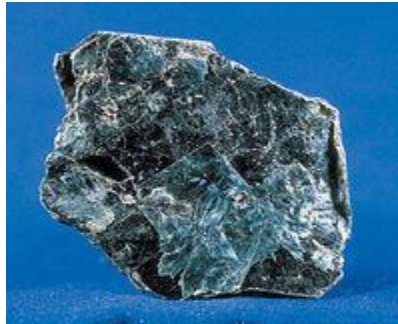
### **2.2.2. Ekspandirani i pečeni (umjetni) agregati**

Ovi se agregati dobivaju industrijskim putem, specijanim tehnološkim postupcima.

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

*Vermikulit* - Stijena vermikulit nastaje u prirodi iz liskuna, a ekspandirani vermikulit spada u najrijede porozne agregate. Ima naročito naglašene sljedeće osobine: toplinsku

izolacijsku moć koja potječe od zračnih proslojaka između njegovih listića i male toplinske provodljivosti samog materijala što je od značaja kod djelovanja visokih temperatura i požara; i zvučnu izolacijsku sposobnost koja potječe od porozne strukture.



**Slika 2.3.** Vermikulit [8]

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



**Slika 2.4.** Granule ekspandirane gline, [2]

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

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

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

Proces ekspanziranja počinje dovođenjem sirovog materijala na odgovarajuću temperaturu. Najčešća primjenjena tehnologija za proizvodnju agregata od ekspanzirane gline je postupak s rotacijskom peći. Postrojenje radi tako da se materijal najprije suši, zatim se predgrijava i na kraju procesa hladi. Temperatura na ulazu u peć kreće se od 200 – 600 °C, a u zoni topljenja oko 1150 °C. Ukupno vrijeme prolaza materijala kroz peć iznosi 30 – 45 min.

Agregat od ekspanzirane gline je pogodan za upotrebu zbog sljedećih osobina:

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

### 2.2.3. Sekundarne sirovine

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

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

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

Ložišna zgura ima značajnu primjenu u izradi nearmiranog lakog betona.

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

*Granulirana zgura* - Granulirana zgura nastaje ako se zgura visokih peći naglo hladi potapanjem u vodu te se dobiju zrna s velikim sadržajem pora. Za proizvodnju agregata

najčešće se koristi kisela zgura, dok je bazičnu zguru najekonomičnije upotrijebiti kao dodatak cementu.

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

Agregat za beton se dobiva drobljenjem ohlađene zgure.

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

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

### **2.3.Ćelijasti betoni**

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

Podjela ćelijastih betona prema načinu dobivanja ćelijaste strukture je sljedeća:

- plinobetoni,
- pjenobetoni,
- ekspandirane granule polimera.



### 2.3.1. Plinobetoni

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

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

### 2.3.2. Pjenobetoni

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

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

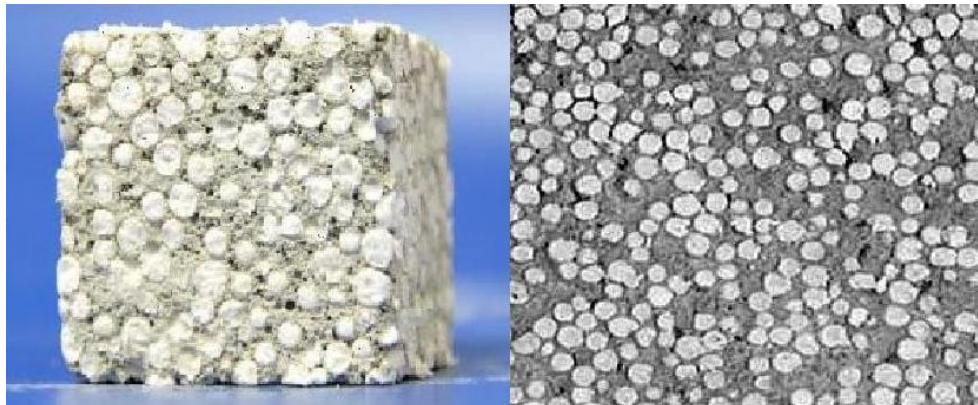


*Slika 2.1. Pjenobeton [11]*

### 2.3.3. Ekspandirane granule polimera

Postupak proizvodnje najviše upotrebljavanog lakog betona od granuliranog ekspandiranog polistirena (EPS - beton), kojega najčešće zovemo stiropornim betonom, tehnološki je jednostavan. Ono što je bitno za njegovu pripremu je uporaba pravog sastava i dodataka koji ne dopuštaju izlučivanje stiropornih granula iz mješavine svježeg betona. Ovim je postupkom moguća proizvodnja betona s vrlo širokim rasponom prostornih masa od 600 do 1600 kg/m<sup>3</sup>, odgovarajućih izolacijskih i konstruktivnih svojstava.

Moderna proizvodnja lakog betona se vrši tako da se na gradilište u mikserima doveze cementno mlijeko (cement, voda, aditiv i pijesak) u koje se dodaje naknadno stiropor. Za takav način rada je neophodno na gradilištu imati vijčanu pumpu s mogućnošću doziranja stiropora. Stiropor se u pumpu dozira na principu podtlaka-usisa, dok se cementno mlijeko u pumpu dozira direktno iz miksera. Pumpa vrši miješanje stiropora i cementnog mlijeka, te smjesu transportira putem cjevovoda na mjesto ugradnje.



*Slika 2.2. EPS beton [12]*

### **3. DOSADAŠNJA ISTRAŽIVANJA BETONA VISOKE ČVRSTOĆE**

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

#### **3.1. Čvrstoća i elastična svojstva lakih betona**

Kako velike količine pepela ostaju neiskorištene, proizvodnja agregata od laganog letećeg pepela je bila prikladan korak. Lagani agregat od letećeg pepela proizvodi se na dva načina: hladno lijepljenje i sinteriranje. Istraživanja su pokazala da se od 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<sup>3</sup>. Rezultati ispitivanja mehaničkih svojstava pokazuju da je apsorpcija velika, ali čvrstoća betona može biti visoka. Beton s agregatom od drobljenog sinteriranog pepela je imao 25% veću čvrstoću. Svojstva laganog agregata te omjer vode i veziva su dva najvažnija čimbenika koji utječu na tlačnu čvrstoću i elastičnost betona.

##### **3.1.1. Ispitivanja provedena na agregatima**

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

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

### 3.1.2. Proizvodnja standardnih lakih betona

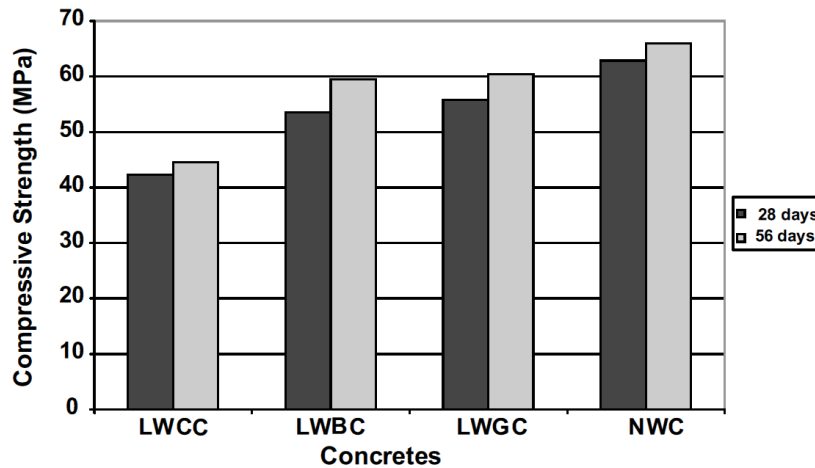
Betoni su s obzirom na vrstu agregata kodirani kao LWGC( betoni s agregatom od laganog staklenog praha s dodatkom letećeg pepela), LWBC( lagani betoni s dodatkom letećeg pepela), LWCC ( Lagani betoni s dodatkom hladno prešanog letećeg pepela) i NWC ( betoni standardne težine). Početne ispitne mješavine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

Gustoća svježeg betona i sadržaj zraka su izmjereni u skladu sa standardnim procedurama. Tlačna čvrstoća, modul elastičnosti i čvrstoća na cijepanje su također mjereni prema standardnim metodama nakon 28 i 56 dana. Također, vrijednosti modula elastičnosti konkretnih uzoraka su izračunati prema europskim standardima kakvoće.

### 3.1.3. Rezultati ispitivanja i diskusija

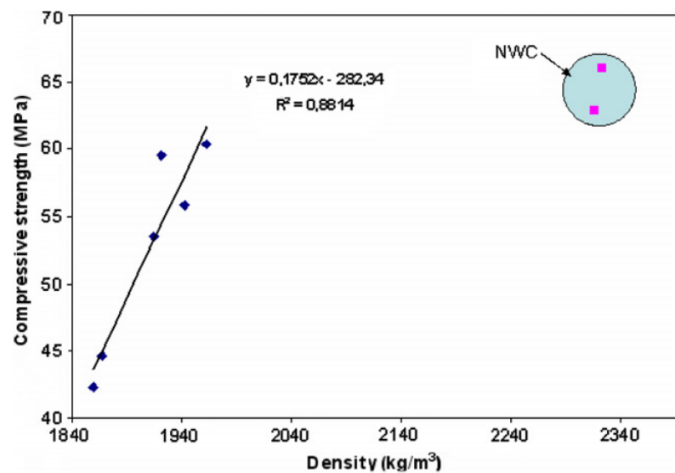
Kako bi se dobilo slično slijeganje i sadržaj zraka kod lakih betona u usporedbi sa standardnim betonima, potrebna je manja količina superplastifikatora i aeranta što rezultira smanjenjem troškova. Razlog tome može biti sferni oblik čestica lakog agregata u odnosu na pravokutni oblik čestica tucanika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

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



*Dijagram 3.1. Vrijednosti tlačne čvrstoće [5]*

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



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

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

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

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

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

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

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

### **3.3. Utjecaj volumena frakcija lakog agregata na toplinska i mehanička svojstva betona**

Laki agregat korišten u građevinskim laganim betonima su uglavnom glina, škriljac i plavac. Za poboljšanje toplinskih svojstava lakog betona gustoća lakog agregata se još mora smanjiti. Jedna mogućnost bi mogla bit zamjena jedne ili svih frakcija sa finim lakim agregatom. Toplinska vodljivost lakog betona jako ovisi o volumena lakog agregata.

Cilj ove studije je dobit laki beton s boljom termičkom izolacijom bez prevelikog gubitka mehaničkih svojstava. Građevinski laki beton mora imat gustoću manju od 1600 kg/m<sup>3</sup> i tlačnu čvrstoću ne manju od 20 MPa. Za ovu svrhu zamjena za finog normalnog agregata s finim lakim agregatom je proučena, a superplastifikatori su uvedeni u smjese u svrhu poboljšanja čvrstoće i rada sa njim.

#### **3.3.1. Fizička svojstva lakog agregata**

Zbog svoje velike poroznosti laki agregati imaju manju čvrstoću i deformabilniji su nego normalni agregati što znači da je u lakom betonu najslabija komponente agregat, a ne cement. Mehanička svojstva lakog betona nisu kontrolirane samo kvalitetom cementa već i volumenom lakog agregata u betonu i njegovim svojstvima. Uglavnom su betoni napravljeni od 65-75% agregata tako da lako agregat ima vrlo velik utjecaj na toplinska i izolacijska svojstva lakog betona. Toplinska i mehanička svojstva teško je izmjeriti zbog male veličine i poliedarske forme pa se ova svojstva su karakteriziraju prema gustoći i poroznosti lakog agregata.

#### **3.2.2. Gustoća agregata i upijanje vode**

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

Aggregates	Size	Aggregates density (kg/m <sup>3</sup> )			$W_a^{24}$
		$\rho_v$	$\rho_{rd}$	$\rho_{ssd}$	
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 3.1.** Fizikalna svojstva lakih agregata [6]

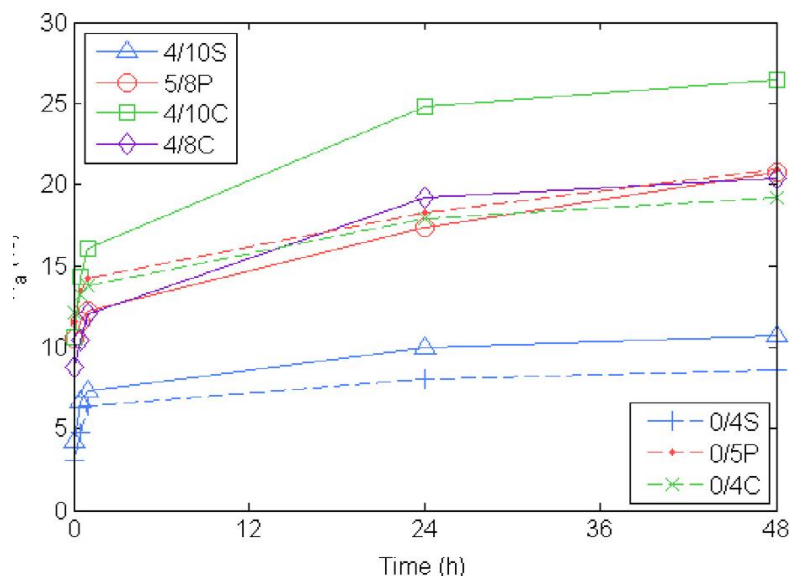
Svojstva normalnih agregata nazvana su 0/2 N i 4/10 N. Gustoća ( $\rho_v$ ), gustoća potpuno suhog zrna ( $\rho_{rd}$ ) i gustoća površinski suhog zrna ( $\rho_{ssd}$ ) utvrđene su nakon 24 sata po standardima EN 1097-3 i EN 1097-6. Testirana su po 3 uzorka za svaki agregat kako bi se odredila srednja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

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

$$W_a^i = W_a^{48} - (M^{48} - M^i) / M^s \quad (1)$$

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





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

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

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

### 3.2.3. Poroznost i veličina pora

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

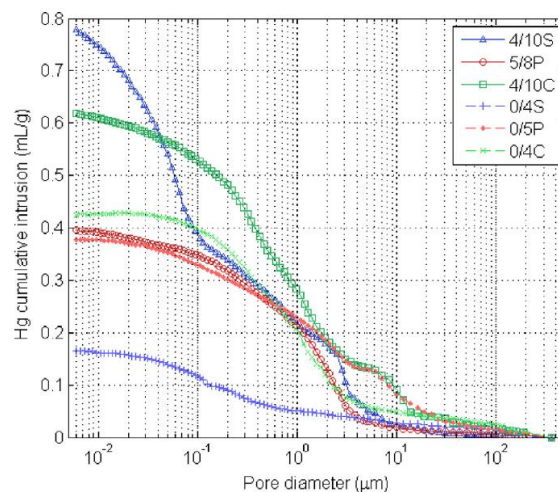
$$r = 2\sigma \cos\theta/P \quad (2)$$

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

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

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

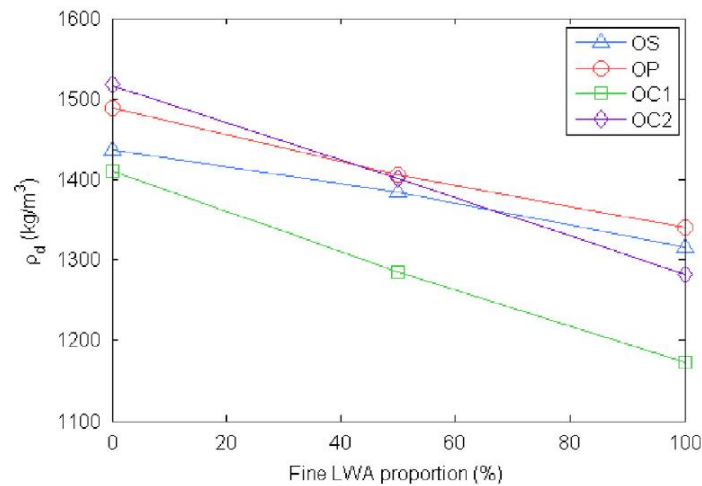
Ukupna poroznost lakog agregata  $\Phi^{\text{Hg}}$  usljed ulaska žive varira od 25% do 60%. Te vrijednosti poroznosti testirane ulaskom žive općenito su u skladu s vrijednostima dobivenih u vakuumu  $\Phi^{\text{vac}}$ . Porometar može otkriti pore u rasponu od 6 nm do 160  $\mu\text{m}$ .



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

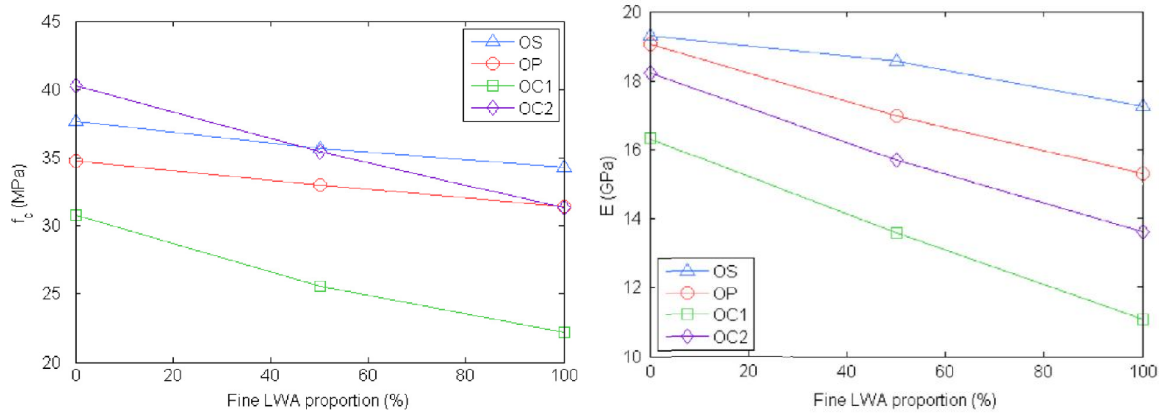
### 3.2.4. Utjecaj lakog agregata na svojstva betona

Zamjena normalnog finog agregata sa finim lakom agregatom smanjuje gustoću betona i utječe na svojstva betona. *Slika 3.7.* pokazuje razvoj gustoće lako agregatnog betona ovisno o volumnom udjelu lakog agregata u betonu. Svaka točka odgovara srednjoj vrijednosti iz tri ispitivanja.



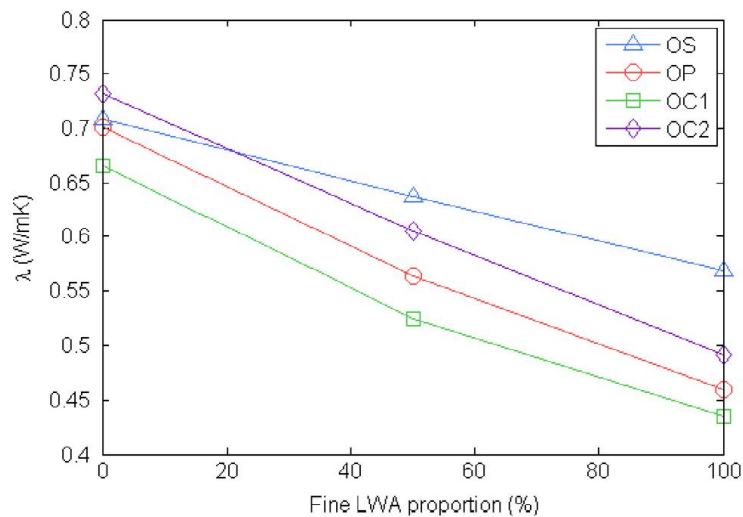
**Slika 3.4.** Razvoj gustoće betona u ovisnosti o količini lakog agregata [4]

Zamjena finog normalnog agregata sa finim lakim agregatom od 50% i 100% dovodi do prosječnog gubitka tlačne čvrstoće lakog betona od 5 – 17% i 9 – 28% (*Slika 3.8.*). Kod kompletne zamjene finog normalnog agregata (100% lakog agregata u mješavini), tlačna čvrstoća lakog betona varira od 22 do 35 MPa. Svi betoni, čija je tlačna čvrstoća veća od klase C16/20 definirane u EN 206-1, mogu se koristiti kao strukturni beton. *Slika 3.9.* pokazuje gubitak dinamičkog modula elastičnosti između 10 i 32% za ukupnu zamjenu normalnog agregata lakim, te on varira od 11 do 17.5 MPa. Ove vrijednosti su dva do tri puta manje nego kod običnog betona.



**Slika 3.5. i Slika 3.6.** Ovisnost volumena sitnog agregata s tlačnom čvrstoćom i modulom elastičnosti  $E$  [4]

Istraživan je utjecaj zamjene finog agregata i njegove prirode na kapacitet toplinske izolacije betona. Ovisno o prirodi finog lakog agregata, toplinska provodljivost lakog betona smanjuje se od 20 do 35% (Slika 3.10.). Vrijednosti toplinske provodljivosti variraju od 0,42 do 0,57 W/mK.



**Slika 3.7.** Ovisnost toplinske provodljivosti i količini lakog agregata [4]

### 3.4. Početno ispitivanje mješavine betona s lakim agregatom

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

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

Glavni parametri za sve lake betone su:

-omjer voda/cement  $w/c = 0,28 - 0,68$

-sadržaj vode  $W = 139 - 242 \text{ kg/m}^3$

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

- količina zraka  $0,03 - 0,065$

*Čvrstoća* - Čvrstoća se koristi kao osnova za odabir udjela u sastavu betona uz standardno odstupanje uzorka  $\lambda_s$ . Na temelju empirijskih dokaza, ACI 214 definira koeficijent varijacije  $\lambda_v$  od 15%, što predstavlja prosječnu kontrolu. Međutim Nowak i Szerszen pokazali su da bi vrijednosti  $\lambda_v$  za prosječnu kontrolu trebala biti niža od preporučene vrijednosti od strane ACI-214. Prema njihovom izvješću, pojedinačna vrijednost od 10% može se preporučiti za normalne betone, dok je  $\lambda_v$  za lake betone 7-8,5%, iako su skupovi podataka za lagane betone mali. Temeljeno na srednjoj vrijednosti gornje granice, izabrani  $\lambda_v$  je iznosio 12,5%, koji

predstavlja prosječnu kontrolu za laki beton. Dakle iz glavne jednadžbe koja je navedena u ACI-381-11 odnos između  $f'_{CR}$  (u Mpa) i  $f'_c$  (u Mpa) za strukturalni laki beton glasi:

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

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

*Vodocementni faktor* - Generalno, tlačna čvrstoća betona obrnuto je proporcionalna W/C i sadržaju zraka  $v_a$ . Osim toga, čvrstoća lakog betona se povećava s njegovom suhom gustoćom, što dovodi do zaključka da je manji W/C potreban lakom betonu s manjom gustoćom da bi se postigla ciljana čvrstoća. Osim toga, suha gustoća značajno ovisi o zamjeni finog agregata prirodnim pijeskom.

$$R_{LFA} (= \frac{v_{fl}}{v_{fl} + v_{fs}}) \quad (5)$$

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

$$\frac{f'_c}{f_0} = 0,72 \cdot \left( \frac{\gamma_{con}}{\gamma_0} \cdot \frac{w}{c} \right) \cdot \left( \frac{1}{v_a} \right)^{0,2} \quad (6)$$

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

$\gamma_0 = \frac{2300\text{kg}}{\text{m}^3}$  ... referentna suha gustoća betona

Iz čega slijedi...

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

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

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

gdje je  $S_o = 300$  mm, referentna vrijednost od početnog slijeganja;  $W_o = 100$  kg/m<sup>3</sup>, referentna vrijednost udjela sadržaja vode.

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

$$W = \left(\frac{W_o}{W_g}\right) \cdot \left(\frac{1}{1+R_{LFA}}\right)^{0,067} \cdot \left(\frac{1}{v_a}\right)^{0,133} \cdot \left(\frac{S_i}{S_o}\right)^{0,333} \quad (kg/m^3) \quad (9)$$

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

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

gdje su  $C$ ,  $G_L$ ,  $F_S$ , i  $F_L$  sadržaji (u kg/m<sup>3</sup>) cementa, krupnog agregata lagane težine, sitnog agregata normalne težine i sitnog agregat lagane težine, odnosno, po jedinici volumena betona. Konstanta 120 kg/m<sup>3</sup> kompenzira razliku između suhe gustoće i izjednačene suhe gustoće, što ovisi o vrsti agregata.

*Zaključak* - Najbolji pristup prilikom prve izrade probne mješavine lakog betona je koristiti rezultate prethodno ostvarenih doziranja za sličnu vrstu betona pomoću agregata s usporedivim svojstvima. Na temelju sveobuhvaćane baze podataka s 347 rezultata ispitivanja, koje su prikupljene od betonskih mješavina s letećim pepelom ili glinenim agregatom lagane težine, ova analiza pruža jednostavan vodič za doziranje probne mješavine strukturalnog lakog betona. Zbog ograničenog raspona i informacija o podacima, takav pristup je

optimiziran za sljedeće uvjete: tlačna čvrstoća betona kretala se između 18 i 50 MPa, suha gustoća betona između  $1200 \text{ kg/m}^3$  i  $2000 \text{ kg/m}^3$ , a maksimalna ukupna veličina zrna je 19 mm ili 25 mm. U svim smjesama, potreban sadržaj zraka bio je 0,035. Ukupno izmjeren sadržaj vlage je 23% za krupni agregat lagane težine, 18% za sitni agregat lagane težine, a 4% za prirodni pijesak. Za ciljane zahtjeve, utvrđeni W/C nalazi se u rasponu između 0,34 i 0,39. Vrijednost  $V_G$  postupno se smanjivala kako se smanjivala vrijednost  $R_{LFA}$ . Izmjereni pad bio je blizu ciljne vrijednosti.

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

- Svi laki betoni obično zahtijevaju niži omjer vode i cementa, u odnosu na lake betone s pijeskom, za istu vrijednost čvrstoće.
- Predložena jednadžba za određivanje jedinice sadržaja vode za ciljano slijeganje betona je više u skladu s rezultatima ispitivanja od navedene preporuke u ACI 211,2-98
- Eksperimentalne vrijednosti betona, koje su dobivene predloženim postupkom doziranja, osobito su blizu ciljanom slijeganju, kompresivnoj čvrstoći i gustoći suhog betona.



## 4. EKSPERIMENTALNI DIO RADA

### 4.1. Uvod

Zadatak eksperimentalnog dijela ovog rada je usporediti tri prethodno napravljene i ispitane mješavine lakog betona. Napravljeno je sedam mješavina u oznakama LB1, LB2, LB3, LB4, LB5, LB6 i LB7. Moj zadatak je usporediti mješavine LB2 i LB3 s LB1. Sve mješavine sastoje se od portland cementa, superplastifikatora, te lakog agregata *Liapora* 0 – 2 mm. Količina cementa u mješavinama LB1 i LB3 jednaka, osim kod mješavine LB2, te je mješavina LB3 napravljena sa dodatkom silikatne prašine.

Ispitivana su slijeganja neposredno nakon miješanja S i 30 minuta nakon miješanja S<sub>30</sub>, sadržaj zraka u svježem betonu te tlačna čvrstoće nakon 3, 7 i 28 dana. Na temelju dobivenih rezultata moći će se zaključiti kako koji od dodataka utječe na ponašanje beton u svježem i očvrslom stanju.

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

### 4.2. Materijali

U pripravljanju pokusnih mješavina betona upotrijebljeni su sljedeći materijali:

- cement *CEM I 52,5R*,
- Liapor lagani agregat frakcija 0 – 2 mm i 4 – 8 mm,
- superplastifikator *RHEOMATRIX 230*,
- silikatna prašina.

### 4.2.1. Cement

Za pripremu mješavina betona upotrijebljen je bijeli portlandski cement *CEM I 52,5R*, proizvođač Dalmacijacement, Hrvatska. Upotrebom ovog cementa postižu se visoke rane čvrstoće i povoljan omjer čvrstoće betona i količine cementa. Idealan je izbor za obojene i dekorativne žbuke i betone. Žbuke, mortovi i betoni izrađeni s ovim cementom odlikuju se vrhunskom obradivošću. U Tablici 4.1. su prikazana svojstva cementa *CEM I 52,5R*.

**Tablica 4.1.** Svojstva cementa *CEM I 52,5R* [ 14 ]

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

#### 4.2.2. Agregat

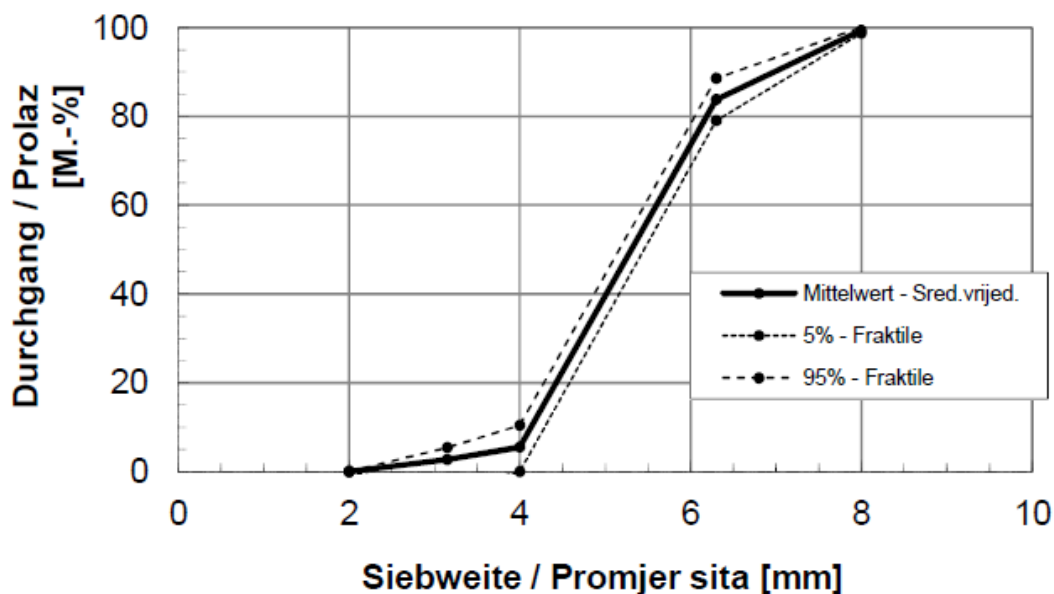
*Liapor* – Prirodno čista i oko 180 mil. godina stara glina iz razdolja lias, ere jura, kvalitetna je sirovina za liapor proizvode. U liapor proizvodnom procesu prirodna sirovina gline se melje, miješa i oblikuje u kuglice koje su nakon toga podvrgnute tehnološkom procesu pečenja na temperaturi od 1100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

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

Pokusne mješavine sadrže:

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

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

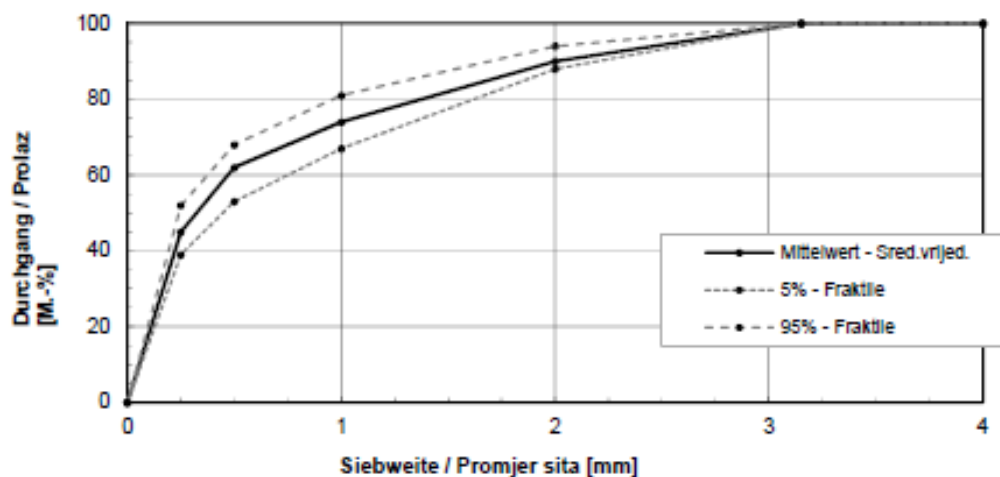


Dijagram 4.1. Granulometrijska krivulja Liapora frakcije 4 – 8 mm [8]

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

Osnovne osobine	Vrsta materijala	Ekspandirana glina	
	Oblik zrna	Okruglo	
Geometrijske osobine	Granulometrijska grupa	4 - 8	mm
	Sitne čestice (<0,063 mm)	< 1,0	M.-%
Fizikalne osobine	Nasipna gustoća	950 ± 25	kg/m <sup>3</sup>
	Specifična gustoća	1700 ± 50	kg/m <sup>3</sup>
	Upijanje vode w <sub>30</sub> (30 min)	8 ± 4	M.-%
	Upijanje vode w <sub>60</sub> (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 <sub>3</sub>	< 0,4	M.-%
	Ukupni sumpor	< 1,0	M.-%
Kemijski sastav	SiO <sub>2</sub>	53 ± 5	%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	18 ± 5	%
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15 ± 5	%
	CaO	6 ± 5	%
	Elementi u tragovima	2 ± 2	%

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



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

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 <sup>3</sup>
	Specifična gustoća	1770 ± 10	kg/m <sup>3</sup>
	Upijanje vode $w_{BVK}$	25 - 35	M.-%
Kemijske osobine	Kloridi	< 0,02	M.-%
	Sumporni spojevi SO <sub>3</sub>	< 0,8	M.-%
	Ukupni sumpor	< 1,0	M.-%
Kemijski sastav	SiO <sub>2</sub>	55 ± 5	%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	24 ± 5	%
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14 ± 5	%
	CaO	5 ± 5	%
	Elementi u tragovima	2 ± 2	%

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

### 4.2.3. Dodaci betonu

*Superplastifikator* – RHEOMATRIX 230 je nova generacija superplastifikatora posebne namjene za samorazlijevajuće betone. Rheomatrix je posebno dizajniran za beton za izradu prefabriciranih AB elemenata. Regulira nivo viskoziteta u mješavini, omogućujući da se postigne ravnoteža između fluidnosti, sposobnosti prolaska i otpornosti na segregaciju – zapravo potpuno suprotnih svojstava.

Primjenjuje se u proizvodnji samorazlijevajućeg betona visoke kvalitete uz smanjenu potrošnju cementa i značajno reduciranu potrebu za finim česticama.

Doziranje: 0,5 – 2,0% od ukupnog sadržaja veziva.

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

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

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

Meyco MS 610 ima razna djelovanja, a to su:

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

Osnovni tehnički podaci o silikatnoj prašini Meyco MS 610 prikazani su u *Tablici 4.4.*

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

**Tablica 4.4.** Osnovna svojstva Meyco MS 610 mikrosilike [8]

### 4.3. Proračun sastava betona

Izrađene su tri mješavine betona, a recepture su prikazane u tablici 4.5.

**Tablica 4.5.** Sastav mješavina

Sastav (kg)	LB1	LB2	LB3
Cement	430	480	430
Voda	224	240	237
Silikatna prašina	0	0	50
Superplastifikator	4,3	4,8	4,3
Liapor 0-2 mm	323	305	304
Liapor 4-8 mm	753	713	710

Sve mješavine su napravljene sa dodatkom superplastifikatora u količini od 1% na masu cementa. Vodocementni faktor, w/c, pokusnih mješavina kreće se u rasponu 0,50 – 0,55, dok se vodovezivni faktor, w/b, kreće od 0,45 – 0,52.

Potrebne količine komponenti, koje čine sastav betona, za sve mješavine izmjerene su na preciznoj vazi. Sve mješavine su miješane 6 min (*Slika 4.1*).



*Slika 4.1. Mješalica betona [slika zabilježena tijekom ispitivanja]*

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

*LB2* – Isto kao i kod mješavine *LB1*, svi suhi sastojci su prethodno zajedno promiješani. Nakon toga je dodana voda sa superplastifikatorom i nastavljeno je s miješanjem betona. Međutim, tijekom miješanja je dodana voda za upijanje agregata kako bi se postigla željena obradljivost.

*LB3* – U mješalicu su najprije stavljeni agregat i voda za upijanje agregata. Kada je agregat upio vodu dodani su ostali suhi sastojci i voda sa superplastifikatorom. Ova mješavina je napravljena sa dodatkom silikatne prašine.



#### 4.4. Rezultati ispitivanja

##### 4.4.1. Rezultat ispitivanja metodom slijeganja

*LBI* – Neposredno nakon miješanja prva mješavina je bila slabe obradljivosti što se može pripisati velikom upijanju sitne frakcije laganog agregata Liapora. Rezultati ispitivanja metodom slijeganja potvrdili početnu slabu obradljivost. Rezultati ispitivanja:

$$S = 11,5 \text{ cm},$$

$$S_{30} = 6 \text{ cm}$$

gdje je  $S$  – slijeganje neposredno nakon miješanja, a  $S_{30}$  – slijeganje 30 minuta nakon miješanja.



a)

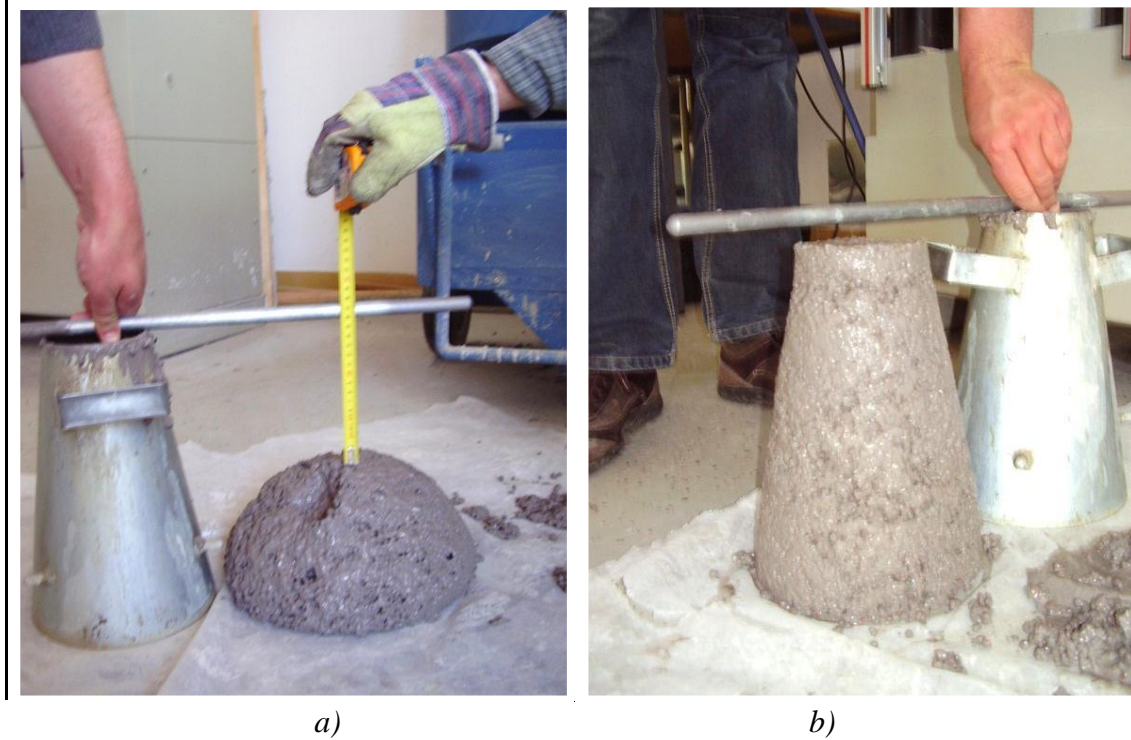
b)

**Slika 4.2.** Slijeganje mješavine *LBI* [slike zabilježene tijekom ispitivanja]: a) neposredno nakon miješanja, b) 30 minuta nakon miješanja

LB2 – Beton LB2 pokazao je nešto bolju početnu obradljivost u odnosu na beton LB1 zbog dodavanja vode za upijanje agregata. Rezultati ispitivanja:

$$S = 16 \text{ cm},$$

$$S_{30} = 1,5 \text{ cm}.$$



*Slika 4.3. Slijeganje mješavine LB2 [slike zabilježene tijekom ispitivanja]: a) neposredno nakon miješanja, b) 30 minuta nakon miješanja*

LB3 – Mješavina LB3 ima bolju obradljivost od mješavine LB1 zbog dodatka vode za upijanje i silikatne prašine. Rezultati ispitivanja:

$$S = 28 \text{ cm}$$

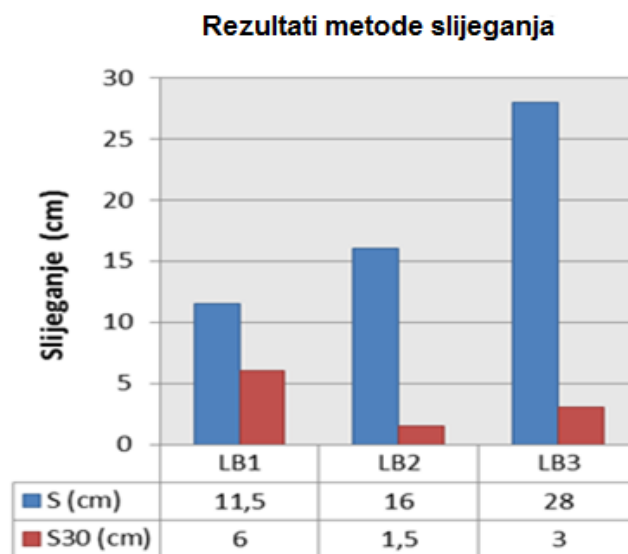
$$S_{30} = 3 \text{ cm.}$$



a)

b)

**Slika 4.4.** Slijeganje mješavine LB3 [slike zabilježene tijekom ispitivanja]: a) neposredno nakon miješanja, b) 30 minuta nakon miješanja

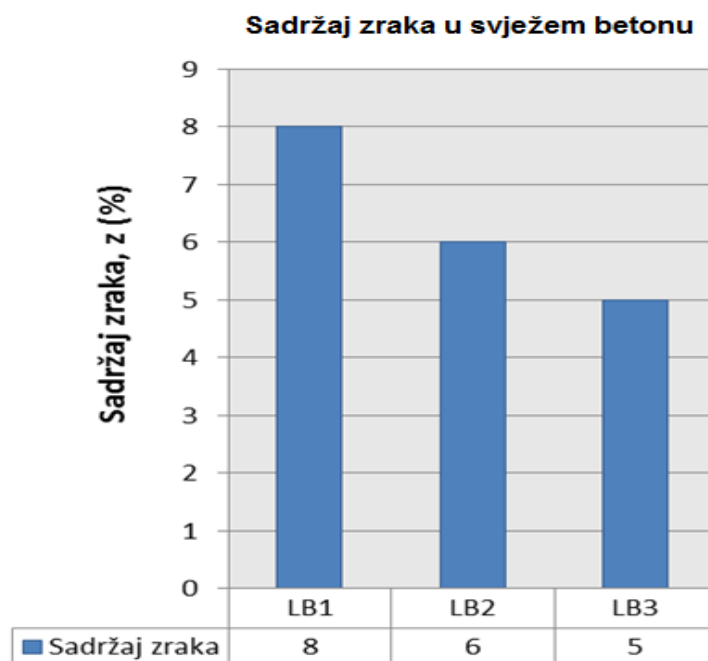


**Dijagram 4.3.** Rezultati ispitivanja metodom slijeganja (*S* – slijeganje neposredno nakon miješanja; *S30* – slijeganje 30 minuta nakon miješanja)

*Dijagram 4.3.* pokazuje rezultate ispitivanjae metodom slijeganja gdje je vidljivo da mješavine s vremenom gube obradljivost zbog velikog upijanja Liapora. Mješavina LB3 s dodatkom silikatne prašine je izrazito izgubila obradljivost zbog specifične površine silikatne prašine koja traži veću količinu vode da bi se dobila željena obradivost. Obradivost se može poboljšati naknadnim dodavanjem vode prilikom miješanja, ali tada riskiramo dobiti beton manje čvrstoće pa se preporuča koristiti agregat Liapor koji je prethodno zasićen vodom.

#### 4.4.2. Ispitivanje sadržaja zraka u svježem betonu

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



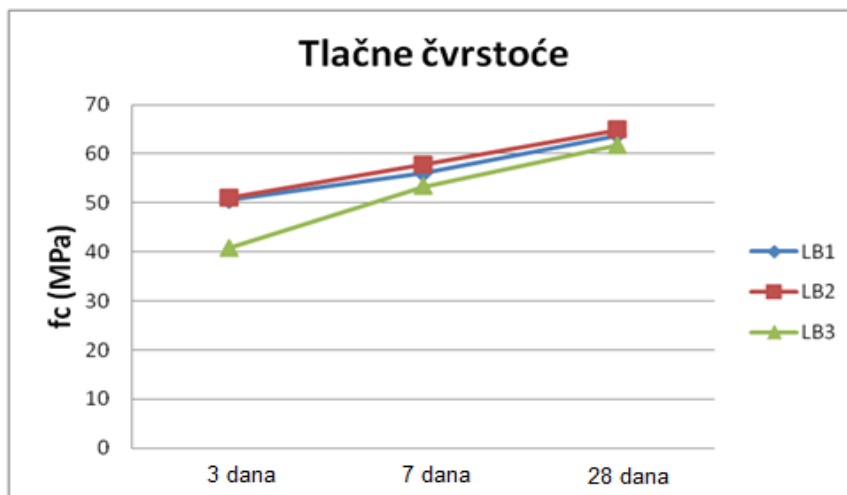
*Dijagram 4.4.* Rezultati ispitivanja sadržaja zraka u svježem betonu

#### 4.4.3. Ispitivanje tlačne čvrstoće betona

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće prikazani su u *Tablici 4.6.* i na *Dijagramu 4.5.*

Mješavina	Tlačna čvrstoća, $f_c$ (MPa)		
	3 dana	7 dana	28 dana
LB1	50,50	56,00	63,78
LB2	50,97	57,80	64,83
LB3	40,73	53,33	61,67

**Tablica 4.6.** Tlačne čvrstoće uzoraka nakon 3, 7 i 28 dana



**Dijagram 4.5.** Tlačne čvrstoće betona



*Slika 4.5. Uređaj za ispitivanje tlačne čvrstoće betona [10]*

Početne čvrstoće variraju između 40 i 50 Mpa i time odgovaraju klasi upotrebljenog cementa koji razvija veliku ranu čvrstoću.

Čvrstoće betona nakon 28 dana variraju između 62 i 64 Mpa što je jako dobar rezultat za lake betone. Prema *Dijagramu 4.5.* mješavine LB1, LB2 i LB 3 imaju gotovo linearan prirast čvrstoće tokom 28 dana starosti betona. Mješavina LB3, koja je izrađena sa silikatnom prašinom pokazala je iznenađujuće najmanju čvrstoću. Najveću čvrstoću ima mješavina LB2 što je i očekivano s obzirom na najveću dodanu količinu cementa.

Gledajući općenito sve su mješavine postigle visoke čvrstoće. Razlog tome je definitivno je upotreba kvalitetnog cementa visoke čvrstoće, ali dobiveni rezultati također pokazuju da nije zanemariva kvaliteta i čvrstoća lakog agregata i različitih dodataka koji se dodaju mješavini lakog betona.



## 5. ZAKLJUČAK

Laki betoni se već dugi niz godina koriste kao konstruktivni betoni. Za primjenu u konstrukcijama često je važnija gustoća betona od njegove čvrstoće. Smanjenjem gustoće dopuštaju se uštede u stalnom opterećenju kod projektiranja konstrukcija i temelja. Dosadašnja istraživanja pokazuju da se mehanička svojstva normalnih betona znatno razlikuju od svojstava lakih betona. Također je iskustveno utvrđeno da tlačna čvrstoća lakog betona prvenstveno ovisi o vrsti lakog agregata, dok porast sadržaja cementa ili zamjena cementa silikatnom prašinom, te djelomična zamjena lakog finog agregata prirodnim pijeskom imaju zanemariv utjecaj na tlačnu čvrstoću lakog betona.

U okviru završnog rada i uz dostavljene rezultate ispitivanja iz laboratorija testirali smo 3 mješavine lakog betona. Sve su mješavine izrađene od portland cementa i superplastifikator te se baziraju na Liapor laganom agregatu frakcije 0 – 2 mm i 4 – 8 mm. U jednoj mješavini je dodana silikatna prašina (LB3).

Rane čvrstoće betona (nakon 7 dana) se kreću od 53,33 – 57,8 Mpa, a vršnu čvrstoću postigao je beton u kojem je povećana količina cementa (LB2). Čvrstoće lakog betona nakon 28 dana variraju od 61,67 do 64,83 MPa, a vršnu čvrstoću postiže mješavina LB2.

Obzirom na konzistenciju betona, sve tri mješavine su gubile na obradljivosti. Lošoj obradljivost pripisuje se velikog upijanja Liapora, a dovodi u pitanje mogućnost ugradbe i upotrebe ovih betona. Izraziti gubitak obradljivosti pokazala je mješavina LB3, u kojoj je dodana silikatna prašina, čije čestice su znatno sitnije od čestica cementa te doprinose poboljšanju obradivosti i povećanju kohezivnosti. Međutim, povećanjem količine vode bi se izgubila stabilnost mješavine, a time bi najvjerojatnije opala i čvrstoća betona. Stoga je u budućim istraživanjima potrebno detaljnije ispitati svojstva i ponašanje lakog agregata te mogućnost upotrebe drugih dodataka koji bi svojim svojstvima nadomjestili loše strane lakog agregata Liapora.

## 6. LITERATURA

- [1] Krstulović P.: Svojstva i tehnologija betona, Građevinsko – arhitektonski fakultet sveučilišta u Splitu i Institut građevinarstva Hrvatske, Split, 2000.
- [2] Vukoje S.: Diplomski rad (tema: Laki beton visoke čvrstoće), Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije sveučilišta u Splitu, Split 2012.
- [3] Niyazi Ugur Kockal, Turan Ozturan: Strength and elastic properties of structural lightweight concretes, *Materials and Design*, 32 (2011), 2396 – 2403, 2010.
- [4] L.H. Nguyen, A.-L. Beaucour, S. Ortola, A. Noumowe: Influence of the 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.
- [5] 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.
- [6] Tehnički list za Liapor K 0 – 2
- [7] Tehnički list za Liapor F9 - 5 4 – 8
- [8] <http://www.en.wikipedia.org/wiki/Vermiculite>
- [9] <http://sl.wikipedia.org/wiki/Pucolan#mediaviewer/Slika:Pouzzolane.jpg>
- [10] <http://www.beton-test.com/galerija.html>
- [11] <http://gwalior.all.biz/concrete-foam-bgg1009404>
- [12] <http://www.hafifbetonblok.com/geneleps.html>
- [13] <http://sl.wikipedia.org/wiki/Pucolan#mediaviewer/Slika:Pouzzolane.jpg>