

# Porozni beton od laganoga agregata

---

Vlašić, Kristina

Master's thesis / Diplomski rad

2015

*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:123:618322>

*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



DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

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

# **DIPLOMSKI RAD**

**Kristina Vlašić**

**Split, 2015.**

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

**Kristina Vlašić**

Porozni beton od laganog agregata

**Diplomski rad**

**Split, 2015.**

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

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**  
KANDIDAT: Kristina Vlašić  
BROJ INDEKSA: 464  
KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**  
PREDMET: Građevinski materijali I

**ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD**

Tema: Porozni beton od laganoga agregata

Opis zadatka: Zadatak kandidatkinje je proučiti svojstva poroznoga betona, kao i dosadašnja ispitivanja na takvim vrstama betona. U eksperimentalnom dijelu rada potrebno je izraditi uzorke betona koristeći različite razrede laganoga agregata. Na raspolaganju su frakcije 1 – 8 i 4 – 8 mm ekspanzirane gline i 1 – 2 mm ekspanziranoga stakla. Svi uzorci trebaju imati istu količinu veziva i vodovezivni faktor. Na uzorcima svježega betona potrebno je ispitati konzistenciju “metodom kuglice”, a na uzorcima očvrstloga betona poroznost, propusnost, vlačnu čvrstoću metodom cijepanja te čvrstoću na pritisak. Za određivanje propusnosti betona treba koristiti dvije metode: metodu padajuće razine stupca vode i metodu stalne razine stupca vode. Eksperimentalno dobivene rezultate potrebno je prikazati i komentirati.

U Splitu 10. 03. 2015.

Voditelj Diplomskoga rada:

Izv.prof.dr.sc. Sandra Juradin

Predsjednik Povjerenstva  
za završne i diplomske ispite:  
Prof.dr.sc. Ivica Boko

## **ZAHVALA**

---

*Zahvaljujem mentorici prof. dr. sc. **Sandri Juradin** na pomoći pri izradi diplomskoga rada te svima koji su svojim savjetima, strpljenjem i podrškom pridonijeli njegovoj kvaliteti.*

*Najveće hvala mojoj obitelji na iskazanoj ljubavi, razumijevanju i podršci tijekom studiranja.*

## **Porozni beton od laganoga agregata**

### ***Sažetak:***

Porozni beton je posebna vrsta betona koja zahvaljujući maloj volumnoj koncentraciji agregata ima veliki udio šupljina. U ovom radu proučavala su se svojstva poroznoga betona izrađenoga od laganoga agregata. Izrađeno je sedam različitih mješavina. Osim laganoga agregata različitih frakcija, u neke mješavine dodani su drobljeni agregat, leteći pepeo ili granuliran staklo. Ispitana su i analizirana njihova svojstva u svježem i očvrslom stanju. U svježem stanju ispitana je konzistencija mješavina, dok je u očvrslom ispitana njihova poroznost, propusnost, te tlačna i vlačna čvrstoća.

### ***Ključne riječi:***

Porozni beton, lagani agregat, poroznost, propusnosti, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća

## **Pervious concrete made of lightweight aggregate**

### ***Abstract:***

Pervious concrete is a special type of concrete which has high total void ratio thanks to small volume concentration of aggregates. The properties of pervious concrete made of lightweight aggregate have been examined in this study. Seven different mixtures have been made. Except lightweight aggregate of different sizes, crushed aggregate, flying ashes or granulated glass have also been added to some mixtures. Their properties in fresh and hardened state have been examined and analysed. Consistency of mixtures has been examined in fresh state, while porosity, permeability, compressive and tensile strength have been examined in hardened state.

### ***Key words:***

Pervious concrete, lightweight aggregate, porosity, permeability, compressive strength, tensile strength

## SADRŽAJ

1.	UVOD .....	1
1.1.	Općenito o poroznom betonu .....	1
1.2.	Povijesni razvoj poroznoga betona .....	3
2.	AGREGAT .....	4
2.1.	Općenito o agregatu.....	4
2.2.	Proizvodnja agregata za beton.....	6
2.3.	Fizikalna svojstva agregata .....	7
2.4.	Geometrijska svojstva uzorka agregata .....	9
2.4.1.	Utjecaj zbijenosti uzorka .....	10
2.4.2.	Efekt stijenke i interferencija zrna.....	12
2.4.3.	Volumna koncentracija agregata; šupljine u betonu .....	13
2.5.	Granulometrijski sastav agregata.....	14
2.6.	Laki agregat .....	16
3.	DOSADAŠNJA ISPITIVANJA POROZNOGA BETONA.....	18
3.1.	Karakteristike cementne paste i svojstva poroznoga betona (P. Chindaprasirt, S. Hatanaka, T. Chareerat, N. Mishima, Y. Yuasa) .....	18
3.1.1.	Uvod .....	18
3.1.2.	Materijali .....	18
3.1.3.	Eksperimentalni dio istraživanja.....	19
3.1.4.	Rezultati ispitivanja .....	21
3.1.4.1.	Karakteristike cementne paste.....	21
3.1.4.2.	Svojstva poroznoga cementa .....	23
3.1.5.	Zaključak.....	25
3.2.	Veza između poroznosti i čvrstoće kod poroznoga betona .....	25
	(C. Lian, Y. Zhuge, S. Beecham).....	25
3.2.1.	Uvod .....	25
3.2.2.	Eksperimentalni dio istraživanja.....	26
3.2.3.	Postojeći modeli za cementne materijale .....	28
3.2.4.	Predloženi model.....	28
3.2.5.	Zaključak.....	31
3.3.	Procjena poroznoga betona visokih svojstava .....	31
	(M. Aamer Rafique Bhutta, K. Tsuruta, J. Mirza).....	31
3.3.1.	Uvod .....	31

3.3.2.	Eksperimentalni dio istraživanja .....	32
3.3.3.	Rezultati i rasprava .....	33
3.3.4.	Zaključak .....	37
3.4.	Eksperimentalno istraživanje o mehaničkim i hidrološkim svojstvima poroznoga betona od portland cementa (Ahmed Ibrahim, Enad Mahmoud, Mohammed Yamin, Varun Chowdary Patibandla ).....	38
3.4.1.	Uvod .....	38
3.4.2.	Eksperimentalni dio istraživanja .....	38
3.4.3.	Rezultati i rasprava .....	40
3.4.4.	Statistička analiza rezultata .....	43
3.4.5.	Sažetak i zaključak .....	45
4.	EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA SVOJTAVA POROZNOGA BETONA.....	46
4.1.	Uvod u eksperimentalni dio rada .....	46
4.2.	Upotrijebljeni materijali .....	47
4.2.1.	Cement .....	48
4.2.2.	Lagani agregat liapor F9.5 .....	49
4.2.3.	Lagani agregat liapor HD .....	52
4.2.4.	Drobljeni agregat frakcije 4-8 mm.....	53
4.2.5.	Granulirano staklo Liaver.....	54
4.2.6.	Leteći pepeo .....	56
4.2.7.	Voda.....	57
4.3.	Izrada mješavina poroznoga betona .....	58
4.3.1.	Mješavina K1 .....	59
4.3.2.	Mješavina K2 .....	60
4.3.3.	Mješavina K3 .....	61
4.3.4.	Mješavina K4 .....	62
4.3.5.	Mješavina K5 .....	63
4.3.6.	Mješavina K6 .....	64
4.3.7.	Mješavina K7 .....	65
4.4.	Metode ispitivanja poroznog betona .....	66
4.4.1.	Ispitivanje konzistencije .....	66
4.4.2.	Ispitivanje poroznosti .....	67
4.4.3.	Ispitivanje propusnosti .....	68
4.4.3.1.	Metoda stalne razine stupca vode .....	69
4.4.3.2.	Metoda padajuće razine stupca vode .....	70



4.4.4.	Mjerenje tlačne čvrstoće .....	71
4.4.5.	Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem .....	73
4.5.	Rezultati i analiza rezultata ispitivanja .....	74
4.5.1.	Ispitivanje konzistencije .....	74
4.5.2.	Poroznost uzoraka .....	78
4.5.3.	Koeficijent propusnosti .....	83
4.5.4.	Tlačna čvrstoća .....	85
4.5.5.	Vlačna čvrstoća.....	88
4.5.6.	Veza između poroznosti i tlačne čvrstoće .....	89
4.5.7.	Veza između propusnosti i poroznosti .....	90
4.5.8.	Veza između tlačne i vlačne čvrstoće .....	91
5.	ZAKLJUČAK.....	91
	LITERATURA:.....	94

# 1. UVOD

## 1.1. Općenito o poroznom betonu

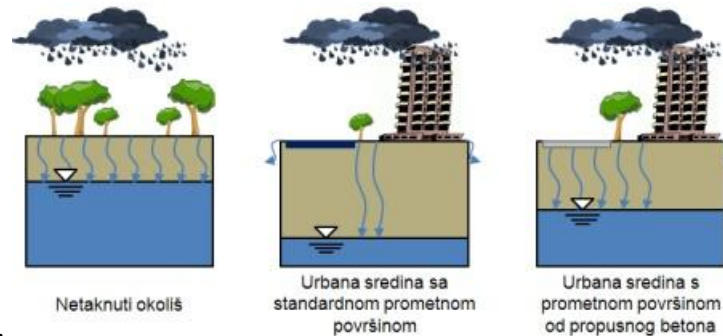
Beton je građevinski materijal koji nastaje miješanjem cementa, agregata (šljunka i pijeska), vode i dodataka. Procijenjena je godišnja potrošnja između 21 i 31 biliona tona betona širom svijeta i stoga beton po svojoj potrošnji zauzima mjesto odmah iza vode. Razloge tako široke upotrebe betona pronalazimo u dostupnosti rastresitih materijala koji su i relativno jeftiniji u odnosu na druge materijale. Širokoj upotrebi betona doprinose i same karakteristike materijala (npr. trajnost i otpornost) kao i činjenica da beton kao građevinski materijal zadovoljava visoke tehničke uz relativno niske tehnološke zahtjeve. Međutim, beton također ima i neka ograničenja pa nije moguća njihova primjena u svim situacijama. Iz tog razloga danas su sve više u upotrebi posebni betoni izrađeni posebnim načinima ugradnje i recepturama s dodatkom aditiva kako bi se postigla svojstva koja zadovoljavaju neuobičajene primjene ili neke posebne okolnosti.

Porozni beton je jedan od takvih betona. Uglavnom se sastoji od portland cementa, jedne frakcije agregata i vode. Svoj naziv porozni beton duguje velikom udjelu pora koji je posljedica potpunoga izostanka ili tek male prisutnosti sitnih čestica agregata u njegovom sastavu, odnosno zbog male volumne koncentracije agregata zbog čega u betonu ostaje puno šupljina. [1] Rezultat takvoga sastava je veća količina pora u rasponu od 15-35% volumena.



**Slika 1.1.** Porozni beton [2]

Takav sastav omogućuje povećano propuštanje vode pa se kod kolnika izgrađenoga takvim betonom smanjuje potreba za izgradnjom sustava za odvodnju, održava se razina podzemnih voda i smanjuje štetni utjecaj oborinskih voda na ekosustav. Također se smanjuju buka i zagrijavanje, olakšava se pročišćavanje vode te se obnavlja dinamička zaliha vode u gradovima.



**Slika 1.2.** Utjecaj propusnoga betona na razinu podzemnih voda [3]

Osim navedenih prednosti, veliki udio pora odgovoran je i za najveći nedostatak poroznoga betona, njegovu smanjenu čvrstoću, pa se tlačna čvrstoća kod poroznih betona kreće u rasponu od 20-30 MPa. Zbog navedenih karakteristika porozni beton može se koristiti samo kod laganoga prometnog opterećenja, pa je posebno pogodan za izgradnju parkirališta, nogostupa i biciklističkih staza, kao i za izgradnju rubnih slivnika te bankina. Osim toga, niska tlačna čvrstoća utječe na stabilnost i trajnost konstrukcija zbog niske otpornosti na kemikalije, habanje i cikličko zamrzavanje - odmrzavanje. Prikladno odabranim agregatom, dodatkom finoga agregata i organskih primjesa, ovi nedostaci mogu se znatno poboljšati.



**Slika 1.3.** Usporedba vodopropusnosti površina od propusnoga betona i asfalta [3]

Zbog brojnih prednosti u zaštiti okoliša došlo je do porasta uporabe poroznoga betona u proteklih nekoliko godina.

## **1.2. Povijesni razvoj poroznoga betona**

Prva upotreba poroznoga betona bila je u Ujedinjenom Kraljevstvu 1852. godine za izgradnju dviju stambenih kuća i morske brane. Prvotni razlog njegove upotrebe bila je ekonomska isplativost, zahvaljujući ograničenoj upotrebi cementa. Tek nakon 1923. godine započinje upotreba površina od poroznoga betona kao održiv način gradnje i ovaj put njegova upotreba bila je ograničena na područje Škotske, Liverpoola, Londona i Manchestera [4].

Upotreba poroznoga betona u Europi započela je nakon Drugoga svjetskog rata. Naime, razaranja Drugoga svjetskog rata ostavila su Europu u velikim stambenim potrebama što je potaknulo razvoj novih ili prethodno neiskorištenih metoda građenja. Među tim metodama bio je i porozni beton. Njemačka se koristila metodom proizvodnje takvoga betona zbog nestašice materijala i zbrinjavanja velike količine građevinskoga otpada (cigle, šuta). Tako je počelo istraživanje svojstava poroznoga betona. U razvijenim zemljama, kao što su SAD i Japan, tek je 1980-ih godine počelo istraživanje i upotreba poroznoga betona kao površina za parkirališta i manje cestovne trake.

Od 2008. godine razvija se pet probnih standardnih testova koji uključuju:

- gustoću svježega betona i sadržaj pora
- tlačnu čvrstoću
- čvrstoću na savijanje
- propusnost
- gustoću očvrstnuloga betona i poroznost. [5]

## 2. AGREGAT

### 2.1. Općenito o agregatu

Agregat čini približno tri četvrtine volumena betona pa je razumljiv njegov veliki utjecaj na svojstva svježega i očvrslog betona. U tablici 2.1. prikazano je koja svojstva agregata utječu na pojedina svojstva betona.

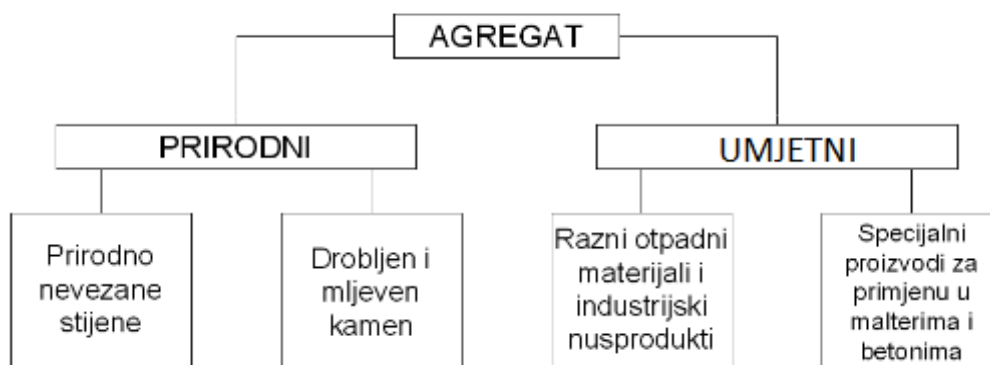
**Tablica 2.1.** Utjecaj svojstava agregata na svojstva betona

Svojstva betona	Relevantna svojstva agregata
Trajnost: - Otpornost na mraz  - Otpornost na sušenje i vlaženje  - Otpornost na povišene temperature - Erozijska otpornost - Alkalnoagregatne reakcije	Postojanost, poroznost, struktura pora, propusnost, stupanj saturacije, vlačna čvrstoća, tekstura i struktura, muljevitost i glinene čestice Struktura pora Modul elastičnosti Termički koeficijent ekspanzije Tvrdoća Mineraloško - petrografski sastav
Čvrstoća	Čvrstoća Tekstura Čistoća Oblik zrna i maksimalno zrno
Skupljanje	Modul elastičnosti Oblik zrna Granulometrijski sastav, čistoća Maksimalno zrno Muljevitost i glinene čestice
Termički koeficijent ekspanzije	Termički koeficijent ekspanzije Modul elastičnosti
Termička vodljivost	Termička vodljivost
Specifični toplinski kapacitet	Specifični toplinski kapacitet
Volumna težina	Gustoća, oblik zrna Granulometrijski sastav Maksimalno zrno
Modul elastičnosti	Modul elastičnosti Poissonov koeficijent
Klizavost	Tendencija poliranju
Ekonomičnost	Oblik zrna Granulometrijski sastav Maksimalno zrno Potreban opseg prerade Raspoloživ izbor agregata

Prema podrijetlu agregate dijelimo na prirodne i umjetne. Postoje dva načina za proizvodnju prirodnih agregata:

- 1) iz vučenoga nanosa koji se formira procesima erozije raznih vrsta stijena i
- 2) drobljenjem iz velikih komada prirodnih stijena,

pa tako većina svojstava agregata ovisi upravo o svojstvima izvorne stijene kao i o postupku usitnjavanja. Umjetni agregati uglavnom se proizvode za neku posebnu namjenu kao što je npr. lakoagregatni beton. Ti agregati nastaju od ekspanzirane i pečene gline ili škrljca, perlita i vermikulita, dok prirodni laki agregat nastaje naglim skrućivanjem lave. Neki umjetni agregati također mogu nastati i od otpadnih proizvoda ili od sekundarne sirovine u industriji kao što je grubi pepeo termoelektrana, ekspanzirana zgura, pluto i drobljena opeka. Za proizvodnju lakih betona upotrebljavaju se i ekspanzirani polimeri kao polistiren i poliuretan.[6]



**Slika 2.1.** Shematski prikaz podjele agregata[7]

Što se tiče veličine zrna, bitno je naglasiti da razlikujemo dvije vrste agregata. Naime, zrna sitnija od 4 mm manje su sklona segregaciji te je od agregata veličine zrna od 0-4 mm moguće formirati relativno homogenu hrpu. Zrna različite veličine, krupnija od 4 mm, izrazito se segregiraju, te je hrpa nehomogena. To je jedan od glavnih razloga podjele agregata na dvije osnovne vrste:

- 1) sitni agregat, zrna sitnija od 4 mm i
- 2) krupni agregat, zrna krupnija od 4 mm.[8]

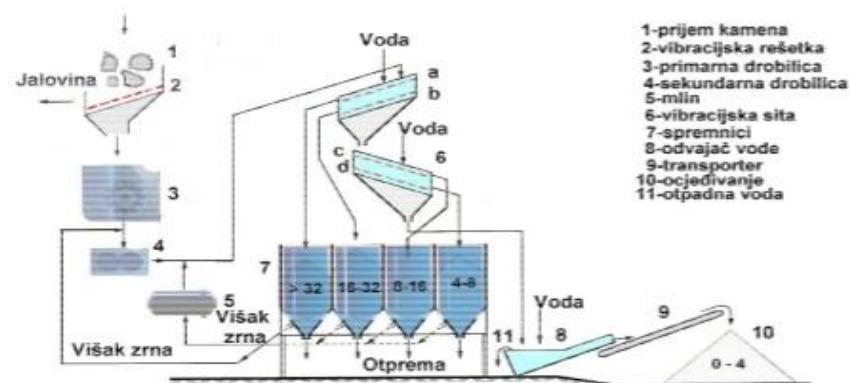
Raspodjelu veličine zrna u ukupnom sastavu naziva se granulometrijskim sastavom, a uobičajene nazivne frakcije u proizvodnji agregata su:

- 0 - 4 mm (0 - 1 i 1 - 4 ili 0 - 2 i 2 - 4)
- 4 - 8 mm
- 8 - 16 mm
- 16 - 32 mm
- 32 - 63 mm
- 63 - 125 mm [6]

## 2.2. Proizvodnja agregata za beton

Kao što je već navedeno, agregat može biti proizveden frakcioniranjem prirodnoga kamena ili drobljenjem kamena i frakcioniranjem. Ovaj drugi slučaj obuhvaća četiri tipične faze proizvodnje, a to su:

- 1) predsijanje
- 2) drobljenje i mljevenje
- 3) sijanje
- 4) hidrosepariranje.



**Slika 2.2.** Shema proizvodnje agregata [9]

U prvoj fazi proizvodnje agregata vrši se predsijanje kako bi se izdvojio jalovinom onečišćen materijal i najkrupniji komadi koji bi mogli opteretiti sita i drobilice. Nakon toga slijedi grubo drobljenje koje se obično vrši čeljusnom drobilicom, zatim usitnjavanje udarnom drobilicom ili čekićarom, a najsitnije frakcije u mlinovima. U slučaju eventualnih viškova pojedinih krupnih frakcija, moguće je vraćanje u ovu fazu kako bi se pozajmište što bolje

iskoristilo. Sljedeća faza je sijanje u kojem se šljunak, odnosno drobljena stijena, razdvajaju u frakcije. Često se drobljeni materijal sije u suho uz otprašivanje, ali sijanje uz istovremeno pranje vodom je učinkovitije ako se žele ukloniti najsitnije čestice. Sijanje se najčešće vrši na vibracijskim sitima od čeličnih mreža, i to do veličine zrna od 4 mm. Posljednja faza proizvodnje agregata je hidrosepariranje koje se primjenjuje kako bi se razdvojile sitnije frakcije pijeska. Postoji više vrsta ovakvoga načina prosijavanja, a sve se zasnivaju na principu različite brzine taloženja zrnaca pijeska različite veličine u struji vode.[6]

### 2.3.Fizikalna svojstva agregata

Mnoge definicije svojstava materijala iz elementarne fizike relevantne su za agregat, odnosno agregat u betonu.

Jedna od njih je gustoća zrna agregata. Zbog različite količine zatvorenih i otvorenih pora u agregatu, definicija za gustoću tvari pojavljuje se u više oblika i značenja pa je bitno razlikovati sljedeće:

- 1) Gustoća zrna agregata definira se kao masa osušenoga zrna agregata u volumenu zrna agregata bez pora.
- 2) Prividna gustoća agregata je masa osušenoga zrna agregata u volumenu zrna agregata sa zatvorenim porama, odnosno volumenu vodom zasićenih zrna agregata.
- 3) Volumna masa zasićenoga, površinski suhog zrna agregata (ZPS), je masa ZPS zrna agregata u ukupnom volumenu zrna agregata zajedno s porama.
- 4) Volumna masa zrna agregata je masa osušenoga zrna agregata u ukupnom volumenu zrna agregata zajedno s porama.[6]

Osim gustoće, poroznost i apsorpcija vode također su svojstva koja su bitna za agregat u betonu. Ta svojstva utječu na prionjivost cementnoga kamena i agregata u betonu, otpornost betona na djelovanje mraza, kemijsku i erozijsku otpornost betona, kao i na gustoću, odnosno zapreminsku masu agregata, te je važno da ih se obuhvati pri projektiranju sastava betona.[9] U agregatu se pojavljuju pore raznih veličina i upravo su one bitne za svojstva propusnosti betona. Osim količine pora, bitna je i njihova povezanost.



S obzirom na količinu vlage u agregatu, razlikujemo četiri stanja agregata:

- 1) potpuno suh agregat
- 2) prirodno suh agregat
- 3) zasićen, površinski suh agregat
- 4) vlažan agregat.

Vlažnost agregata bitna je pri izradi mješavine za beton pa se na temelju podataka o vlažnosti korigiraju mase prije izrade betona.

Još je bitno znati da masa agregata u nekoj posudi zavisi o gustoći, odnosno volumenu mase zrna agregata, ali i o količini šupljina između zrna agregata. Količina šupljina ovisi pak o granulometrijskom sastavu, obliku i teksturi zrna, te stupnju zbijenosti. Ispituje se šupljikavost u nasutom i zbijenom agregatu. Šupljikavost agregata definira se kao:

$$\text{š} = 100 \cdot (\rho_{zps} - \rho_s) (\%, \text{volumno})$$

gdje je  $\rho_s$  volumna masa nasutoga, odnosno zbijenoga agregata.

Ako su zrna agregata kontinuirano promjenjivoga promjera, šupljikavost je manja. Međutim, nepravilni oblik zrna i hrapavost površine agregata utječu tako da se šupljikavost povećava.

Volumna masa agregata u zbijenom stanju obično je od 1.1 do 1.5 t/m<sup>3</sup>. Omjer između nasute i zbijene volumne mase agregata je 0.87 do 0.96. Upravo zato nasipna volumna masa agregata može biti slična kao i nasipna volumna masa cementa približno 1 t/m<sup>3</sup>. [6]

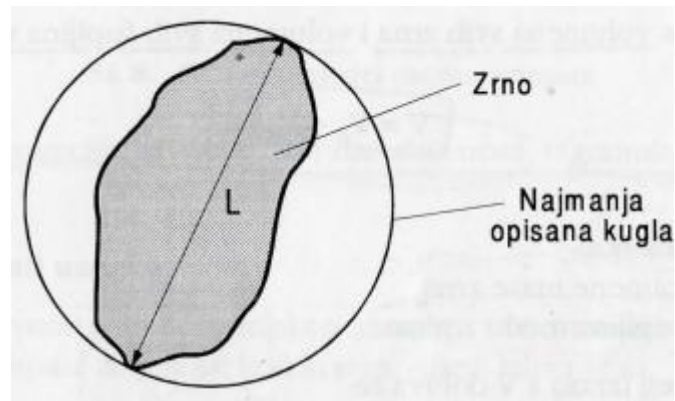
Povećanje volumena pijeska, kao posljedica razmicanja zrna pijeska djelovanjem sloja adsorbirane vode, također može utjecati na zapreminsku masu nasutoga agregata. Na taj način se povećava udio šupljina, a efekat ove pojave raste što je pijesak sitniji. [6]

Oblik zrna i njegova tekstura važna su svojstva agregata. Idealan oblik zrna agregata bio bi kugla jer ona daje minimalnu površinu zrna koju treba obaviti cementna pasta. Osim toga, kuglasti oblik pruža i najmanji otpor pri obradi betona pa bi beton s takvim agregatom imao jako dobru obradljivost. Upravo iz navedenih razloga odstupanje od kugle se koristi kao mjera za definiranje oblika zrna. U tehnologiji betona oblik zrna definira se pomoću volumnoga koeficijenta oblika zrna po Faury - ju.

Za jedno zrno volumni koeficijent iznosi:

$$c = \frac{V_{st}}{V_k},$$

gdje je  $V_{st}$  stvarni volumen zrna, a  $V_k$  volumen najmanje opisane kugle oko zrna.[8]



**Slika 2.3.** Definicija volumnoga koeficijenta [8]

Volumni koeficijent oblika zrna agregata za beton mora biti veći od 0.15 za drobljeni agregat, odnosno veći od 0.18 za prirodni agregat. Beton, koji ne zadovoljava ove uvjete, ima nepovoljnu obradivost i kod njega ne bi bilo izvedivo zbijanje suvremenim sredstvima za zbijanje.

## 2.4. Geometrijska svojstva uzorka agregata

Slobodno nasuti ili zbijeni agregat zauzima određeni prostor. Jedan dio tog prostora ispunjava kamena masa zrna, a drugi dio čine šupljine među zrnima. Međusobni odnos volumena svih zrna i volumena svih šupljina u uzorku definira se na sljedeći način:

$$V = V_a + V_{\text{š}},$$

gdje je:

$V$  - volumen uzorka,

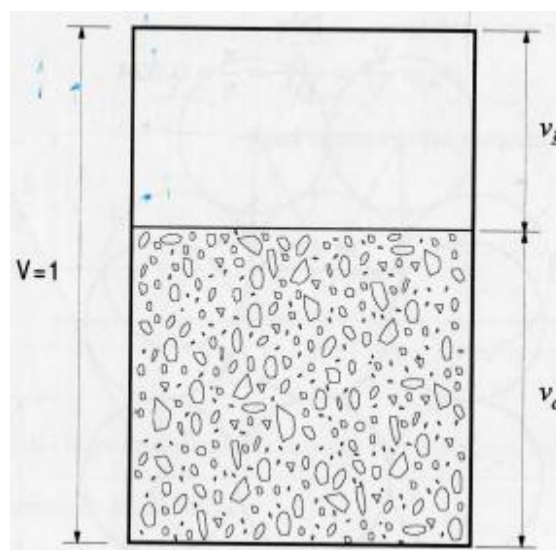
$V_a$  - volumen kamene mase zrna

$V_s$ - volumen šupljina među zrnima.

Dijeljenjem gornjeg izraza s  $V$  dobiva se :

$$\frac{V_a}{V} + \frac{V_s}{V} = 1 \quad \text{ili} \quad v_a + v_s = 1.$$

Parametar  $v_a$  naziva se volumna koncentracija agregata, a parametar  $v_s$  volumna koncentracija šupljina. Parametri koncentracije ovise o stupnju zbijenosti i granulometrijskom sastavu uzorka.[8]



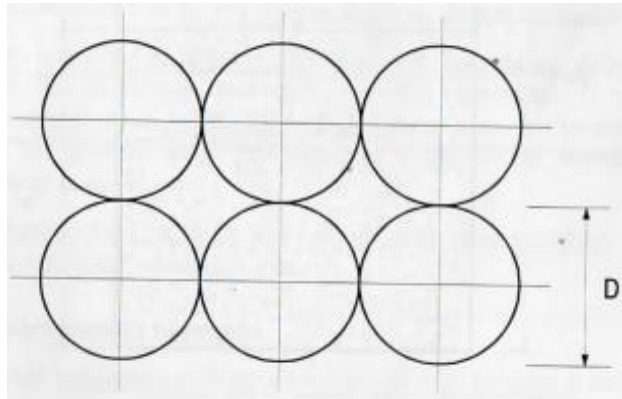
**Slika 2.4.** Prostorni model uzorka agregata[8]

### 2.4.1. Utjecaj zbijenosti uzorka

Zbijanjem slobodno nasutoga uzorka povećava se koncentracija agregata. Pri zbijanju je potrebno primijeniti dovoljno veliku silu i energiju da bi se svladali otpori trenja na kontaktima zrna. Povećanje koncentracije agregata traje dok se ne postigne maksimalna volumna koncentracija agregata, što je konstanta uzorka.

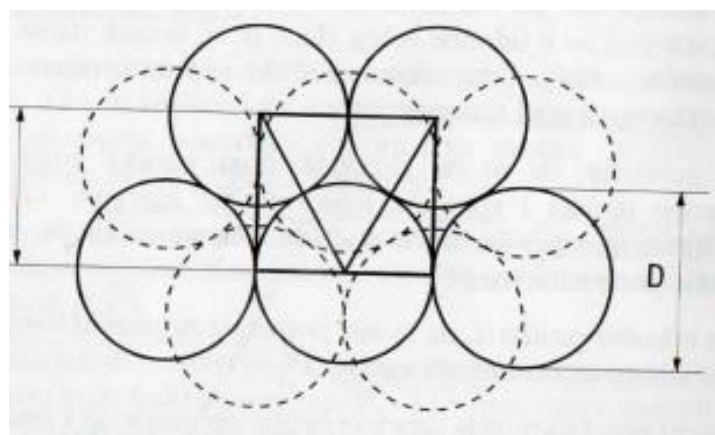
Agregatni skelet tako zbijenoga uzorka je stabilan, jer je za ponovno razmicanje zrna potrebno upotrijebiti dovoljno veliku silu. Ta sila i odgovarajuća energija u pravilu su jednaki kao i kod zbijanja uzorka do maksimalne koncentracije agregata. Pri svakoj manjoj zbijenosti, agregatni skelet je nestabilan, jer je za pomicanje zrna potrebna znatno manja sila.

Na slici 2.5. prikazan je jedan od načina slaganja kugli. Ovakva prostorna rešetka lako se deformira pod utjecajem vanjske sile. Ako se potisne samo jedan sloj kugli, te se kugle otkotrljaju u udoline nižega sloja. Isti poremećaj proširi se na sve ostale slojeve te se kugle cijeloga uzorka slože u manji volumen. Stoga se volumna koncentracija kugli poveća, a volumna koncentracija šupljina smanji. [8]



**Slika 2.5.** Sustav s najmanjom volumnom koncentracijom kugli [8]

Maksimalna koncentracija kugli nastaje ako se slože prema slici 2.6. Kugle višega sloja označene su crtkano. Da bi se pomakla jedna kugla, potrebno je razbiti cijelu prostornu rešetku, tj. pomaknuti sve kugle u uzorku. Pri tome dolazi do povećanja volumena cijeloga uzorka, što rezultira smanjenjem volumne koncentracije kugli. [8]



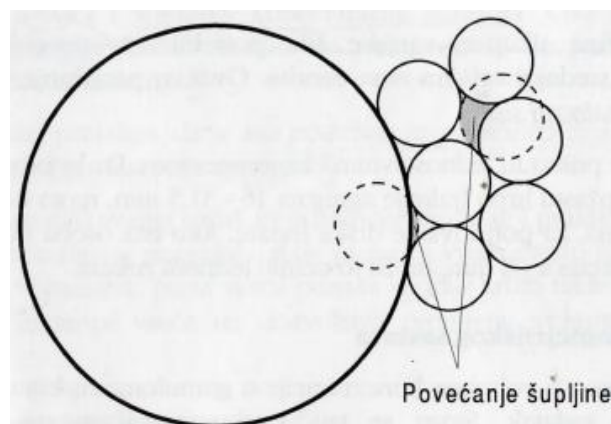
**Slika 2.6.** Sustav kugli s najmanjom volumnom koncentracijom šupljina [8]

### 2.4.2. Efekt stijenke i interferencija zrna

Izučavanje zavisnosti volumne koncentracije o granulometrijskom sastavu agregata ograničava se na mješavinu dvije komponente agregata, pri čemu se svaka komponenta najčešće sastoji samo od jednoga razreda zrna. Komponente se definiraju na sljedeći način:

- Sitna komponenta sastoji se od jednoga razreda sitnijih zrna.
- Krupna komponenta sastoji se od jednog razreda krupnijih zrna.

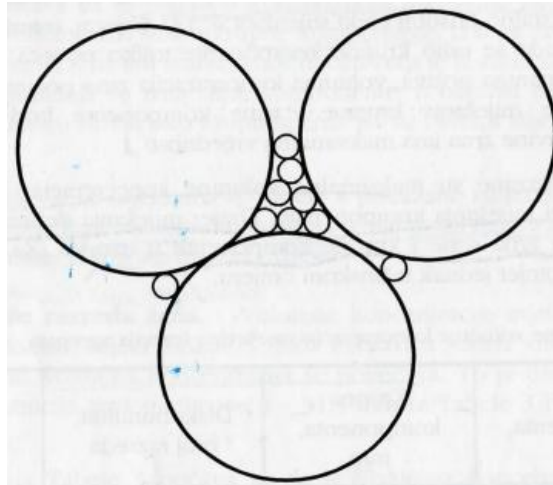
Ako se u uzorak sitne komponente umetne mali broj zrna krupne komponente, volumen krute tvari u uzorku mora se povećati, jer je određeni volumen sitne komponente sa šupljinama zauzelo krupno zrno bez šupljina. Međutim, oblik površine krupnoga zrna diktira raspored susjednih sitnih zrna. Šupljina između dva sitna zrna i krupnog zrna je veća nego između tri sitna zrna koja se međusobno dodiruju. Osim toga, u drugom redu sitnih zrna, sve skupine od po tri zrna ne mogu se međusobno dodirivati pa je na takvom mjestu šupljina veća. Ove pojave nazivaju se efekt stijenke.[8]



**Slika 2.7.** Efekt stijenke[8]

Dakle, umetanjem krupnih zrna u sitnu komponentu povećava se volumna koncentracija mješavine, ali je to povećanje smanjeno zbog efekta stijenke. To smanjenje je tim veće, čim ima više krupnih zrna u mješavini.

Ako se u šupljine između zrna krupne komponente smjeste sitna zrna koja su manja nego šupljine, volumen krute tvari u uzorku se povećava, a time i volumna koncentracija agregata. Zbog toga se u zadani volumen može smjestiti manji broj krupnih zrna nego što bi to bilo moguće bez umetanja zrna. Ova pojava naziva se interferencija zrna.[8]



**Slika 2.8.** Interferencija zrna[8]

Dakle, umetanjem sitnih zrna u krupnu komponentu povećava se volumna koncentracija mješavine, ali je to povećanje smanjeno zbog interferencije zrna. To smanjenje je tim veće, čim ima više sitnih zrna u mješavini.[8]

#### **2.4.3. Volumna koncentracija agregata; šupljine u betonu**

Jedna normalna frakcija kamenoga agregata, primjerice 4 - 8 mm ima volumnu koncentraciju agregata 0,55 - 0,60. Zbog tako male volumne koncentracije agregata, u gotovom betonu ostaje mnogo šupljina.[8] Upravo to je temelj za izradu poroznoga betona. Ako se za pripremu betona upotrijebi više od jedna frakcija agregata, povećava se volumna koncentracija agregata, a sadržaj pora se smanjuje. [8]

**Tablica 2.2.** Volumne koncentracije frakcija agregata [8]

Frakcija, mm	Broj razreda	Volumna koncentracija, $v_a$
0.125-0.25	1	0.56
0.5-1	1	0.56
1-2	1	0.57
4-8	1	0.57
4-31.5	3	0.62
0.125-4	5	0.69
0.125-8	6	0.73

U donjem dijelu tablice 2.2. prikazane su volumne koncentracije mješavina više razreda. Ako mješavina sadrži više od dva susjedna razreda, njena volumna koncentracija se povećava, a sadržaj šupljina se smanjuje.

U tablici 2.3. prikazane su maksimalne volumne koncentracije mješavine zrna i odgovarajući omjeri miješanja komponenti. Vidljivo je da je volumna koncentracija zrna  $v_a$ , tim veća, što je veća razlika u veličini zrna sitne i krupne komponente.[8]

**Tablica 2.3.** Maksimalne volumne koncentracije mješavina frakcija agregata [8]

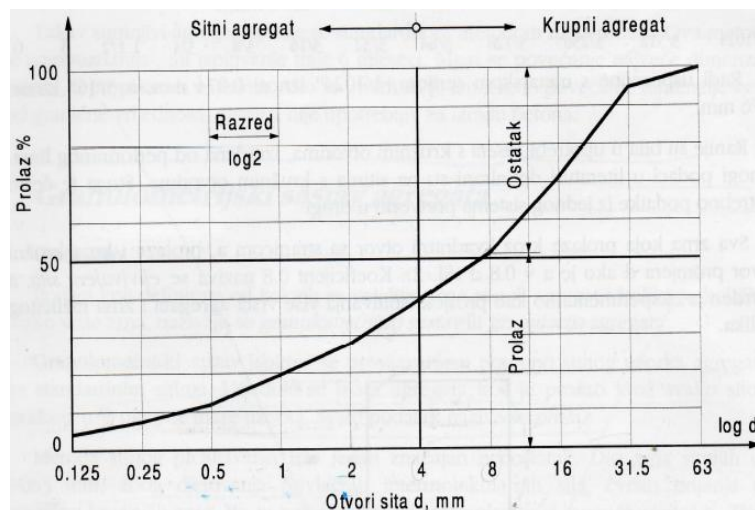
Red. br.	Sitna komponenta, mm	Krupna komponenta, mm	Diskontinuitet, broj razreda	1:x	$v_a$
1	0.125-0.25	0.25-0.5	0	1:1.41	0.60
2	0.125-0.25	0.5-1	1	1:1.51	0.66
3	0.125-0.25	1-2	2	1:1.65	0.71
4	0.125-0.25	4-8	4	1:2.10	0.78

## 2.5. Granulometrijski sastav agregata

Podaci koji definiraju od kakvih se veličina zrna sastoji agregat i kolika je količina svake vrste zrna, nazivaju se granulometrijski sastav ili granulacija agregata. Granulometrijski sastav ispituje se prosijavanjem potpuno suhoga uzorka agregata, na standardnim sitima. Utvrđuje se masa agregata koji je prošao kroz svako sito i izražava u % ukupne mase uzorka. [8]

Osim prosijavanja suhog agregata, moguće je i prosijavanje uz pranje mlazom vode. Kod suhog pranja događa se da se sitnija zrna zalijepe za krupnija zrna, a prosijavanjem uz pranje to izbjegavamo. Ipak, unatoč tome, ova metoda još nije prihvaćena kao standardna.

Rezultati ispitivanja granulometrijskoga sastava prikazuju se u dijagramima u kojima se prolaz kroz sito nanosi na ordinatu, a veličina otvora na apscisu. Pri tome je na apscisi logaritamsko mjerilo kako bi preglednost bila što bolja.



**Slika 2.7.** Granulometrijska krivulja agregata[8]

Svaki agregat nema granulometrijski sastav povoljan za izradu betona. Osim toga, agregat koji u sebi sadrži zrna različitih veličina, sklon je segregaciji. Da bi se uklonili ti nedostaci, agregat se, po veličini zrna, razdvaja u više dijelova. Dio agregata, koji sadrži zrna određenih veličina, naziva se frakcija. Granice razdvajanja odabiru se tako da frakcija sadrži samo onoliko različitih veličina zrna da je segregacija smanjena na prihvatljivu mjeru. Frakcioniranje se, u pravilu, vrši uz pranje, a kod drobljenoga agregata često i bez pranja.

Najčešće se agregat razdvaja u sljedeće frakcije:

0 - 4 mm	0 - 2 mm	0 - 1 mm
4 - 8 mm	2 - 8 mm	1 - 4 mm
8 - 16 mm	8 - 16 mm	4 - 16 mm
16 - 31.5 mm		
31.5 - 63 mm		
63 - 125 mm		

Frakcija 0 - 4 mm je često nepovoljnoga sastava pa ju je potrebno razdvojiti na dvije frakcije. [8]

Granulometrijski sastav agregata je glavni činitelj koji utječe na količinu zahvaćenoga zraka u betonu, a time i na obradljivost betona. Osim toga, na obradljivost betona utječu i:



- 1) specifična površina agregata
- 2) relativni volumen koji zauzima agregat u betonu
- 3) problemi segregacije krupnijih zrna agregata
- 4) ukupna količina sitnih čestica u mješavini.

Specifična površina agregata, tj. omjer površine i volumena agregata, to je veća što je više sitnijega agregata i što je manje maksimalno zrno agregata. [6] Iz svega navedenog lako je zaključiti da veća specifična površina agregata utječe na bolju obradljivost betona. Osim toga, poželjno je da relativni volumen agregata u betonu bude što veći, jer je jeftiniji od cementne paste. Međutim, ako bi minimum šupljina u agregatu bio jedini kriterij za izbor granulometrijskog sastava, onda bi takav beton bio teško obradiv. Dobar granulometrijski sastav ne segregira, a to znači da se mort ne izdvaja iz šupljina između krupnijih zrna agregata, niti se krupnija zrna odvajaju iz mase betona. Četvrti važni čimbenik koji određuje obradljivost betona je ukupna količina sitnih čestica, a ona ovisi o maksimalnom zrnu agregata. [6]

## 2.6. Laki agregat

Lagani agregat je vrsta gruboga agregata koji se koristi u proizvodnji laganih betonskih proizvoda kao što su betonski blokovi, pločnici i slično. Materijali za proizvodnju lakog agregata su:

- plovučac
- vulkanska zgura
- tufovi
- sedra
- opeka i drugi slični otpadni materijali.[8]

Pri proizvodnji laganoga agregata sve sirovine, osim plavca, dvostruko povećaju svoj volumen. Takav ekspanzirani materijal ima svojstva slična prirodnom agregatu, no njegova gustoća je manja pa su stoga proizvodi od takvog materijala znatno lakši.



**Slika 2.8.** Lagani agregat od ekspanzirane gline[10]

Proizvodnja laganoga agregata započinje vađenjem sirovina koje se dalje drobe u konusnim, udarnim ili čeljusnim drobilicama, a zatim se prosijavaju. Preveliki komadi materijala vraćaju se natrag u drobilice, a prosijani materijal se prebacuje u spremnike. Iz spremnika se materijal prebacuje u rotacijske peći pri temperaturi od 1200°C. Grijanjem se materijal tali te ugljikovi spojevi stvaraju mjehuriće koji ekspanziraju, a u samom procesu oslobađaju se hlapivi organski spojevi. Posljednja faza proizvodnje laganoga agregata je hlađenje zrakom u hladnjacima nakon čega se skladišti spreman za isporuku.[11]

Lagani agregat je obično klasificiran u četiri skupine:

- 1) lagani agregat od prirodnoga materijala
- 2) proizvedeni strukturalni lagani agregat,
- 3) lagani agregat od nusproizvoda
- 4) proizvedeni ultralagani izolacijski agregat.

Većina laganih agregata proizvodi beton gustoće od 1,575 kg/m<sup>3</sup> do 2,0 kg/m<sup>3</sup>. Osim toga, od njega se može proizvesti izolacijski beton jako male težine. Poželjna svojstva materijala, koji se koriste kao lagani agregat, ovise o krajnjoj svrsi, ali uglavnom su:

- 1) mala težina
- 2) čvrstoća
- 3) termička i akustička svojstva
- 4) visoka otpornost na požar.[12]

### 3. DOSADAŠNJA ISPITIVANJA POROZNOGA BETONA

#### 3.1. Karakteristike cementne paste i svojstva poroznoga betona (P. Chindaprasirt, S. Hatanaka, T. Chareerat, N. Mishima, Y. Yuasa)

##### 3.1.1. Uvod

Iako su osnovne informacije, uključujući utjecaj udjela šupljina, vodocementni faktor, karakteristike cementne paste, volumni udio i veličina gruboga agregata, te čvrstoća poroznoga betona već proučavane, još uvijek nisu utvrđeni optimalni uvjeti za proizvodnju poroznoga betona, pa se ova studija upravo tim i bavi. Potrebno je projektirati odgovarajuću mješavinu, način miješanja i kompaktnost koji bi osigurali porozni beton s najvećom čvrstoćom i trajnosti uz zahtijevani udio šupljina. Kako bi postigli potrebnu količinu šupljina, ali i zadovoljavajuću čvrstoću, potrebno je osigurati neprekidnost cementne paste i gruboga agregata kako bi se sačuvale šupljine. Ovo se može postići upotrebom cementne paste s relativno niskim vodocementnim faktorom i dovoljno visokom obradivošću, a pri tome je moguće poboljšati teksturu i svojstva cementne paste dovoljnim vremenom miješanja i ispravnim načinom miješanja. Poznavanje reologije cementne paste stoga je temeljni zahtjev za pripravu poroznoga betona.

##### 3.1.2. Materijali

Materijali korišteni u ovom ispitivanju su:

- obični portland cement tipa 1 sa specifičnom težinom 3, 17 i specifičnom površinom po Blainu  $3150 \text{ cm}^2/\text{g}$
- drobljeni vapnenac frakcije od 5 - 13 mm sa specifičnom težinom 2, 70 i udjelom šupljina 42, 6%
- sredstvo za redukciju vode (WR) čiji je udio 0, 25% težine cementa

- plastifikator tipa F (SP) čiji je udio 0, 5% i 1, 0% težine cementa

### 3.1.3. Eksperimentalni dio istraživanja

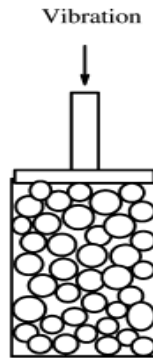
U tablici ispod prikazane su mješavine s različitim udjelima dodataka (0%, 0.25% WR, 0.5% SP, 1.0% SP), udjelom šupljina (15%, 20%, 25%) i tečenjem paste (150 mm, 190 mm, 230 mm) koje su napravljene u ovom ispitivanju.

**Tablica 3.1.** Sastav mješavina [13]

Series	Mixes	Void ratio (%)	Paste/aggregate volume ratio	W/C (%)	Water (kg/m <sup>3</sup> )	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Paste flow (±3mm)
Series N (0% admixture)	N15F1	15	0.466	28,1	126	449	150
	N15F2			31,1	133	427	190
	N15F3			34,1	139	400	230
	N20F1	20	0.382	28,1	103	368	150
	N20F2			31,1	109	350	190
	N20F3			34,1	114	334	230
	N25F1	25	0.297	28,1	80	286	150
	N25F2			31,1	85	273	190
	N25F3			34,1	89	260	230
Series R (0.25% WR)	R15F1	15	0.466	26,3	122	463	150
	R15F2			31,0	133	428	190
	R15F3			35,7	142	398	230
	R20F1	20	0.382	26,3	100	379	150
	R20F2			31,0	109	350	190
	R20F3			35,7	116	326	230
	R25F1	25	0.297	26,3	78	295	150
	R25F2			31,0	85	273	190
	R25F3			35,7	91	254	230
Series S (0.5% SP)	S15F1	15	0.466	23,6	115	485	150
	S15F2			25,3	119	471	190
	S15F3			26,9	123	458	230
	S20F1	20	0.382	23,6	94	398	150
	S20F2			25,3	98	386	190
	S20F3			26,9	101	375	230
	S25F1	25	0.297	23,6	73	310	150
	S25F2			25,3	76	300	190
	S25F3			26,9	79	292	230
Series P (1.0% SP)	P15F1	15	0.466	21,1	107	509	150
	P15F2			22,0	110	500	190
	P15F3			23,9	115	483	230
	P20F1	20	0.382	21,1	88	416	150
	P20F2			22,0	90	409	190
	P20F3			23,9	94	395	230
	P25F1	25	0.297	21,1	68	324	150
	P25F2			22,0	70	319	190
	P25F3			23,9	74	308	230

Note: Aggregate content=1550kg/m<sup>3</sup>

Cementa pasta je prvih 30 sekundi miješana brzinom od 50 okretaja/minuti, a zatim 240 sekundi brzinom 200 okretaja/minuti nakon čega je dodan grubi agregat i miješanje nastavljeno istom brzinom još 90 sekundi. Mješavina se zatim izlijeva u kalup oblika valjka, dimenzija 100x200 mm te se površinskim vibratorom 10 sekundi vibrira gornja površina.



**Slika 3.1.** Površinska vibracija poroznoga betona[13]

Nakon izrade mješavine vrši se ispitivanje poroznoga betona u svježem, a kasnije i u očvrslom stanju. U svježem stanju ispituje se:

- 1) konzistencija betona slijeganjem
- 2) granica tečenja i plastična viskoznost
- 3) čvrstoća i udio šupljina.

Konzistencija betona slijeganjem mjeri se pomoću ploče i kalupa u obliku konusa čiji je gornji promjer 70 mm, a donji 100 mm, dok je visina 60 mm. Uzorak se zbija s 15 udaraca u 15 sekundi, a zatim se stožac podiže i mjeri se visina slijeganja uzorka u odnosu na visinu stošca.

Nakon ispitivanja konzistencije betona, rotirajućim uređajem mjeri se tečenje i plastična viskoznost.

Naposlijetku se određuje tlačna čvrstoća na uzorcima promjera 50 mm i visine 100 mm, dok se udio šupljina mjeri gravimetrijskom metodom. Ove vrijednosti su važne kako bi odredili vezu između tlačne čvrstoće i udjela šupljina u poroznom betonu.

Metode ispitivanja u očvrslom stanju su:

- 1) udio šupljina
- 2) tlačna čvrstoća.

Ovim metodama se ispituju zbijenost i snaga, raspodjela šupljina po visini te stanje i čvrstoća donje površine poroznoga betona. Za ispitivanje zbijenosti i snage koristi se beton s

25% šupljina i četiri razine zbijenosti s primjenom energije od 0, 6, 36 i 90 kN m/m<sup>2</sup>.

Kako bi izmjerili raspodjelu šupljina po visini betonskoga cilindra, uzorak je podijeljen u tri

jednaka dijela i mjeri se količina šupljina u svakom dijelu. U ovom slučaju koristi se uzorak betona s 15%, 20% i 25% udjela šupljina i dodatkom 1% superplastifikatora.

Udio šupljina u donjem dijelu uzorka upućuje na stanje poroznoga betona. Donja površina se oboji, osuši, fotografira te se zatim uspoređuju uzorci.

### **3.1.4. Rezultati ispitivanja**

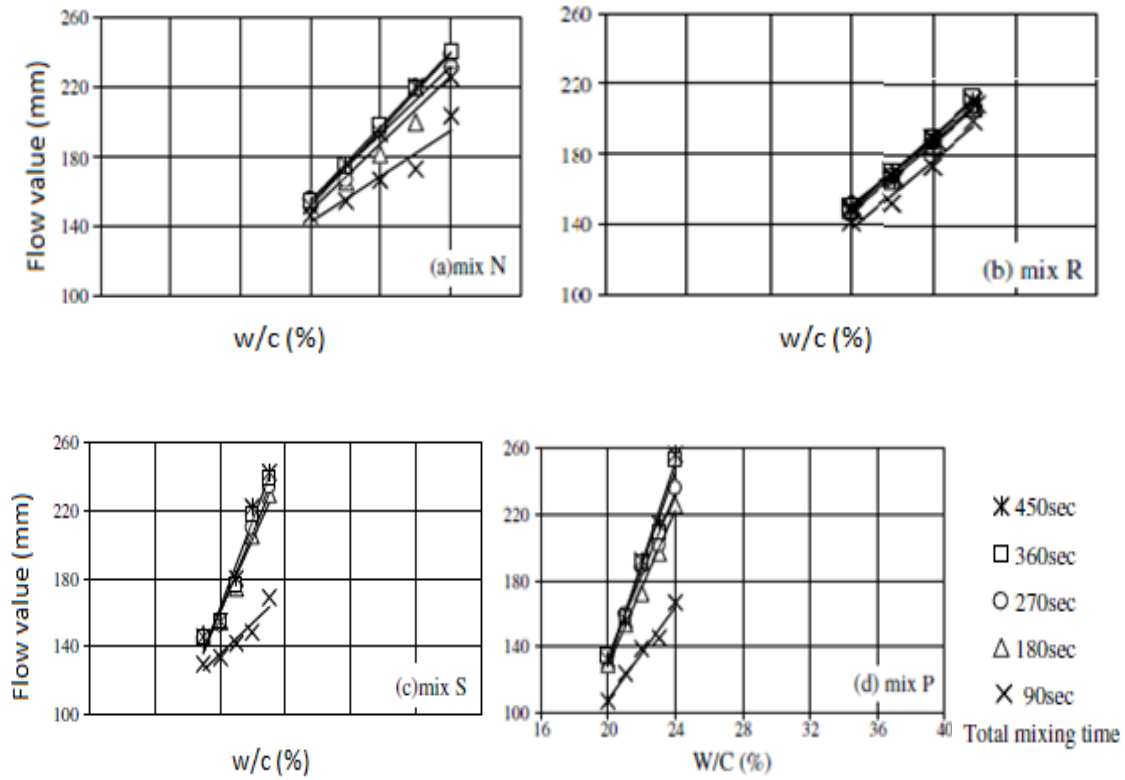
#### **3.1.4.1. Karakteristike cementne paste**

Za sve mješavine postoji linearna veza između razastiranja cementne paste i vodocementnoga faktora, i to takva da razastiranje raste porastom vodocementnoga faktora. Veće razastiranje također uzrokuje i dulje vrijeme miješanja, ali ono ne smije biti predugo kako ukupni troškovi izrade poroznoga betona ne bi porasli.

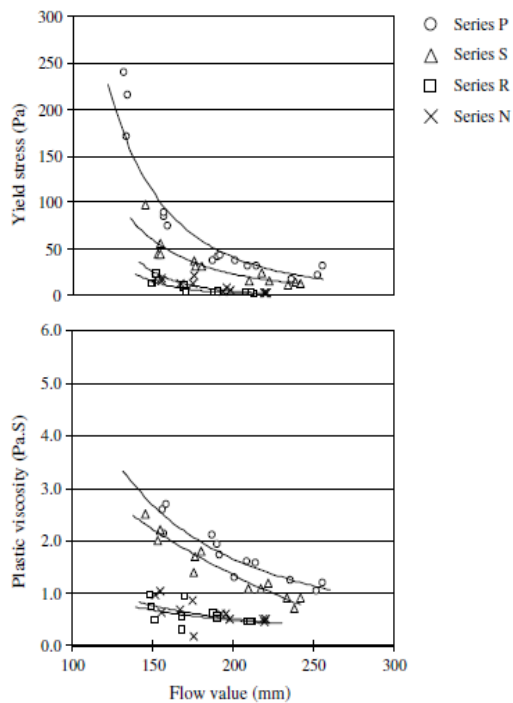
Ukupno vrijeme miješanja od 270 sekundi pokazuje relativno dobro razastiranje pa je ono i preporučeno vrijeme miješanja za sve mješavine. Gledajući utjecaj dodatka betonu na razastiranje, vidljivo je da upotreba superplastifikatora, za razliku od sredstva za redukciju vode, ima značajan utjecaj na razastiranje cementne paste. Razastiranje raste povećanjem količine superplastifikatora.

Na slici 3.2. vidljivo je pomicanje grafa ovisnosti razastiranja i vodocementnoga faktora u lijevo upotrebom ili porastom količine superplastifikatora što upućuje na smanjenje vodocementnoga faktora i time porast čvrstoće.

Rezultati tečenja i plastične viskoznosti prikazani su na slici 3.3. Kao što je i bilo očekivano, oni rastu kako se razastiranje smanjuje. I ovdje, kao i kod razastiranja, dodatak superplastifikatora ima značajan utjecaj na vrijednosti tečenja i plastične viskoznosti. Dodatak superplastifikatora u vrijednosti od 1% mase cementa daje najbolje rezultate za cementu pastu s najvećim tečenjem i viskoznošću.



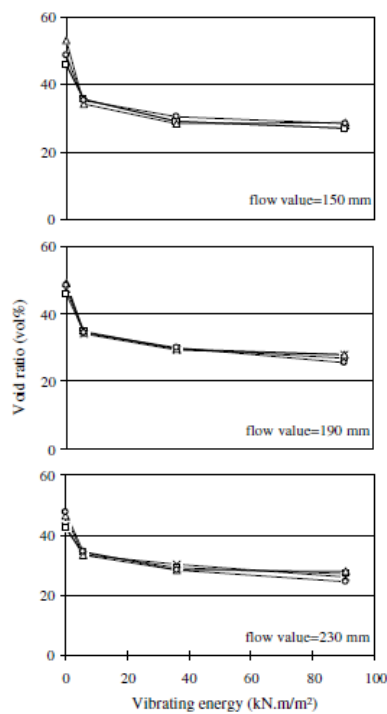
Slika 3.2. Grafovi ovisnosti razastiranja i vodocementnoga faktora[13]



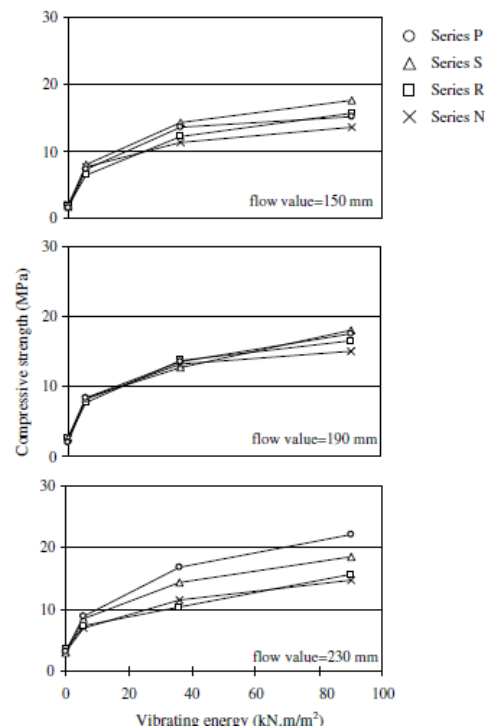
Slika 3.3. Ovisnost tečenja i plastične viskoznosti o slijeganju[13]

### 3.1.4.2. Svojstva poroznoga cementa

U početku je udio šupljina kod svih mješavina 50%, te se postupno smanjuje vibracijom. Udio šupljina smanjuje se povećanjem energije vibriranja, pa se za veliki broj mješavina pokazala prikladnom energija vibriranja od  $90 \text{ kN m/m}^2$ . Energija zbijanja također utječe na čvrstoću poroznoga betona i to tako da tlačna čvrstoća raste s povećanjem energije vibriranja kao rezultat smanjenja udjela šupljina. Osim toga, na čvrstoću utječe i razastiranje paste te vrsta i količina primjese koje se dodaju. Rezultati ispitivanja su pokazali da su projektirane mješavine, uz energiju vibriranja od  $90 \text{ kN m/m}^2$  i dodatak 1% superplastifikatora, prikladne dok god je zadovoljena čvrstoća.



**Slika 3.4.** Veza između ukupnog udjela šupljina i energije vibriranja[13]

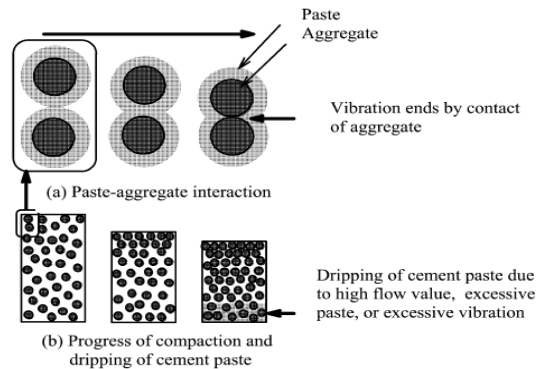


**Slika 3.5.** Veza između tlačne čvrstoće i energije vibriranja[13]

Primjena površinske vibracije uzrokuje različitu raspodjelu šupljina po visini uzorka, pa je tako udio šupljina najmanji na vrhu i povećava se prema dnu uzorka. Površinska vibracija utječe na veliku zbijenost gornjega sloja koji direktno prima energiju zbijanja. Ta se energija



također prenosi i na niže slojeve, ali znatno manjim intenzitetom. Primjenom energije zbijanja od  $90 \text{ kN m/m}^2$  razlika u udjelu šupljina između gornjega i donjeg sloja je nešto manja od 10 %. Porozni beton s 25% šupljina sadrži dovoljnu količinu paste koja bi povezala agregat i tvorila kontinuiranu smjesu, dok kod betona s 15% i 20% šupljina to nije slučaj.



**Slika 3.6.** Proces zbijanja površinskom vibracijom[13]

**Tablica 3.2.** Udio šupljina na dnu uzorka i tlačna čvrstoća (uz dodatak 1% superplastifikatora i energiju zbijanja od  $90 \text{ kN m/m}^2$ ) [13]

Flow value (mm)	State at bottom portion			Compressive strength ( $\text{N/mm}^2$ )		
F3 (230)				38	31	22*
F2 (190)				44	35*	18
F1 (150)				39*	29	15
Designed void ratio (vol.%)	15	20	25	15	20	25

\* desirable area

Iz gore prikazane tablice vidljivo je da najbolje rezultate daju mješavine P15F1, P20F2 te P25F3. Kod tih mješavina tlačna čvrstoća, kao i poroznost, daju zadovoljavajuće rezultate, dok se kod ostalih mješavina javlja velika čvrstoća uz nedovoljnu, ili gotovo nikakvu poroznost ili pak jako velika poroznost, ali mala čvrstoća.

### 3.1.5. Zaključak

Ovo istraživanje pokazalo je da se tečenje cementne paste stabilizira miješanjem pri brzini od 50 okretaja/ minuti prvih 30 sekundi, a zatim 200 okretaja/ minuti idućih 240 sekundi bez obzira na to jesu li u mješavinu dodane primjese ili ne. Dodatak superplastifikatora ima značajan utjecaj na povećanje viskoznosti i tečenja cementne paste, dok dodatak sredstva za redukciju vode nema. Cementna pasta, s visokom viskoznošću i tečenjem od 150- 230 mm, prikladna za izradu poroznoga betona, dobije se dovoljnim miješanjem, dodatkom 1% superplastifikatora i vodocemetnim faktorom od 0. 2 - 0. 25. Kod zbijanja poroznoga betona, učinkovitim se pokazalo površinsko zbijanje energijom zbijanja od 90 kN m/m<sup>2</sup> u trajanju od 10 sekundi.

Kod tečenja cementne paste u rasponu od 150 - 230 mm, i udjelom šupljina od 15 - 25%, možemo dobiti dobar porozni beton s relativno velikom čvrstoćom ako imamo cementu pastu s velikim tečenjem i malim udjelom šupljina, ili pastu s malim tečenjem i velikim udjelom šupljina. U prvom slučaju dobili smo porozni beton velike čvrstoće kod kojega je moguća pojava kapanja cemente paste što uzrokuje mali udio šupljina na donjoj površini, dok u drugom slučaju imamo porozni beton male čvrstoće.

## 3.2. Veza između poroznosti i čvrstoće kod poroznoga betona

(C. Lian, Y. Zhuge, S. Beecham)

### 3.2.1. Uvod

U svrhu maksimiziranja prednosti propusnosti do sada je provedeno nekoliko istraživanja kako bi se otkrila veza između karakteristika pora i hidrauličke ili akustičke provodljivosti poroznoga betona. Porozni beton kao građevni materijal također mora podnijeti prometno opterećenje pa je bitno otkriti kako prisutnost pora utječe na njegova mehanička svojstva. Struktura pora poroznih materijala može biti karakterizirana brojnim parametrima kao što su veličina, povezanost, hrapavost površine i volumni udio. Ipak, poroznost se smatra primarnim parametrom mikrostrukture poroznih materijala i ona ima najveći utjecaj na

njihovu čvrstoću. Upravo je cilj ove studije uspostavljanje kvantitativne veze između poroznosti i tlačne čvrstoće poroznoga betona.

### 3.2.2. Eksperimentalni dio istraživanja

Za pripravu poroznoga betona u ovoj studiji korišten je krupni agregat, obični portland cement i voda. Ipak, u nekim mješavinama su korištene i primjese kao što su pijesak, silicijska prašina i superplastifikator kako bi se dobili uzorci različitih čvrstoća. Izrađene su dvije skupine uzoraka koje su prikazane u tablici 3.3.

Prva skupina izrađena je bez dodatka primjesa. Kao krupni agregat korištene su tri frakcije kvarcita, vapnenca i dolomita (G1:13.2 – 4.75 mm; G2: 9.5 – 6.7 mm; G3: 9.5 – 4.75 mm).

Druga skupina izrađena je uz dodatak aditiva i to 7% silicijske prašine i 0.8% superplastifikatora na težinu cementa, također je dodano i nešto pijeska kao finoga agregata. U ovoj skupini samo je dolomit korišten kao krupni agregat, a vodocementni faktor varira od 0.30 do 0.38 kako bi se dobili uzorci različite čvrstoće i poroznost.

**Tablica 3.3.** Sastavi mješavina i tlačne čvrstoće [14]

Sample number	Mix proportions			Compressive strength (MPa)
	Coarse aggregate	W/C ratio	Percentage of sand	
<i>Group 1 (no additives)</i>				
1-1	Q-G2	0.36	0	11.8
1-2	Q-G3	0.36	0	15.5
1-3	L-G2	0.36	0	15.5
1-4	L-G3	0.36	0	14.0
1-5	D-G1	0.36	0	15.5
1-6	D-G2	0.36	0	15.8
1-7	D-G3	0.36	0	19.0
<i>Group 2 (7% silica fume and 0.8% plasticizer by weight of cement)</i>				
2-1	D-G3	0.38	18	23.3
2-2	D-G3	0.36	18	33.2
2-3	D-G3	0.34	18	46.2
2-4	D-G3	0.32	18	40.5
2-5	D-G3	0.30	18	40.3
2-6	D-G3	0.30	15	43.0
2-7	D-G3	0.28	18	24.3

Note: (1) Q – quartzite; L – limestone; D – dolomite; (2) the percentage of sand was based on the weight of coarse aggregate.

Tlačna čvrstoća ispitivana je na uzorcima promjera 100 mm i visine 200 mm. Nakon 24 sata uzorci su uklonjeni iz čeličnih kalupa i čuvani u vodi do dana testiranja. Prvo je izvršeno vaganje uzoraka kako bi se odredila gustoća, a zatim je ispitana tlačna čvrstoća nakon 7 i 28

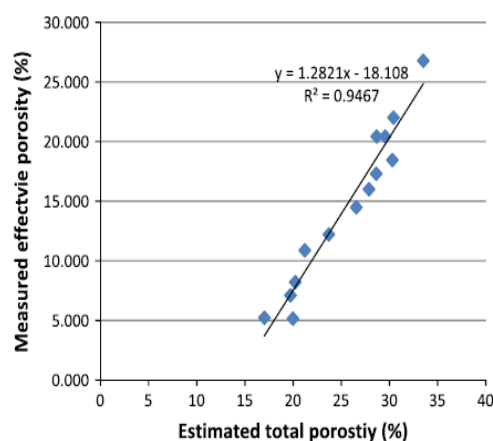
dana. Rezultati nakon 28 dana uzeti su kao reprezentativne vrijednosti tlačne čvrstoće poroznoga betona, a prosječne vrijednosti za svaku seriju prikazani su u tablici 3.3.

Što se tiče poroznosti, važno je razlikovati efektivnu i ukupnu poroznost. Efektivna poroznost odnosi se na propusnost i obuhvaća sve pore koje su međusobno povezane te je kroz njih moguće ostvariti protok fluida, dok ukupna poroznost utječe na čvrstoću betona i odnosi se na volumen svih šupljina. Kako bi izmjerili efektivnu poroznost, uzorci se prvo suše na 110°, a zatim se potapaju u vodu na 24 sata. Iz omjera volumena međusobno povezanih pora i ukupnog volumena pora, dobije se efektivna poroznost. Za proračun ukupne poroznosti Zheng je predstavio izraz koji je analogan Hoffovom izrazu, a on glasi:

$$\rho_t = \frac{100 + P_c + 0.25P_c}{\frac{100}{\rho} + \frac{P_c}{\rho_c} + (0.25P_c \cdot 0.75)} \cdot \rho_w,$$

gdje je  $\rho_t$  teorijska gustoća,  $P_c$  omjer težine cementa i agregata,  $\rho_c$  specifična težina cementa,  $\rho_w$  jedinična težina vode, a  $\rho$  gustoća agregata. Iz toga se ukupna poroznost može izračunati prema  $p = \frac{\rho_b}{\rho_t}$ , gdje je  $\rho_b$  gustoća uzorka.

Izmjerena efektivna poroznost i procijenjena ukupna poroznost prikazane su na slici 3.7. za sve mješavine. Veza je približno linearna, a iz vrijednosti  $R^2$  vidljiva je dobra korelacija između jedne i druge vrijednosti.



Slika 3.7. Veza između efektivne i ukupne poroznosti[14]

### 3.2.3. Postojeći modeli za cementne materijale

Ovo istraživanje bazira se na razvoju matematičkoga modela između totalne poroznosti i tlačne čvrstoće poroznoga betona. Do sada su razvijena 4 općenita tipa modela za cementne materijale (tablica 3.4.). U izrazima a) do c) poroznost ( $p$ ) i odgovarajuća čvrstoća ( $f$ ) poroznoga materijala povezani su preko parametra  $\sigma_0$  koji predstavlja čvrstoću materijala kada je poroznost jednaka nuli, dok je kod izraza d)  $p_0$  poroznost kada je čvrstoća materijala jednaka nuli.

**Tablica 3.4.** Empirijski modeli odnosa poroznosti i čvrstoće cementnih materijala [14]

	Jednadžbe	Matematički zakon	Konstanta	Izvor
(a)	$\sigma = \sigma_0 \cdot (1 - bp)$	Linearni	b	Hasselmann, prvobitno za staklo
(b)	$\sigma = \sigma_0 \cdot (1 - p)^n$	Potencijalni	n	Balsin, za praškaste metale
(c)	$\sigma = \sigma_0 \cdot e^{-cp}$	Eksponecijalni	c	Ryshkevitch, za keramiku i stijene
(d)	$\sigma = \kappa \cdot \ln(p_0 / p)$	Logaritamski	k	Schiller, za nemetalne lomljive materijale

Chindaprasirt je pokazao da eksponencijalna veza (izraz c) koju je predložio Ryshkevitch vrijedi za opisivanje poroznoga betona. Vrijednost  $R^2$  u ovom slučaju je 0.90 i manja je od vrijednosti koju je dobio Chindaprasirt ( $R^2=0.96$ ). Do toga je vjerojatno došlo jer su oni testirali čvrstoću cementne paste i finoću modula agregata korištenih za porozni beton pa su te vrijednosti upotrijebili za određivanje konstanti. Ova studija pokušava teoretski odrediti model za situacije u kojima čvrstoća cementne paste nije poznata.

### 3.2.4. Predloženi model

Griffithov model loma obično se uzima kao klasična teorija koja objašnjava kako se mehanička izvedba odnosi na poroznost. Griffith je utvrdio da kritično naprezanje nastaje širenjem pukotina unutar krhkih materijala i može se izraziti kao:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}}$$

gdje je  $\sigma$  kritično naprezanje (Pa),  $E$  modul elastičnosti (Pa),  $\gamma$  energija sloma ( $J/m^2$ ) i  $a$  pola duljine unutarnje pukotine. Primjenom ovoga kriterija na porozne materijale potrebno je odrediti modul elastičnosti i energiju sloma jer prisutnost pora utječe i na jedno i na drugo. Naime, i modul elastičnosti i energija sloma su smanjeni s povećanjem udjela pora.

Razvijene su razne jednadžbe za opisivanje utjecaja sadržaja pora na Youngov modul elastičnosti i energiju loma za različite materijale, no u ovom istraživanju u obzir su uzete dvije. Prvo je Rice uočio smanjenje Youngovog modula kao  $E=E_0 \cdot e^{-tp}$ , gdje je  $E_0$  modul elastičnosti materijala s nultom poroznošću, a  $t$  konstanta. Također je odredio i energiju loma pora kao  $\gamma=\gamma_0 \cdot e^{-qp}$ , gdje je  $\gamma_0$  energija loma pri nultoj poroznosti, a  $q$  konstanta. Ako ove izraze uvrstimo u Griffithov izraz za kritično naprezanje, dobijemo da je:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E_0 e^{-tp} \gamma_0 e^{-qp}}{\pi a}} = \sqrt{\frac{2E_0 \gamma_0}{\pi a}} e^{-mp} = k e^{-mp},$$

gdje su  $k$  i  $m$  konstante.

Kendall je predložio alternativnu metodu primjenivši drugačiji izraz za Youngov modul  $E=E_0(1-p)^3$  s energijom loma  $\gamma=\gamma_0 \cdot e^{-np}$  i usporedivši predviđeno naprezanje pri lomu s rezultatima dobivenim ispitivanjem betona s polimerima, predloženi model u ovom slučaju je glasio:

$$\sigma = \sqrt{\frac{2E_0(1-p)^m \gamma_0 e^{-np}}{\pi a}},$$

gdje su  $m$  i  $n$  nove materijalne konstante za porozni beton.

Kako bi pojednostavnili Griffithov izraz, pretpostavljeno je da je  $\frac{2E_0 \gamma_0}{\pi a} = A$ , bez obzira na moguće drugačije veličine pora nastale u različitim uzorcima. Tada dobijemo da je:

$$\sigma = \sqrt{A(1-p)^m \cdot e^{-np}}.$$

Kvadrirajući i logaritmirajući obe strane izraza dobijemo:

$$2 \ln \sigma = m \ln(1-p) - np - \ln A$$

pa se to sada može smatrati linearnom jednadžbom oblika:

$$Y = mx_1 + nx_2 + c,$$

gdje su:  $Y=2\ln\sigma$ ,  $x_1=\ln(1-p)$ ,  $x_2=p$  i  $c=\ln A$ .

Vrijednosti  $Y$ ,  $x_1$  i  $x_2$  su izračunati i prikazani u tablici 3.5.

**Tablica 3.5.** Analitički i eksperimentalni podatci za modeliranje[14]

Sample number	Cement to aggregate ratio	Specific gravity of binder	Aggregate density ( $\times 10^3$ kg/m <sup>3</sup> )	Sample density	Total porosity (%)	Compressive strength (MPa)	$Y$	$x_1$	$x_2$
1-1	0.22	3.15	2.65	1831	30.90	12.00	4.97	-0.37	0.31
	0.22	3.15	2.65	1734	34.57	12.00	4.97	-0.42	0.35
	0.22	3.15	2.65	1763	33.48	11.50	4.89	-0.41	0.33
1-2	0.22	3.15	2.65	1880	29.06	17.50	5.72	-0.34	0.29
	0.22	3.15	2.65	1800	32.08	14.50	5.35	-0.39	0.32
	0.22	3.15	2.65	1840	30.57	14.50	5.35	-0.36	0.31
1-3	0.22	3.15	2.74	1985	27.55	15.50	5.49	-0.32	0.28
	0.22	3.15	2.74	2105	23.17	19.50	5.94	-0.26	0.23
	0.22	3.15	2.74	1947	28.94	11.50	4.88	-0.34	0.29
1-4	0.22	3.15	2.74	1960	28.46	15.50	5.48	-0.34	0.28
	0.22	3.15	2.74	1920	29.92	13.00	5.13	-0.36	0.30
	0.22	3.15	2.74	1900	30.65	13.50	5.21	-0.37	0.31
1-5	0.22	3.15	2.70	1940	28.15	17.00	5.67	-0.33	0.28
	0.22	3.15	2.70	1940	28.15	16.50	5.61	-0.33	0.28
	0.22	3.15	2.70	1900	29.63	13.00	5.13	-0.35	0.30
1-6	0.22	3.15	2.70	1863	31.00	15.00	5.42	-0.37	0.31
	0.22	3.15	2.70	1895	29.81	17.00	5.67	-0.35	0.30
	0.22	3.15	2.70	1880	30.37	15.50	5.48	-0.36	0.30
1-7	0.22	3.15	2.70	1920	28.89	17.00	5.67	-0.34	0.29
	0.22	3.15	2.70	1980	26.67	22.50	6.23	-0.31	0.27
	0.22	3.15	2.70	1920	28.89	17.50	5.72	-0.34	0.29
2-1	0.25	3.06	2.70	2080	22.96	30.50	6.84	-0.26	0.23
	0.25	3.06	2.70	2060	23.70	31.50	6.90	-0.27	0.24
	0.25	3.06	2.70	2040	24.44	28.00	6.66	-0.28	0.24
2-2	0.25	3.06	2.70	2120	21.47	34.50	7.08	-0.24	0.21
	0.25	3.06	2.70	2120	21.47	32.00	6.93	-0.24	0.21
	0.25	3.06	2.70	2140	20.73	33.00	6.99	-0.23	0.21
2-3	0.25	3.06	2.70	2240	17.02	49.00	7.78	-0.19	0.17
	0.25	3.06	2.70	2240	17.02	46.50	7.68	-0.19	0.17
	0.25	3.06	2.70	2240	17.02	43.00	7.52	-0.19	0.17
2-4	0.25	3.06	2.70	2160	19.98	39.50	7.35	-0.22	0.20
	0.25	3.06	2.70	2200	18.50	42.00	7.48	-0.20	0.19
	0.25	3.06	2.70	2140	20.72	40.00	7.38	-0.23	0.21
2-5	0.25	3.06	2.70	2180	19.24	41.00	7.43	-0.21	0.19
	0.25	3.06	2.70	2180	19.24	41.00	7.43	-0.21	0.19
	0.25	3.06	2.70	2140	20.72	39.00	7.33	-0.23	0.21
2-6	0.25	3.06	2.70	2140	20.72	42.00	7.48	-0.23	0.21
	0.25	3.06	2.70	2140	20.72	44.00	7.57	-0.23	0.21
	0.25	3.06	2.70	2200	18.50	43.00	7.52	-0.20	0.19
2-7	0.25	3.06	2.70	1960	27.39	23.00	6.27	-0.32	0.27
	0.25	3.06	2.70	1960	27.39	26.50	6.55	-0.32	0.27
	0.25	3.06	2.70	1920	28.87	23.50	6.31	-0.34	0.29

Rezultati regresije su  $m=5.96$  i  $n=-10.01$  kada je  $c=10.61$  pa imamo  $Y=5.96x_1-10.01x_2+10.61$ . Koeficijent  $R^2$  za ovu jednadžbu je 0.99, a standardna pogreška  $Y$  procijenjena je na 0.306. Ovi podatci upućuju na to da bi ovaj model mogao opisati odnos između tlačne čvrstoće i poroznosti s prihvatljivom točnošću.

### 3.2.5. Zaključak

Ovisnost tlačne čvrstoće o poroznosti je empirijski i teorijski analizirana u ovom istraživanju i doneseni su sljedeći zaključci:

- 1) Efektivna poroznost je mjerena dok je ukupna procijenjena i zatim su uspoređene. Vidljivo je da procijenjena ukupna poroznost ima dobru korelaciju s mjerenom efektivnom poroznošću. Ova metoda procjene može se koristiti kada nisu dostupni uređaji za mjerenje ukupne poroznosti.
- 2) Predstavljene su postojeće jednadžbe koje povezuju tlačnu čvrstoću i poroznost cementnih materijala, a procijenjena je i jednadžba koja bi vrijedila za porozni beton. Vidljivo je da se bez dodatnog znanja o čvrstoći cementne paste dobije veoma nizak koeficijent korelacije.
- 3) Uz mnogobrojne podatke o poroznosti i testiranjem tlačne čvrstoće, predložen je novi model koji koristi Griffithovu teoriju loma. U ovom slučaju uočava se jača veza između tlačne čvrstoće i poroznosti s vrijednosti koeficijenta  $R^2=0.99$ . Ovo predstavlja značajan napredak u odnosu na eksponencijalnu jednadžbu. Ostali podatci također potvrđuju da ovaj poluempirijski postupak može predvidjeti tlačnu čvrstoću poroznoga betona na temelju poroznosti materijala.

## 3.3. Procjena poroznoga betona visokih svojstava

**(M. Aamer Rafique Bhutta, K. Tsuruta, J. Mirza)**

### 3.3.1. Uvod

Standardni porozni beton (CPC ili beton u kojem je u potpunosti izostavljen sitni agregat) dobije se upotrebom agregata jednolike veličine pri niskom vodocementom faktoru (w/c). Međutim, CPC je pokazao slabu obradivost (<30%), potrebu za opremom za vibriranje kako bi se izvršilo pravilno zbijanje, te potrebu za sušenjem za proizvodnju predgotovljenih proizvoda i sustava za odvodnju kod kolnika.



Ovo istraživanje pokušava razviti i vrednovati karakteristike poroznoga betona visokih svojstava (HPPC). Svrha je ispitati primjenjivost HPPC- a u smislu njegove praktične primjene umjesto CPC- a. Također se proučava utjecaj modifikatora viskoznosti i aditiva za reduciranje količine vode (SP) na samozbijanje HPPC- a i njegova svojstva u očvrslom stanju.

### 3.3.2. Eksperimentalni dio istraživanja

Za pripremu poroznoga betona korišten je obični portland cement i tri različite frakcije drobljenoga agregata (13 - 20 mm, 5 - 13mm i 2.5 - 5 mm). Također je upotrebljen komercijalno dostupan SP (gustoće:1.06 g/cm<sup>3</sup>) kako bi se postigla bolja obradivost, kao i modifikator viskoznosti (gustoće:2.40 g/cm<sup>3</sup>) čiji je zadatak bio povećanje viskoznosti te smanjenje segregacije. U tablicama 3.6. i 3.7. prikazani su sastavi mješavina za CPC i HPPC.

**Tablica 3.6.** Sastav mješavine za CPC [15]

Aggregate size	W/C (%)	Mixture proportions (kg/m <sup>3</sup> )		
		W	C	CA
No. 5 (13–20 mm)	27	85	320	1620
No. 6 (5–13 mm)	27	70	260	1800
No. 7 (2.5–5 mm)	30	89	300	1640

**Tablica 3.7.** Sastav mješavine za HPPC [15]

Aggregate size	W/C (%)	Ad. I		Ad. II		Mixture proportions (kg/m <sup>3</sup> )				
		L	L	L	L	W	C	CA	Ad. I	Ad. II
No. 5 (13–20 mm)	30	1.1	0.60	99	300	1500	3.00	1.80		
No. 6 (5–13 mm)	30	1.0	0.26	111	370	1398	3.70	0.96		
No. 7 (2.5–5 mm)	35	1.1	0.15	138	395	1390	4.35	0.60		

*Napomena:* Ad. I: SP; Ad. II: modifikator viskoznosti; W: voda; C: cement; CA: krupni agregat.

Nakon priprave, svi uzorci čuvani su pri temperaturi 20±1°C i vlažnosti od 100% jedan dan, a zatim 27 dana pri istoj temperaturi i vlažnosti od 60%. Kako bi dobili srednju vrijednost,

izrađena su po tri identična uzorka za svaku vrstu cementa i za svaki test. HPPC je pokazao dobru obradivost i sposobnost ispunjavanja prostora raznih oblika i veličina, a da pri tom ne dolazi do segregacije ili izlučivanje vode. Ne zahtijeva posebnu opremu za zbijanje, kao ni njegu, i razvio je veliku čvrstoću.

Na uzorcima je ispitano slijeganje, razastiranje, ukupni udio šupljina, tlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje, koeficijent propusnosti i brzina razvoja čvrstoće. Brzina razvoja čvrstoće ispitivana je tijekom očvršćavanja i to 1, 3, 7, 14 i 28 dana nakon pripreme mješavina.

### 3.3.3. Rezultati i rasprava

U HPPC mješavini ispitano je slijeganje i razastiranje kako bi se održala konzistentnost SP- a i modifikatora viskoznosti, te su ta ispitivanja uvelike doprinijela njegovoj primjeni. S druge strane, ta ispitivanja nisu provedena na CPC- u zbog vrlo niskoga vodocementnog faktora. U tablici 3.8. prikazana je usporedba svojstava između CPC- a i HPPC- a.

**Tablica 3.8.** Usporedba svojstava CPC- a i HPPC- a [15]

Property	CPC	HPPC
Workability	Poor	Good
Vibration	Required	Not required
Void ratio	18–25%	18–25%
Cohesiveness	No	Yes
Self-compaction	No	Yes
Strength	Low	High
Curing	Steam	No curing

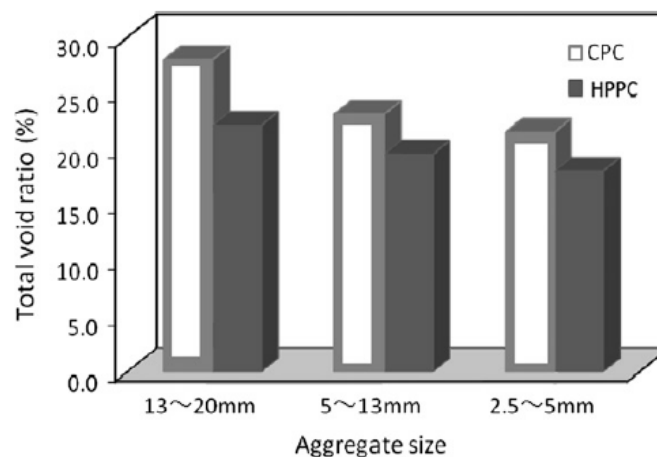
Općenito, CPC je posebna vrsta betona s diskontinuiranom granulometrijskom krivuljom u kojem je u potpunosti izostavljen sitni agregat i korištena je uniformna veličina agregata s niskim vodocementnim faktorom. On zahtijeva prikladno zbijanje ovisno o načinu primjene, a zbog niskoga vodocementnog faktora ima i slabu obradivost. Dakle, zahtijeva dobro zbijanje kao i njegu. Kao što je vidljivo iz tablice 3.8., HPPC ima bolju obradljivost s istim udjelom šupljina, ne zahtijeva vibriranje i pokazuje dobru kohezivnost. Do ovoga poboljšanja obradljivosti došlo je zahvaljujući dodatku prikladne količine SP- a i modifikatora viskoznosti.

Za određivanje ukupnoga udjela šupljina korišteni su uzorci oblika valjka i to po tri od svake vrste poroznoga betona. Prvo je izmjerena masa uzorka potopljenoga u vodi, a zatim, nakon 24 sata sušenja, masa suhoga uzorka. Ukupni udio šupljina dobio se iz izraza:

$$A(\%) = 1 - \left( \frac{M_2 - M_1}{\rho M} \right) \cdot 100,$$

gdje je  $M_2$  masa uzorka u vodi,  $M_1$  masa suhoga uzorka,  $\rho M$  gustoća vode i  $V$  volumen uzorka.

Uočeno je da se ukupni udio šupljina smanjuje sa smanjenjem veličine agregata. Kod svih uzoraka udio šupljina se kretao između 18% i 28% što su prihvatljive vrijednosti za porozni beton. Također je uočeno da se dodatkom modifikatora viskoznosti smanjio udio šupljina kod HPPC- a.

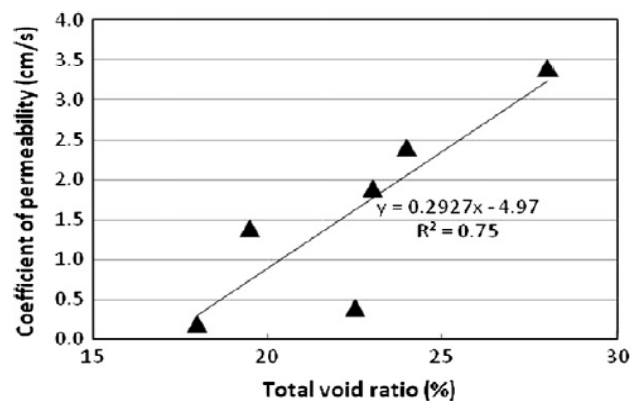


**Slika 3.8.** Utjecaj veličine agregata na ukupni udio šupljina u poroznom betonu[15]

Rezultati ispitivanja čvrstoće uzoraka pokazali su, kao što je i očekivano, da smanjenjem veličine zrna agregata raste čvrstoća uzorka. HPPC je pokazao znatno veću čvrstoću od CPC- a. Dodatkom modifikatora viskoznosti mješavini HPPC- a povećala se obradivost cementne paste, a time i kontaktno područje između susjednih zrna agregata što dovodi do povećanja čvrstoće.

Bez obzira na vrste poroznoga betona i veličine agregata, tlačna čvrstoća svih poroznih betona povećava se sa smanjenjem ukupnoga udjela šupljina. Porozni betoni s ukupnim udjelom šupljina od 15 - 30 % pokazuju gotovo linearnu vezu između tlačne čvrstoće i ukupnoga udjela šupljina.

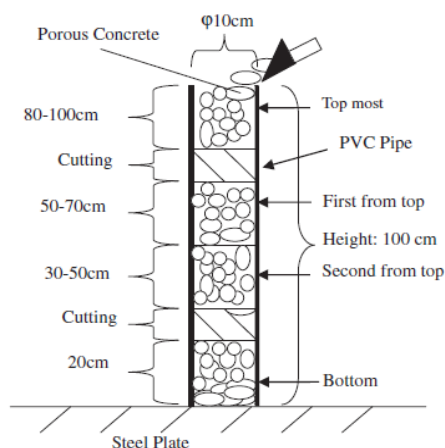
Ispitujući propusnost uzoraka, za sve uzorke dobivene su vrijednosti između 0.25 i 3.3 cm/s i one su dovoljno visoke kako bi se ovakvi betoni upotrebljavali kao drenažni slojevi. Iz rezultata je također vidljivo da je propusnost manja što je manja veličina agregata. Bez obzira na vrstu cementa i veličinu agregata, propusnost betona raste s povećanjem ukupnoga udjela šupljina. U uzorcima u kojima je udio šupljina u rasponu od 15-30%, koeficijent propusnosti svih poroznih betona linearno raste.



**Slika 3.9.** veza između ukupnog udjela šupljina i koeficijenta propusnosti[15]

Kako bi ispitali razvoj čvrstoće, uzorci su čuvani na temperaturi od 20°C i vlažnosti od 60% te je ispitana njihova čvrstoća nakon 1, 3, 7, 14 i 28 dana. Kod jedne i druge mješavine čvrstoća postepeno raste do 14- og dana i zatim postaje gotovo konstantna. HPPC je pokazao veći razvoj tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanju u jednakom razdoblju. Dodavanjem primjesa znatno se utjecalo na svojstva HPPC- a pa je cementna pasta postala kohezivna, a izostala je segregacija i izlučivanje vode. Kohezivnost cementne paste utjecala je na proizvodnju HPPC- a s nižim udjelom šupljina u usporedbi s CPC- om.

Za ispitivanje samozbijanja HPPC- a razvijena je jednostavna testna metoda koja se sastoji od slobodnoga ispuštanja poroznoga betona u PVC cijev (slika 3.10.) . Nakon vađenja iz kalupa, na ovim uzorcima ispitano je slijeganje, razastiranje, gustoća, koeficijent zbijenosti, ukupni udio šupljina u odnosu na tlačnu čvrstoću, koeficijent propusnosti, itd. Prethodno izvedena metoda imala je značajan utjecaj na sva ova svojstva.



**Slika 3.10.** Shematski prikaz PVC kalupa[15]

Nakon gore opisanog postupka gustoća uzorka dobivena je preko izraza:

$$\text{gustoća uzorka [g/cm}^3\text{]} = \frac{\text{masa uzorka}}{\text{volumen uzorka}},$$

kao i koeficijent zbijenosti preko izraza:

$$\text{koeficijent zbijenosti [\%]} = \frac{D_1}{D_2} \cdot 100,$$

gdje su  $D_1$  i  $D_2$  gustoće dobivene slobodnim ispuštanjem poroznog betona u kalup po JCI metodi.

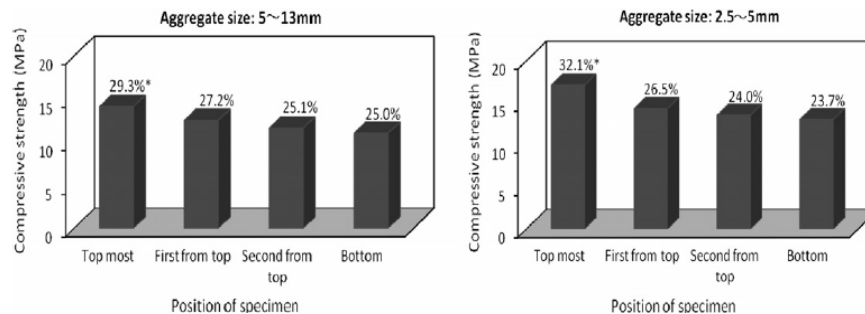
Gustoće uzoraka, koje su gotovo jednake, i koeficijenti zbijenosti, koji kod svih uzoraka prelaze 80%, upućuju na dobru obradljivost uzoraka. Dodavanjem prikladne količine SP- a i modifikatora viskoznosti, proizveden je porozni beton visokih svojstava koji može popuniti šupljine bilo kojeg oblika i veličine bez pojave segregacije i izlučivanja vode.

**Tablica 3.9.** Gustoća različitih slojeva HPPC- a [15]

Type of aggregate	Apparent density (g/cm <sup>3</sup> ) of layers			
	Top most	First from Top	Second from Top	Bottom
No. 6 (5–13 mm)	1.73	1.67	1.62	1.62
No. 7 (2.5–5 mm)	1.74	1.72	1.70	1.70

Na slici 3.11. prikazan je učinak ukupnog udjela šupljina na tlačnu čvrstoću uzoraka HPPC- a uzetih iz različitih položaja upravo zbog velikoga utjecaja ispitne metode na ova svojstva. Svi uzorci pokazali su ukupni udio šupljina od 23 - 32%, kao i tlačnu čvrstoću iznad 10 MPa što

zadovoljava zahtjeve za primjenu poroznoga betona. Već je spomenuto kako tlačna čvrstoća raste sa smanjenjem udjela šupljina, no ona je uvjetovana i dodatkom SP- a i modifikatora viskoznosti pa tako tlačna čvrstoća ne raste samo zbog smanjene poroznosti, već i zbog čvrste veze između agregata i cementne paste koja se postigla upravo dodavanjem ovih dodataka.



**Slika 3.11.** Tlačna čvrstoća i ukupni udio šupljina u različitim položajima uzorka[15]

Osim na gore navedena svojstva, vidljiv je utjecaj nove metode i na koeficijent propusnosti pa se sada te vrijednosti u različitim slojevima kreću od 0.9 do 3.1 cm/s. Općenito, gledajući sva navedena svojstva, pokazalo se da su veće vrijednosti dobivene u donjim nego u srednjim i gornjim slojevima. Razlog tome je dobra zbijenost dobivena slobodnim ispuštanjem poroznoga betona.

### 3.3.4. Zaključak

Ovim ispitivanjem doneseni su sljedeći zaključci:

- 1) Upotrebom kombinacije SP- a i modifikatora viskoznosti dobije se prihvatljiv HPPC s dobrom obradivošću i tlačnom čvrstoćom.
- 2) Dodatak modifikatora viskoznosti mješavini HPPC- a može smanjiti ukupni udio šupljina i propusnost mješavine, ali značajno povećati tlačnu čvrstoću i čvrstoću na savijanje.
- 3) Bez obzira na vrstu cementa i veličinu agregata, rezultati ispitivanja pokazali su gotovo linearnu vezu između tlačne čvrstoće i ukupnoga udjela šupljina, kao i između koeficijenta propusnosti i ukupnoga udjela šupljina za sve porozne betone kojima je ukupni udio šupljina u rasponu od 15 - 30%.

- 4) Nova ispitna metoda slobodnoga ispuštanja poroznoga betona ima značajan utjecaj na svojstva poroznoga betona pa tako ispitivanja provedena nakon te metode pokazuju gotovo jednaku gustoću u svim slojevima i stupanj zbijenosti preko 80%. Osim toga, propusnost je pokazala zadovoljavajuće rezultate, ali propusnost kod betona s različitom veličinom agregata daje različite rezultate.
- 5) Ispitujući svojstva HPPC-a i CPC-a vidljivo je da je HPPC dao znatno bolje rezultate, pa je tako otporan na segregaciju, pokazuje znatnu čvrstoću i mogućnost lakoga zbijanja.

### **3.4. Eksperimentalno istraživanje o mehaničkim i hidrološkim svojstvima poroznoga betona od portland cementa (Ahmed Ibrahim, Enad Mahmoud, Mohammed Yamin, Varun Chowdary Patibandla )**

#### **3.4.1. Uvod**

Cilj ove studije je istražiti mehanička svojstva i propusnost poroznoga betona izrađenoga od portland cementa (PCPC) pod različitim parametrima. Među te parametre spadaju veličina i volumen krupnoga agregata, vodocementni faktor i količina cementa. Oni mogu imati utjecaj na mehanička svojstva kao što su tlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje i čvrstoća na cijepanje, a propusnost svih mješavina je mjerena prema ASTM standardima.

#### **3.4.2. Eksperimentalni dio istraživanja**

Miješanjem vode, cementa i krupnoga agregata jednolike veličine napravljene su 24 mješavine poroznoga betona. Sve mješavine su proizvedene koristeći portland cement, a vrijednosti vodocementnoga faktora su 0.30, 0.35 i 0.40. Osim toga, bitno je naglasiti da su korištene jedna ili dvije veličine drobljenoga vapnenca i to 4.5, 9,5 i 12.5 mm. U mješavinama u kojima su korištene dvije frakcije agregata njihov omjer je bio 50/50.

Sve mješavine prikazane su u tablici 3.10., a napravljene su tako da bi se dobila što bolja

propusnost, poroznost i jedinična težina. Osim navedenog, kod mješavina su se ispitivale i tlačna i vlačna čvrstoća, te nosivost.

Za ispitivanje tlačne čvrstoće i propusnosti izrađeni su valjci promjera 100 mm i visine 200 mm, dok se ispitivanje vlačne čvrstoće vršilo na valjcima promjera 200 mm i visine 400 mm. Sva ispitivanja izvršena su nakon 28 dana. Standardni kalup dimenzija 150x150x530 mm korišten je za ispitivanje čvrstoće na savijanje. Svi uzorci su izvađeni iz kalupa nakon 24 sata i čuvani u prostoriji s 95% vlažnosti.

**Tablica 3.10.** Sastavi mješavina[16]

Concrete mixes	Parameters	The nominal coarse aggregate size (mm)	Cement (kg)	W/C	Coarse aggregate (kg/m <sup>3</sup> )
PC1	Aggregate size	4.5	200	0.35	1600
PC2		9.5	200	0.35	1600
PC3		12.5	200	0.35	1600
PC4		4.5 + 9.5	200	0.35	1600
PC5		4.5 + 12.5	200	0.35	1600
PC6		9.5 + 12.5	200	0.35	1600
PC7	Water to cement ratio	9.5	200	0.30	1600
PC8		9.5	200	0.40	1600
PC9		12.5	200	0.30	1600
PC10		12.5	200	0.40	1600
PC11		9.5 + 12.5	200	0.30	1600
PC12		9.5 + 12.5	200	0.40	1600
PC13	Portland cement	9.5	150	0.35	1800
PC14		12.5	150	0.35	1800
PC15		9.5 + 12.5	150	0.35	1800
PC16		9.5	250	0.35	1800
PC17		12.5	250	0.35	1800
PC18		9.5 + 12.5	250	0.35	1800
PC19	Coarse aggregate volume	9.5	150	0.35	1500
PC20		12.5	150	0.35	1500
PC21		9.5 + 12.5	150	0.35	1500
PC22		9.5	250	0.35	1500
PC23		12.5	250	0.35	1500
PC24		9.5 + 12.5	250	0.35	1500

Tlačna čvrstoća uzorka dobivena je na temelju srednje vrijednosti rezultata tri identična uzorka, dok je propusnost mjerena metodom stalne razine stupca tekućine pa je koeficijent propusnosti dobiven preko Darcyjevog zakona:

$$K = \frac{A_1 L}{A_2 t} \log \frac{h_1}{h_2},$$

gdje su  $A_1$  i  $A_2$  površine presjeka uzorka i cijevi, a  $L$  duljina uzorka.





**Slika 3.12.** Uređaj za ispitivanje propusnosti sa stalnom razinom stupca tekućine[16]

Ukupna poroznost se dobila mjerenjem mase uzorka potopljenoga u vodi, a nakon 24 sata sušenja izmjerena je masa istoga uzorka na zraku pa je poroznost:

$$P = 1 - \left( \frac{(W_1 - W_2) / \rho_w}{V} \right) \cdot 100\% ,$$

gdje je  $P$  ukupna poroznost betona [%],  $W_1$  masa uzorka na zraku [kg],  $W_2$  masa uzorka potopljenoga u vodi [kg],  $V$  volumen uzorka [ $\text{mm}^3$ ] i  $\rho_w$  gustoća vode [ $\text{kg}/\text{mm}^3$ ].

### 3.4.3. Rezultati i rasprava

U tablici 3.11. prikazana su mjerena svojstva svih PC mješavina uključujući gustoću, tlačnu čvrstoću nakon 28 dana, nosivost, vlačnu čvrstoću, propusnost i poroznost. Tlačna čvrstoća poroznih betona obično je manja od 10 MPa zahvaljujući visokoj poroznosti. Iz tablice je vidljivo da je najveća tlačna čvrstoća u ovom istraživanju postignuta na mješavini PC22 i to 6.95 MPa, a mješavina je izrađena od jednolike veličine agregata 9.5 mm. Ta ista mješavina ujedno ima i najnižu propusnost

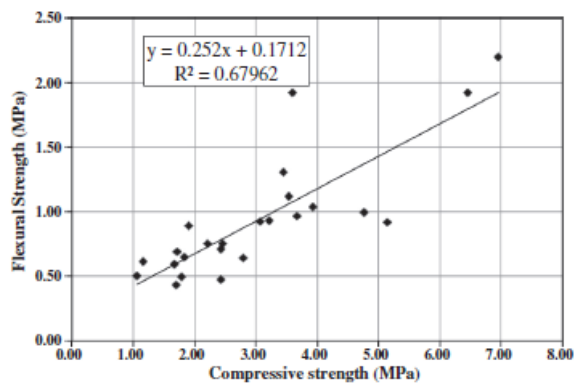
(0.015 m/s) i poroznost (30%). S druge strane, najmanja tlačna čvrstoća zabilježena je kod mješavine PC14, a mješavina je izrađena od jednolike veličine agregata 12.5 mm.

**Tablica 3.11.** Svojstva mješavina poroznoga betona[16]

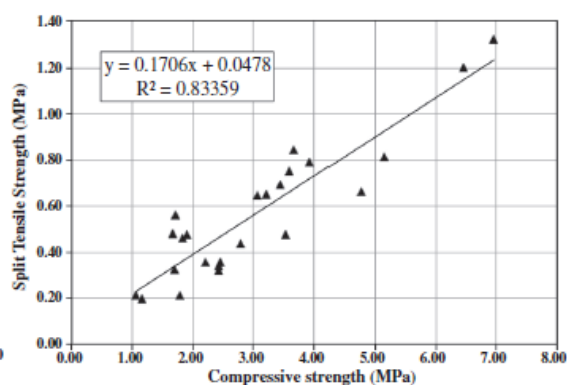
PCPC mixtures	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Compressive strength (MPa)	Modulus of rupture (MPa)	Tensile strength (MPa)	Permeability coefficient (m/s)	Porosity (%)
PC1	1780.31	2.21	0.75	0.36	0.0179	35
PC2	1697.50	2.45	0.75	0.36	0.0186	38
PC3	1723.38	3.22	0.93	0.65	0.0241	38
PC4	1637.62	2.42	0.71	0.32	0.0174	42
PC5	1716.13	3.53	1.12	0.47	0.0156	35
PC6	1683.46	2.80	0.64	0.44	0.0181	38
PC7	1682.72	1.79	0.50	0.21	0.0203	39
PC8	1752.95	3.92	1.04	0.79	0.0214	35
PC9	1652.40	2.43	0.47	0.34	0.0229	39
PC10	1767.00	3.67	0.97	0.84	0.0270	36
PC11	1662.02	1.91	0.89	0.48	0.0241	39
PC12	1796.57	3.59	1.92	0.75	0.0221	35
PC13	1679.76	1.16	0.61	0.20	0.0224	40
PC14	1652.40	1.06	0.50	0.21	0.0282	40
PC15	1665.71	1.83	0.65	0.46	0.0243	38
PC16	1809.14	4.76	1.00	0.66	0.0163	35
PC17	1708.59	3.07	0.93	0.65	0.0241	37
PC18	1715.25	3.45	1.31	0.69	0.0202	36
PC19	1679.76	1.71	0.43	0.32	0.0211	38
PC20	1656.10	1.67	0.59	0.48	0.0275	38
PC21	1678.28	1.71	0.69	0.56	0.0218	38
PC22	1804.71	6.95	2.20	1.32	0.0150	30
PC23	1707.85	5.14	0.92	0.81	0.0158	32
PC24	1874.94	6.45	1.93	1.20	0.0184	31

Gustoća poroznoga betona otprilike je 1800 kg/m<sup>3</sup>, a kod izrađenih mješavina kreće se u vrijednostima od 1637 do 1875 kg/m<sup>3</sup>. Te razlike u gustoći pripisuju se različitom udjelu cementa i agregata u mješavinama. Gustoća je uglavnom uvjetovana veličinom agregata. Osim toga, naglasit ćemo da je najmanja zabilježena poroznost kod mješavine PC22 30%.

Osim svojstava pojedinačno, u ovom istraživanju promatran je i međusobni utjecaj svojstava. Na slikama 3.13. i 3.14. prikazana je veza između tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje, te između tlačne i vlačne čvrstoće.

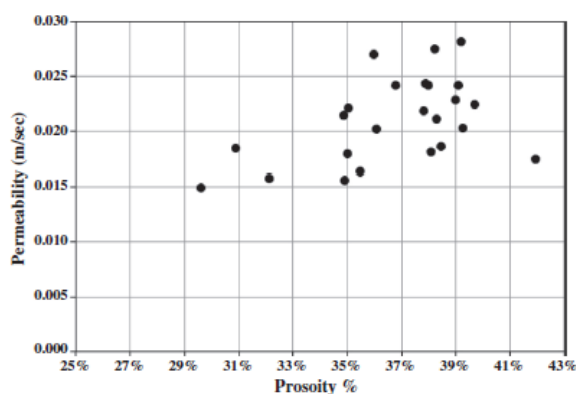


**Slika 3.13.** Veza između tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje[16]



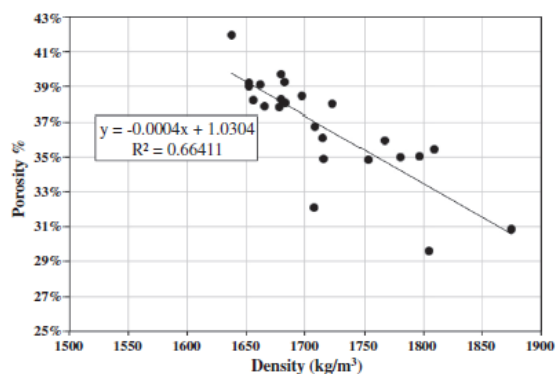
**Slika 3.14.** Veza između vlačne i tlačne čvrstoće[16]

Na slici 3.15. prikazan je učinak poroznosti na koeficijent propusnosti. Iako je uočljiva raspršenost podataka, propusnost vode općenito raste s porastom poroznosti. Najveća propusnost (0.0282 m/s) uočava se kada je poroznost veća od 39%. Autori ovoga istraživanja vjeruju da je do raspršenosti rezultata došlo zbog upotrebe mjerene poroznosti, pa bi se to moglo izbjeći upotrebom efektivne poroznosti.

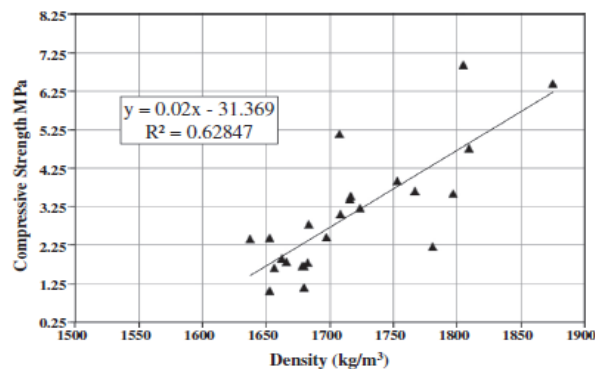


**Slika 3.15.** Utjecaj poroznosti na propusnost[16]

Osim gore navedenoga, ispitani su još i utjecaji gustoće na poroznost, kao i na tlačnu čvrstoću. Veza između gustoće i poroznosti analizirana je linearnom regresijom, a iz rezultata je vidljivo da se povećanjem gustoće smanjuje poroznost uzoraka. Za ispitani raspon gustoća linearna regresija pokazala je značajan ( $p < 0.05$ ) inverzni odnos između gustoće i poroznosti uzoraka.



Slika 3.16. Utjecaj gustoće na poroznost[16]



Slika 3.17. Utjecaj gustoće na tlačnu čvrstoću[16]

Za razliku od poroznosti, tlačna čvrstoća uzoraka pokazala je linearni porast s gustoćom što je vidljivo iz slike 3.17.

### 3.4.4. Statistička analiza rezultata

Kako bi se ispitalo značaj sadržaja cementa, vode i veličine agregata na tlačnu čvrstoću i koeficijent propusnosti poroznoga betona, proveden je model linearne regresije zajedno s analizom varijance na sljedeći način:

$$\begin{aligned} \text{Tlačna čvrstoća} = & \text{Konstanta} + a \cdot \text{sadržaj cementa} + b \cdot w/c + c \cdot \text{voda} \\ & + d \cdot \text{agregat (4.5mm)} + e \cdot \text{agregat (9.5mm)} + f \cdot \text{agregat (19.5mm)}, \end{aligned}$$

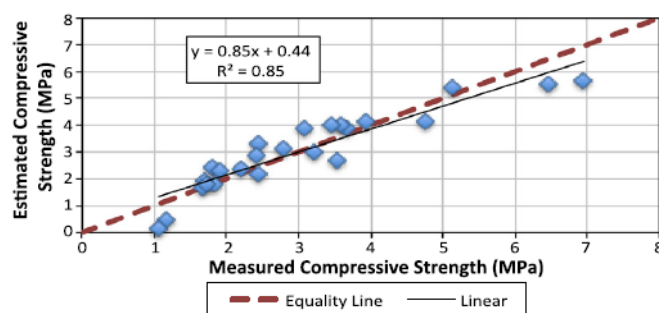
$$\begin{aligned} \text{Koeficijent propusnosti} = & \text{Konstanta} + a \cdot \text{sadržaj cementa} + b \cdot w/c + c \cdot \text{voda} \\ & + d \cdot \text{agregat (4.5mm)} + e \cdot \text{agregat (9.5mm)} + f \cdot \text{agregat (19.5mm)}, \end{aligned}$$

gdje su a, b, c, d, e i f regresijski koeficijenti.

Statistička analiza prikazana u tablici 3.13. upućuje na značajan učinak sadržaja cementa i svih triju veličina agregata na tlačnu čvrstoću uzoraka poroznoga betona jer je  $p < 0.05$ , a  $R^2 = 0.85$ . Analiza također pokazuje da povećanje sadržaja agregata smanjuje tlačnu čvrstoću jer je koeficijent negativnoga predznaka, dok povećanje količine cementa utječe na porast čvrstoće.

**Tablica 3.13.** Parametri linearne regresije tlačne čvrstoće[16]

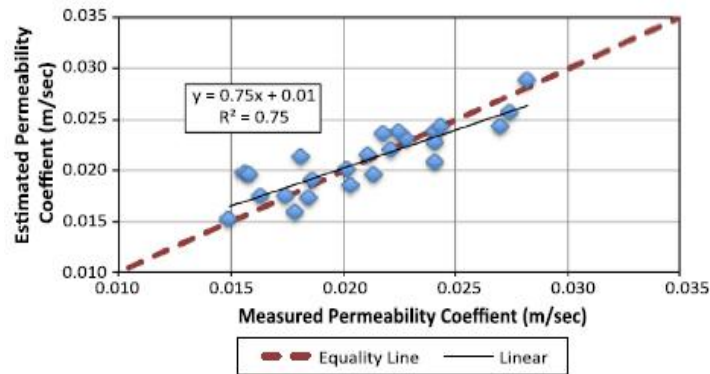
Factor	Multiplier estimate	Standard error	t-Stat	p-value
Constant	0.8967	3.6212	0.2476	0.8074
Cement content	0.7289	0.2550	2.8586	0.0109
w/c	8.1630	7.1815	1.1367	0.2714
Water	1.4418	0.7477	1.9284	0.0707
4.5 mm aggregate	-0.1824	0.0482	-3.7821	0.0015
9.5 mm aggregate	-0.1637	0.0460	-3.5573	0.0024
19.5 mm aggregate	-0.1693	0.0460	-3.6801	0.0019

**Slika 3.18.** Odnos mjerene i procijenjene tlačne čvrstoće[16]

Slična analiza za koeficijent propusnosti prikazana je u tablici 3.14. i na slici 3.19., a upućuje na to da samo sadržaj agregata veličine 19.5 mm značajno utječe na koeficijent propusnosti.

**Tablica 3.14.** Parametri linearne regresije koeficijenta propusnosti[16]

Factor	Multiplier estimate	Standard error	t-Stat	p-value
Constant	0.0114	0.0118	0.9702	0.3455
Cement content	-0.0014	0.0008	-1.7201	0.1036
w/c	0.0222	0.0233	0.9504	0.3552
Water	-0.0019	0.0024	-0.7805	0.4459
4.5 mm aggregate	0.0002	0.0002	1.2232	0.2379
9.5 mm aggregate	0.0003	0.0001	1.7307	0.1016
19.5 mm aggregate	0.0004	0.0001	2.3742	0.0296



**Slika 3.19.** Odnos procijenjenoga i mjenenoga koeficijenta propusnosti[16]

### 3.4.5. Sažetak i zaključak

U ovoj studiji ispitana su glavna svojstva poroznoga betona izrađenoga od jedne ili dviju veličina agregata, te bez sitnoga agregata. Na 24 različita uzorka ispitana je gustoća, poroznost, propusnost, tlačna čvrstoća nakon 28 dana, čvrstoća na savijanje, ali i veza među njima. Veličina agregata utjecala je na hidrološka svojstva kao što su poroznost i propusnost, a linearna regresija pokazala je dobru vezu između gustoće i poroznosti, ali i između poroznosti i propusnosti. Glavni zaključci istraživanja su:

- Prosječna gustoća poroznoga betona je  $1716 \text{ kg/m}^3$  s poroznosti od 37%.
- U usporedbi sa standardnim betonima, tlačna čvrstoća poroznoga betona je mala upravo zbog njegove visoke poroznosti.
- Prosječni koeficijent propusnosti za porozne betone proizvedene od krupnoga agregata je prosječno  $0.021 \text{ m/s}$ .
- Kao što je i očekivano, u slučaju povećanja gustoće poroznoga betona dolazi do smanjenja poroznosti i propusnosti.
- Linearna regresija upućuje na značajan učinak sadržaja cementa i agregata na tlačnu čvrstoću poroznoga betona.

## 4. EKSPERIMENTALNI DIO ISPITIVANJA SVOJSTAVA POROZNOGA BETONA

### 4.1. Uvod u eksperimentalni dio rada

Cilj ovog istraživanja je izrada poroznoga betona od laganoga agregata te ispitivanje utjecaja različitih frakcija i različite kvalitete laganoga agregata, dodatka drobljenoga agregata, granuliranoga stakla ili letećega pepela na kvalitetu poroznoga betona. Optimalnim sadržajem svih komponenti pokušala se dobiti ova vrsta betona sa zadovoljavajućom poroznošću, ali ujedno i dovoljno velikom čvrstoćom kako bi se ispunili zahtjevi za upotrebom poroznoga betona.

U tu svrhu izrađeno je sedam mješavina. Pri izradi mješavina mijenjao se udio agregata, dok je količina veziva i početni vodovezivni faktor jednak u svim mješavinama. Količina veziva iznosi  $350 \text{ kg/m}^3$ , a predviđeni vodovezivni faktor je 0.35. Međutim, prilikom miješanja betona te ispitujući konzistenciju mješavina, pojavila se potreba za korekcijom predviđene količine vode. Za neke mješavine je to značilo dodavanje manje količine vode od predviđene, a za neke veću količinu vode.

U ovom radu izrađene su sljedeće mješavine:

- $K_1$  – porozni beton od liapor laganoga agregata F9.5, frakcije 4 - 8 mm
- $K_2$  – porozni beton od liapor laganoga agregata F9.5 i drobljenoga agregata, frakcije 4 - 8 mm
- $K_3$  – porozni beton od liapor laganoga agregata F9.5, frakcije 4 - 8 mm i liaver granuliranog stakla, frakcije 1 - 2 mm
- $K_4$  – porozni beton od liapor laganoga agregata HD, frakcije 1 - 8 mm
- $K_5$  – porozni beton od liapor laganoga agregata HD, frakcije 4 - 8 mm
- $K_6$  – porozni beton od liapor laganoga agregata HD, frakcije 1 - 4 mm

- K<sub>7</sub> – porozni beton izrađen od liapor laganoga agregata F9.5, frakcije 4 - 8 mm uz dodatak letećega pepela

Nakon izrade i ispitivanja konzistencije metodom oblikovanja grudice svježega betona rukom, mješavine su ugrađene u kalupe oblika kocke, dimenzije 150x150x150 mm, te u kalup oblika valjka dimenzije 100x200 mm. Ugrađivanje se vršilo bez vibriranja kako bi se izbjegla segregacija cementne paste na dno kalupa. Umjesto toga, uzorak se pri ugradnji zbijao čeličnom šipkom.

Uzorci su njegovani 28 dana, s tim da su prva 24 sata čuvani u kalupima, a nakon toga su izvađeni iz kalupa te pohranjeni u komoru pri temperaturi  $20 \pm 2$  °C gdje su čuvani do daljnjih ispitivanja. Uzorci u kalupima oblika valjka nisu vađeni iz kalupa, čuvani su u vodi 28 dana zbog potpune saturacije uzorka prilikom ispitivanja propusnosti.

U očvrslom stanju na uzorcima je ispitano sljedeće:

- propusnost
- poroznost
- tlačna čvrstoća nakon 28 dana
- vlačna čvrstoća cijepanjem.

## **4.2. Upotrijebljeni materijali**

Pri izradi pokusnih mješavina poroznoga betona korišteni su sljedeći materijali:

- Cement CEM II/ A-S 42,5 R
- Lagani agregat Liapor F9.5 frakcije 4 - 8 mm
- Lagani agregat Liapor HD frakcija 1 - 4 mm, 4 - 8mm i 1 - 8 mm
- Drobljeni agregat frakcije 4 - 8 mm
- Granulirano staklo Liaver frakcije 1 - 2 mm
- Leteći pepeo



- Voda

#### 4.2.1. Cement

Pri izradi mješavina poroznoga betona korišten je cement CEM II/ A-S 42,5 R, portlandski cement s dodatkom zgure, sadrži 80 - 94% klinkera, te 6 - 20% visokokvalitetne zgure. Proizvođač cementa je CEMEX Hrvatska.

Karakteristike cementa su:

- visoka početna i konačna čvrstoća
- smanjena tendencija skupljanja i nastanka pukotina
- umjeren razvoj topline hidratacije
- izvrsna svojstva ugradivosti
- prikladan za kombiniranje s pigmentima
- umjerena otpornost na agresivne medije.[17]

**Tablica 4.1.** Tipična svojstva cementa 42.5 R [17]

TIPIČNA SVOJSTVA		ZAHTJEV NORME
Gubitak žarenjem	3,0 ± 0,5%	≤ 5,0
Netopivi ostatak	0,25 ± 0,05%	≤ 5,0
% SO <sub>3</sub>	3,0 ± 0,2%	≤ 4,0
Kloridi	0,03+0,02%	≤ 0,1
Vrijeme vezivanja* (početak)	170 ± 30 min	≥ 60
Rana čvrstoća (2 dana)	27 ± 2 MPa	≥ 20
Nomirana čvrstoća (28 dana)	53 ± 2 MPa	≥ 42,5; ≤ 62,5;
TIPIČAN SASTAV		ZAHTJEV NORME
Klinker (K) + gips (G)	85%	80-94
Zgura	11%	6-20
Ostalo	0-4%	0-5

\*pri temperaturi od 20°C

Zbog navedenih karakteristika preporučuje se za primjenu u cestogradnji i cestovnim građevinama, za izgradnju poslovnih, stambenih i industrijskih objekata, za podzemne radove temeljenja i podloga, te za stabilizaciju tla. Također se njegova upotreba preporučuje za izradu gotovih elemenata, za pumpani beton, za izradu morta, žbuke i ljepila, kao i za neke individualne radove. Osim navedenoga, osobito je prikladan za izradu vodonepropusnih betona, kao i onih betona koji su otporni na mraz i sol, za korištenje u umjereno agresivnim sredinama, te za betonske konstrukcije većih presjeka. [17]

Što se tiče transporta i skladištenja upotrebljenoga cementa, bitno je obratiti pozornost na sljedeće:

- transport se mora vršiti u sredstvima koja štite cement od utjecaja vlage
- prije transporta, transportna sredstva moraju biti očišćena od tvari koje mogu utjecati na kvalitetu cementa
- cement se mora skladištiti u betonskim ili čeličnim silosima koji štite cement od vanjskih utjecaja
- pri skladištenju u silose potrebno je osigurati da ne dolazi do miješanja cementa s drugim proizvodima
- uz pravilan transport i skladištenje, cement je potrebno upotrijebiti najkasnije 6 mjeseci nakon isporuke. [17]

#### **4.2.2. Lagani agregat liapor F9.5**

Prirodno čista i oko 180 milijuna godina stara Lias - glina je kvalitetna sirovina za Liapor proizvode. U Liapor proizvodnom procesu prirodna sirovina gline se melje, miješa i oblikuje u sitne kuglice koje su nakon toga podvrgnute tehnološkom procesu pečenja na temperaturi od 1100 - 1200°C. Pritom sagorijevaju organski sastojci gline, a kuglice ekspandiraju.[18]

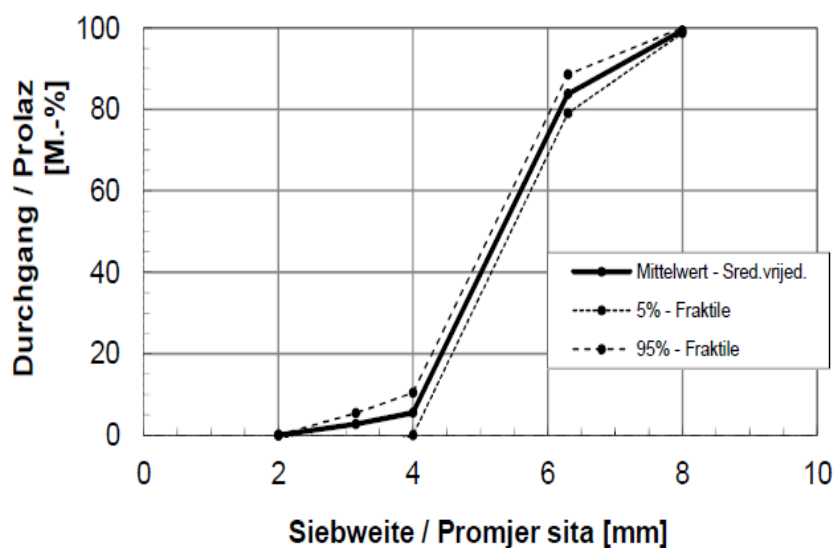
Težina, veličina, kao i tvrdoća kuglica, koje su porozne za zrak, mogu se vrlo točno kontrolirati u tehnički usavršenom procesu. Liapor kuglice manje su težine i postižu tvrdoću jezgre veću od optimalne, te tako proizveden lagani agregat ima visoku tlačnu čvrstoću i stoga

je idealan sastojak laganih betona. Zbog svoje strukture zatvorenih pora Liapor kuglice imaju visoka svojstva kao toplinski izolator i istovremeno kao akumulator topline.[18] Zbog dobre sposobnosti difuzije vodene pare, Liapor kuglice od ekspanzirane gline djeluju kao regulator vlage i tako stvaraju ugodnu klimu u prostoriji.

Liapor proizvodi ne samo da imaju odlične učinke, već su potpuno otporni i na vanjska djelovanja.[19] Liapor je nezapaljiv i negoriv građevni materijal koji se prema standardu Ö-Norm B 3806 svrstava u najviši razred gorivosti A1 s gotovo neograničenim vijekom trajanja.[18]

Osim toga, Liapor proizvodi otporni su i na smrzavanje. Zbog utjecaja tehnološki visokih temperatura u proizvodnji, ostatak vlage je vrlo malen, te je Liapor proizvode moguće ugrađivati i kod izuzetno niskih temperatura, onih koje su daleko niže od 0°C.[19]

Osnovna svojstva i granulometrijska krivulja Liapora frakcije 4 – 8 mm prikazana su na slici 4.1., odnosno u tablici 4.2.



**Slika 4.1.** Granulometrijska krivulja Liapora F9.5 frakcije 4 - 8 mm[20]

**Tablica 4.2.** Osnovna svojstva Liapora F9.5 frakcije 4 - 8 mm[20]

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	%

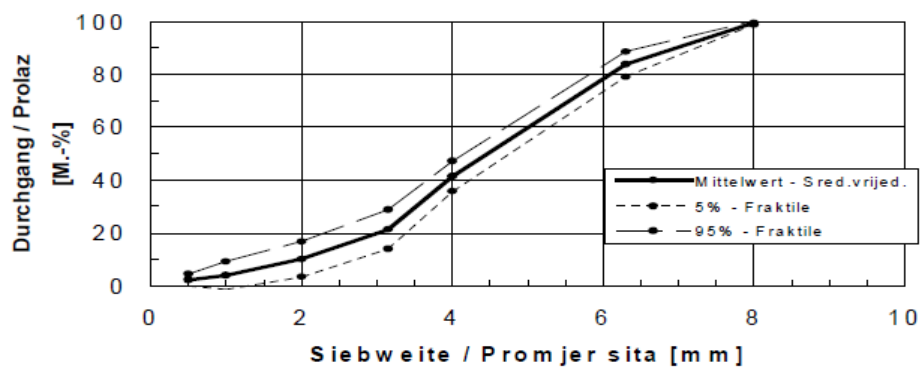
### 4.2.3. Lagani agregat liapor HD

Lagani agregat liapor HD frakcije 1 - 8 mm prosijavanjem je razdvojen na frakcije 1-4 mm i 4 - 8 mm. Prosijavanje se vršilo strojno.



Slika 4.2. Strojno prosijavanje Liapora

Granulometrijska krivulja i osnovna svojstva laganoga agregata liapor HD frakcije 1 - 8 mm prikazana su na slici 4.3., odnosno u tablici 4.3.



Slika 4.3. Granulometrijska krivulja Liapora HD frakcije 1-8 mm[20]

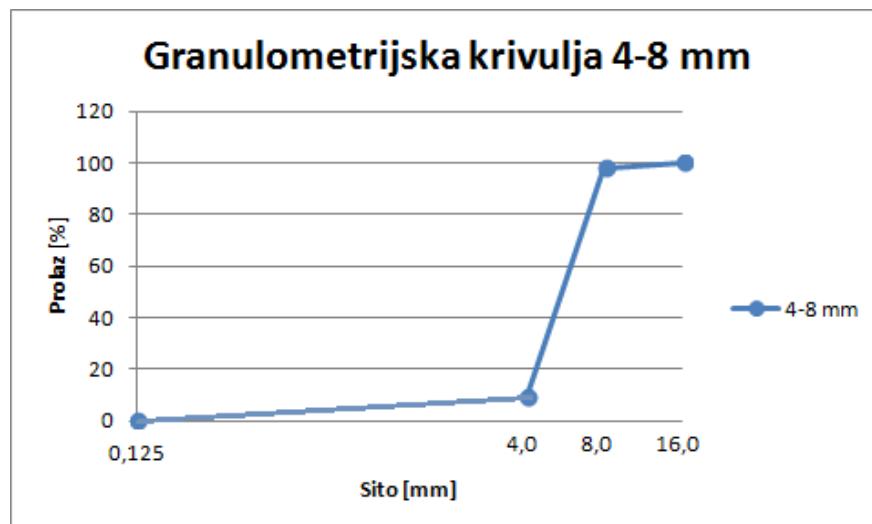
**Tablica 4.3.** Osnovna svojstva Liapora HD frakcije 1-8 mm

Osnovne osobine	Vrsta materijala	Ekspandirana glina	
	Oblik zrna	Okruglo	
Geometrijske osobine	Granulometrijska grupa	1 - 8	mm
	Sitne čestice (<0,063 mm)	< 1,0	M.-%
Fizikalne osobine	Nasipna gustoća	750 ± 25	kg/m <sup>3</sup>
	Specifična gustoća	1200 ± 50	kg/m <sup>3</sup>
	Upijanje vode w <sub>30</sub> (30 min)	6 ± 4	M.-%
	Upijanje vode w <sub>60</sub> (60 min)	8 ± 4	M.-%
	Upijanje vode w <sub>24</sub> (24 sata)	11 ± 4	M.-%
	Tvrdoća zrna (rasuto)	> 5,0	MPa
	Postojanost na smrzavanje	< 4,0	M.-%
Kemijske osobine	Kloridi	< 0,02	M.-%
	Sumporni spojevi SO <sub>3</sub>	< 0,7	M.-%
	Ukupni sumpor	< 1,0	M.-%
Kemijski sastav	SiO <sub>2</sub>	60 ± 5	%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20 ± 5	%
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10 ± 5	%
	CaO	5 ± 5	%
	Elementi u tragovima	5 ± 2	%
Ostale osobine	Razred požarnih osobina	A1	

#### 4.2.4. Drobļeni agregat frakcije 4-8 mm

Osim laganoga agregata, u jednoj mješavini upotrijebljen je i drobljeni agregat frakcije 4 - 8 mm.

Nalazište agregata je Klis- Kosa. Na slici 4.4. prikazana je granulometrijska krivulja upotrebljenoga agregata frakcije 4 - 8 mm.



**Slika 4.4.** Granulometrijska krivulja agregata

U tablici 4.4. prikazana je nasipna gustoća agregata frakcije 4 - 8 mm.

**Tablica 4.4.** Nasipna gustoća agregata frakcije 4 - 8 mm

Veličina zrna	(mm)	4-8
Masa	(g)	10682,2
Volumen	(cm <sup>3</sup> )	7073
Nasipna gustoća	(g/cm <sup>3</sup> )	1,51

#### 4.2.5. Granulirano staklo Liaver

Zahvaljujući patentiranom procesu, Liaver proizvodi staklene granule od visokokvalitetnoga ekspaniranog stakla. Prethodno obrađeno staklo se melje, miješa, a zatim se oblikuje.

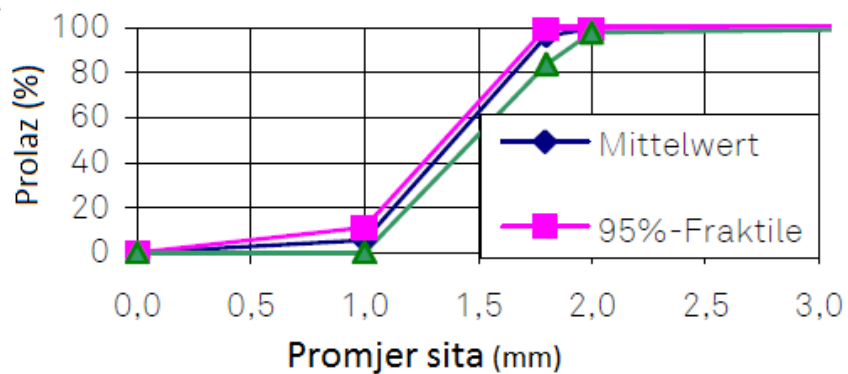
Sirove granule zatim se sinteriraju u posebnoj peći pri temperaturama u rasponu između 750° i 900°C, a konačni proizvod je granulirano staklo proizvedeno ekološki prihvatljivim procesom.[21]

Ekspandirano staklo Liaver nudi izvrsnu kemijsku otpornost, a ujedno je i vrlo lagan materijal koji se odlikuje visokim stupnjem mehaničke čvrstoće. Prikladan je za upotrebu kod poravnavanja u vezanom, ali i u nevezanom obliku.[22]



**Slika 4.5.** Granulirano staklo Liaver

Osnovna svojstva granuliranoga stakla Liavera i granulometrijska krivulja istog prikazane su u tablici 4.5., odnosno na slici 4.6.



**Slika 4.6.** Granulometrijska krivulja Liaver ekspandiranoga stakla



**Tablica 4.5.** Osnovna svojstva granuliranoga stakla Liavera

Osnovne osobine	Vrsta materijala	Ekspandirano staklo	
	Oblik zrna	Ovalno	
Geometrijske osobine	Granulometrijska grupa	1 – 2	mm
	Sitne čestice (<0,063 mm)	< 1,0	M.-%
Fizikalne osobine	Nasipna gustoća	220 ± 15	kg/m <sup>3</sup>
	Specifična gustoća	220 ± 15	kg/m <sup>3</sup>
	Tvrdoća zrna	3,0±10	MPa
Kemijske osobine	Kloridi	< 0,01	M.-%
	Sadržaj topivih sulfata	< 0,1	M.-%
	Ukupni sumpor	< 0,1	M.-%
Kemijski sastav	SiO <sub>2</sub>	71 ± 2	%
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2 ± 0,3	%
	Na <sub>2</sub> O	13±1	%
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,5 ± 0,2	%
	CaO	8 ± 2	%
	MgO	2±1	%
	K <sub>2</sub> O	1±0,2	%
	Elementi u tragovima	<0,5	%
Ostale osobine	Razred požarnih osobina	A1	

#### 4.2.6. Leteći pepeo

Leteći pepeo je prema postanku industrijski mineralni dodatak, a prema svojstvu spada u pucolane jer aktivno sudjeluje u procesu hidratacije cementa. Nastaje kao sporedni proizvod u modernim termoelektranama koje imaju pogon na ugljen i koji mora prethodno biti samljeven. Dakle, leteći pepeo je fini prah koji se uglavnom sastoji od čestica sferičnoga oblika, dobiven izgaranjem ugljene prašine, uz eventualno sporedne materijale za izgaranje. Leteći pepeo poboljšava svojstva betona na dva načina:

- Fizikalnim efektom povezanim s povišenjem udjela finih čestica - čestice letećih pepela manje su nego čestice cementa
- Pucolanskim i/ili hidrauličkim reakcijama.[23]

Dosadašnje studije pokazale su da je utjecaj letećega pepela na cementni kompozitni materijal izuzetno dobar i poželjan pogotovo ako je riječ o cementima koji imaju svoju primjenu u agresivnim medijima, tj. medijima u kojima su prisutni sulfati i kloridi.[24]

Osim toga, leteći pepeo smanjuje potrebu za vodom i izdvajanje vode, poboljšava obradivost i nepropusnost, te usporava oslobađanje topline hidratacije.[23] Negativna karakteristika ovakvih cementnih kompozitnih materijala je njihova niska, rana, mehanička čvrstoća, a veliki udio letećega pepela može uzrokovati da mješavina bude vrlo kohezivna i na taj način otporna na tečenje.



**Slika 4.7.** Leteći pepeo

Veličina čestica letećega pepela varira od  $1\mu\text{m}$  pa sve do  $100\mu\text{m}$ , pri čemu je veličina čestica manja od  $20\mu\text{m}$ , a samo 10% do 30% čestica ima veličinu veću od  $45\mu\text{m}$ . Nasipna gustoća letećeg pepela bez zbijanja kreće se u rasponu od  $540\text{--}860\text{ kg/m}^3$ , dok je je taj raspon kod zbijanja ili vibriranja od  $1120\text{--}1500\text{ kg/m}^3$ . [25]

#### **4.2.7. Voda**

Prilikom pripravljanja mješavina poroznoga betona upotrijebljena je pitka voda iz vodovoda pa nisu bila potrebna dodatna ispitivanja kvalitete.

### 4.3. Izrada mješavina poroznoga betona

U svrhu ovog istraživanja izrađeno je 7 mješavina različitoga sastava, a udio pojedinih materijala prikazan je u tablicama od 4.7. do 4.20.. Mješavine su izrađene u laboratoriju Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu. Na temelju dosadašnjih iskustava [26] pri izradi poroznoga betona mješavine nisu vibrirane kako ne bi došlo do segregacije cementne paste na dno kalupa.



**Slika 4.8.** Ugrađivanje uzoraka u kalupe

Umjesto toga, uzorci su se ugrađivali u tri sloja. Svaki sloj je nabijan s po 25 udaraca čeličnom šipkom pri čemu se pazilo da šipka ne udara prejako u dno kalupa prilikom ugrađivanja prvoga sloja i da ne ulazi preduboko u prethodne slojeve prilikom ugradnje ostalih slojeva. Ovakvim načinom ugradnje segregacija je u potpunosti izbjegnuta.

Vodocementni faktori, ovisno o mješavinama, variraju od 0.25 do 0.49, ponajviše zbog velike apsorpcije laganoga agregata koja može varirati i dosegnuti i preko 12 % (tablica 4.2 i 4.3.).

**Tablica 4.6.** Vodocementni faktori

Oznaka mješavine	Vodocementni faktor (w/c)
K <sub>1</sub>	0,45
K <sub>2</sub>	0,39
K <sub>3</sub>	0,35
K <sub>4</sub>	0,47
K <sub>5</sub>	0,25
K <sub>6</sub>	0,26
K <sub>7</sub>	0,49

### 4.3.1. Mješavina K1

U tablici 4.7. prikazana je receptura za mješavinu K<sub>1</sub>. Proračunata je količina za izradu 1m<sup>3</sup> betona. Mješavina je izrađena od cementa, vode i Liapor laganoga agregata F9.5 frakcije 4 - 8 mm.

**Tablica 4.7.** Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu K<sub>1</sub>

SASTOJAK	MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOJA r [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 20 lit. [kg]
CEMENT	350	3,10	113	7,00
VODA	123	1,00	123	2,45
V/C 0,35				
DODACI BETONU				
- 0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
- 0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
- 0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
ZRAK [%] 21,0	0,00	0,00	210	0
Liapor 4/8 F9.5	943	1,70	555	18,86
Klis kosa 4/8	0	2,68	0	0,00
UKUPNO	1415		1000	28,31

**Tablica 4.8.** Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Volumni udio		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
Liapor 4/8 F9.5	100	943	5,00	47,14	2,00	18,86	914,53	18,29
Klis kosa 4/8	0	0	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		350					350	7,00
VODA		123		47,14		18,9	151	3,02

Nakon izrade mješavine, ispitivanjem konzistencije, utvrđeno je da je potrebno dodati 143.4 g vode pa je realni vodocementni faktor mješavine  $w/c = 0,45$ .

### 4.3.2. Mješavina K2

U tablici 4.9. prikazana je receptura za mješavinu K<sub>2</sub>. Proračunata je količina za izradu 1m<sup>3</sup> betona. Mješavina je izrađena od cementa i vode te Liapor laganoga agregata F9.5 i drobljenog agregata frakcije 4 - 8 mm u volumnom omjeru 50/50.

**Tablica 4.9.** Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu K<sub>2</sub>

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOJA r [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 20 lit. [kg]
CEMENT		350	3,10	113	7,00
VODA		123	1,00	123	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
Liapor 4/8 F9.5		471	1,70	277	9,43
Klis kosa 4/8		743	2,68	277	14,86
UKUPNO		1687		1000	33,74

**Tablica 4.10.** Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Volumni udio		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
Liapor 4/8 F9.5	50	471	5,00	23,57	2,00	9,43	457,27	9,15
Klis kosa 4/8	50	743	1,25	9,29	0,25	1,86	735,73	14,71
DODACI BETONU								
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		350					350	7,00
VODA		123		32,86		11,3	144	2,88

Nakon izrade mješavine preostalo je 149.0 g vode pa je realni vodocementni faktor mješavine  $w/c = 0,39$ .

### 4.3.3. Mješavina K3

U tablici 4.11. prikazana je receptura za mješavinu K<sub>3</sub>. Proračunata je količina za izradu 1m<sup>3</sup> betona. Mješavina je izrađena od cementa i vode te Liapor laganoga agregata F9.5 frakcije 4 - 8 mm i Liaver granuliranoga stakla frakcije 1 - 2 mm u volumnom omjeru 80/20 .

**Tablica 4.11.** Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu K<sub>3</sub>

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOJA r [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 20 lit. [kg]
CEMENT		350	3,10	113	7,00
VODA		123	1,00	123	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
Liapor 4/8 F9.5		754	1,70	444	15,09
Liaver 1/2		39	0,35	111	0,78
UKUPNO		1266		1000	25,31

**Tablica 4.12.** Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Volumni udio		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
Liapor 4/8 F9.5	80	754	5,00	37,71	2,00	15,09	731,62	14,63
Liaver 1/2	20	39	0,00	0,00	0,00	0,00	38,82	0,78
DODACI BETONU								
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		350					350	7,00
VODA		123		37,71		15,1	145	2,90

Pri izradi ove mješavine nije bilo potrebno dodavati dodatnu količinu vode pa je vodocementni faktor ostao isti, w/c=0.35.

#### 4.3.4. Mješavina K4

U tablici 4.13. prikazana je receptura za mješavinu K<sub>4</sub>. Proračunata je količina za izradu 1 m<sup>3</sup> betona. Mješavina je izrađena od cementa, vode i Liapor laganoga agregata HD frakcije 1 - 8 mm.

**Tablica 4.13.** Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu K<sub>4</sub>

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOJA r [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 20 lit. [kg]
CEMENT		350	3,10	113	7,00
VODA		123	1,00	123	2,45
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
Liapor 1/8 HD		666	1,20	555	13,31
-		0	2,68	0	0,00
UKUPNO		1138		1000	22,76

**Tablica 4.14.** Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Volumni udio		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
Liapor 1/8 HD	100	666	8,00	53,24	8,00	53,24	665,52	14,64
-	0	0	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		350					350	7,70
VODA		123		53,24		53,2	123	2,70

Nakon izrade mješavine, ispitivanjem konzistencije, utvrđeno je da je potrebno dodati 936.6 g vode pa je realni vodocementni faktor mješavine  $w/c = 0,47$ .

### 4.3.5. Mješavina K5

U tablici 4.15. prikazana je receptura za mješavinu K<sub>5</sub>. Proračunata je količina za izradu 1m<sup>3</sup> betona. Mješavina je izrađena od cementa, vode i Liapor laganoga agregata HD frakcije 4 - 8 mm.

**Tablica 4.15.** Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu K<sub>5</sub>

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOJA r [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 25 lit. [kg]
CEMENT		350	3,10	113	8,75
VODA		123	1,00	123	3,06
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
Liapor 4/8 HD		666	1,20	555	16,64
-		0	2,68	0	0,00
UKUPNO		1138		1000	28,45

**Tablica 4.16.** Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Volumni udio		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	25 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
Liapor 4/8 HD	100	666	8,00	53,24	8,00	53,24	665,52	16,64
-	0	0	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		350					350	8,75
VODA		123		53,24		53,2	123	3,06

Nakon izrade mješavine preostalo je 870.5 g vode pa je realni vodocementni faktor mješavine  $w/c = 0,25$ .



### 4.3.6. Mješavina K<sub>6</sub>

U tablici 4.17. prikazana je receptura za mješavinu K<sub>6</sub>. Proračunata je količina za izradu 1m<sup>3</sup> betona. Mješavina je izrađena od cementa, vode i Liapor laganoga agregata HD frakcije 1 -4 mm.

**Tablica 4.17.** Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu K<sub>6</sub>

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOJA r [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 25 lit. [kg]
CEMENT		350	3,10	113	8,75
VODA		123	1,00	123	3,06
V/C	0,35				
DODACI BETONU					
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
Liapor 1/4 HD		666	1,20	555	16,64
-		0	2,68	0	0,00
UKUPNO		1138		1000	28,45

**Tablica 4.18.** Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Volumni udio		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	25 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
Liapor 1/4 HD	100	666	8,00	53,24	8,00	53,24	665,52	16,64
-	0	0	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		350					350	8,75
VODA		123		53,24		53,2	123	3,06

Nakon izrade mješavine preostalo je 793.6 g vode pa je realni vodocementni faktor mješavine  $w/c=0,26$ .

### 4.3.7. Mješavina K7

U tablici 4.19. prikazana je receptura za mješavinu K<sub>7</sub>. Proračunata je količina za izradu 1m<sup>3</sup> betona. Mješavina je izrađena od cementa, vode i Liapor laganoga agregata F9.5 frakcije 4 - 8 mm uz dodatak letećega pepela.

**Tablica 4.19.** Proračun sastava betona za pokusnu mješavinu K<sub>7</sub>

SASTOJAK		MASA ZA 1 m <sup>3</sup> [kg]	GUSTOJA r [kg/dm <sup>3</sup> ]	VOLUMEN ZA 1 m <sup>3</sup> [dm <sup>3</sup> ]	MASA ZA 20 lit. [kg]
CEMENT		250	3,10	81	5,00
VODA		123	1,00	123	2,45
V/C	0,49				
DODACI BETONU					
Leteći pepo	40,00	100,00	2,20	45,455	2,0000
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
-	0,00	0,00	1,10	0,000	0,0000
ZRAK [%]	21,0	0,00	0,00	210	0
Liapor 4/8 F9.5		920	1,70	541	18,41
Klis kosa 4/8		0	2,68	0	0,00
UKUPNO		1393		1000	27,86

**Tablica 4.20.** Korekcija za apsorpciju i vlažnost agregata

SASTOJAK	Volumni udio		KOREKCIJA ZA:				KORIGIRANA MASA ZA:	
			APSORPCIJU		VLAŽNOST		1 m <sup>3</sup>	20 lit.
FRAKCIJA	%	kg	%	kg	%	kg	kg	kg
Liapor 4/8 F9.5	100	920	5,00	46,02	2,00	18,41	892,77	17,86
Klis kosa 4/8	0	0	1,25	0,00	0,25	0,00	0,00	0,00
DODACI BETONU								
Leteći pepo		100,00					100,00	2,0000
-		0,00					0,00	0,0000
-		0,00					0,00	0,0000
CEMENT		250					250	5,00
VODA		123		46,02		18,4	150	3,00

U ovu mješavinu nije bilo potrebno dodavati dodatne količine vode pa je vodocementi faktor  $w/c = 0,49$ .

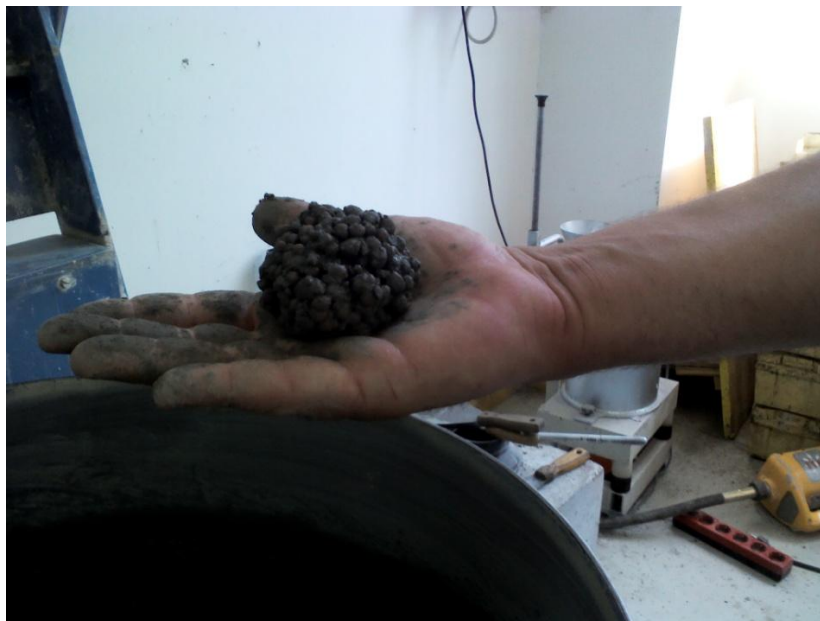
## 4.4. Metode ispitivanja poroznog betona

Kako bi ispitali svojstva poroznoga betona, na uzorcima su se vršila ispitivanja u svježem i u očvrslom stanju. Sva ispitivanja su izvršena u laboratoriju Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu. U svježem stanju ispitivala se njegova konzistencija, dok se u očvrslom stanju ispitivala:

- 1) poroznost
- 2) propusnost
- 3) tlačna čvrstoća
- 4) vlačna čvrstoća cijepanjem.

### 4.4.1. Ispitivanje konzistencije

Konzistencija poroznoga betona ispitivala se pri samoj izradi mješavina metodom oblikovanja grudice svježeg betona rukom.



**Slika 4.9.** Ispitivanje konzistencije metodom oblikovanja grudice

Zahvaćena je manja količina mješavine i od nje je oblikovana kuglica koja je promatrana na raširenom dlanu. Ako kuglica zadržava svoj oblik, ne odvajaju se zrna i ne izdvaja se cementno mlijeko, konzistencija mješavine je zadovoljavajuća.

Na temelju ove metode pratila se i količina vode potrebna za izradu mješavine, pa je u nekim mješavinama bilo potrebno dodati više od proračunate količine vode, dok je kod nekih trebalo dodati manje.

#### 4.4.2. Ispitivanje poroznosti

Poroznost betona ispitivala se na uzorcima oblika kocke dimenzija 150x150x150 mm. Ispitivala se nakon što su svi uzorci proveli barem 7 dana u komori za njegu betona. Prvo je izmjerena masa uzoraka potopljenih u vodi, a zatim, nakon 24 sata sušenja do stalne mase na temperaturi od 100°C, izmjerena je masa suhih uzoraka.



**Slika 4.10.** Uređaj za sušenje uzoraka



**Slika 4.11.** Vaganje uzoraka potopljenih u vodi

Znajući te podatke, kao i gustoću vode te volumen uzorka, lako možemo izračunati poroznost. Poroznost uzorka izračunata je prema:

$$P = 1 - \left( \frac{W_1 - W_2}{\frac{\rho_w}{V}} \right) \cdot 100\%$$

gdje je:

P- ukupna poroznost betona [%]

$W_1$ -masa uzorka na zraku [kg]

$W_2$ - masa uzorka potopljenoga u vodi [kg]

$\rho_w$ - gustoća vode [kg/m<sup>3</sup>]

V- volumen uzorka [mm<sup>3</sup>].

#### 4.4.3. Ispitivanje propusnosti

Propusnost uzorka poroznoga betona ispitana je nakon što su svi uzorci postigli starost od minimalno 7 dana. Ispitana je na uzorcima oblika valjka dimenzije 100x200 mm. Svi

uzorci držani su u vodi do trenutka ispitivanja kako bi bili u potpunosti saturirani vodom. Na taj način anuliran je otpor koji zrak u porama pruža tečenju vode.

Propusnost poroznoga betona ispitana je dvjema metodama:

- 1) metodom stalne razine stupca vode
- 2) metodom padajuće razine stupca vode.

#### 4.4.3.1. Metoda stalne razine stupca vode

Metoda stalne razine stupca vode, odnosno metoda s konstantnim padom potencijala, služi za mjerenje koeficijenta propusnosti poroznih materijala. Kod ove metode uspostavlja se stacionarno strujanje vode kroz uzorak i mjeri se protok  $q$  uz konstantnu razliku hidrauličkih potencijala.



**Slika 4.12.** Ispitivanje propusnosti metodom stalne razine stupca vode

Konstantna razlika potencijala osigurava se stalnim dolijevanjem vode na vrhu uzorka jer voda kroz njih brzo struji. Protok vode se dobije mjerenje volumena vode  $V$  koja je protekla u nekom vremenskom intervalu  $\Delta t$  pa je:

$$q = \frac{V}{\Delta t}.$$

U ovom slučaju vremenski interval  $\Delta t$  iznosio je 30 sekundi.

Primjenom Darcyevog zakona slijedi da je:

$$k = \frac{V \cdot L}{H_g \cdot A \cdot \Delta t},$$

gdje je:

$k$ - koeficijent propusnosti [mm/s]

$V$ - volumen uzorka [mm<sup>3</sup>]

$L$ - visina uzorka [mm]

$H_g$ - razina gornje vode [mm]

$A$ - površina poprečnog presjeka uzorka [mm<sup>2</sup>]

$\Delta t$ - vremenski interval u kojem se mjeri količina vode koja je istekla [s].

#### 4.4.3.2. Metoda padajuće razine stupca vode

Metoda padajuće razine stupca vodom, odnosno metoda s promjenjivim padom potencijala, služi za mjerenje koeficijenta propusnosti kod slabo poroznih materijala. Potreba za ovom metodom javlja se zbog problema oko mjerenja vrlo malog protoka kakvi su prisutni kod slabo poroznih materijala. Kod njih je protok vode toliko mali da bi voda, koja je prošla kroz uzorak više isparila, nego što bi se sakupilo u posudi za mjerenje volumena vode koja je „izašla“ iz uzorka.



**Slika 4.13.** Mjerenje koeficijenta propusnosti metodom padajuće razine stupca vode

Kod ove metode poznata je površina vertikalne cjevčice i površina uzorka, koje su u ovom slučaju jednake. Budući da se ovdje voda ne dolijeva, razina vode u vertikalnoj cjevčici vremenom opada te se mjeri vrijeme potrebno da razina vodnoga stupca dođe sa razine gornje vode  $H_g$  do razine donje vode  $H_d$ . Koeficijent propusnosti se zatim računa kao:

$$k = \frac{2}{3} \cdot \frac{L}{t} \cdot \log \frac{H_g}{H_d},$$

gdje je:

$k$ -koeficijent propusnost [mm/s]

$L$ - visina uzorka [mm]

$t$ - vrijeme potrebno da razina vodnog stupca dođe s gornje do donje razine vode [s]

$H_g$ - gornja razina vode [mm]

$H_d$ - donja razina vode [mm].

#### 4.4.4. Mjerenje tlačne čvrstoće

Tlačna čvrstoća ispitana je nakon 28 dana od datuma spravljanja betona na uzorcima oblika kocke dimenzija 150x150x150 mm. Prvo je izvršeno vaganje uzoraka i mjerenje dimenzija kako bi se odredila gustoća, a zatim je ispitana tlačna čvrstoća. Ispitana su po tri uzorka od svake mješavine, a kao rezultat uzeta je njihova srednja vrijednost.



Ispitivanje se provelo pomoću hidrauličke preše prikazane na slici 4.14. Uzorak je postavljen između dvije čelične ploče i centriran ispod uređaja za prijenos opterećenja i potisnoga klipa preše. Opterećenje se zatim nanosilo kontinuirano s konstantnim prirastom i zabilježena je sila pri kojoj je došlo do loma uzorka. Znajući silu pri kojoj je došlo do loma, i površinu, lako možemo odrediti tlačnu čvrstoću uzorka. Tlačna čvrstoća uzorka se računa prema:

$$f_c = \frac{F}{A},$$

gdje je:

$f_c$ - tlačna čvrstoća betona [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]

F- maksimalno opterećenje pri lomu [N]

A- površina uzorka [ $\text{mm}^2$ ].



**Slika 4.14.** Hidraulička preša

Na uzorcima nisu prethodno brušene stranice te pretpostavljamo da zbog toga nije dobivena najveća moguća vrijednost tlačne čvrstoće. Kod poroznog je betona postupak brušenja površina, preko kojih se nanosi opterećenje, vrlo bitan. Zbog veličine i količine pora veća je vjerojatnost da površina nije ravna i da se opterećenje neće prenositi preko cijele površine, već preko izbočenog zrna ili nekoliko zrna agregata. Uslijed pomaka zrna agregata, preša evidentira lom uzorka. Na taj način je moguće dobiti tlačnu čvrstoću poroznoga betona, koja je manja od stvarne tlačne čvrstoće.[26]

#### 4.4.5. Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

Vlačna čvrstoća poroznoga betona ispitana je cijepanjem probnoga tijela oblika valjka. Ispitivanje je izvršeno nakon minimalno 28 dana od izrade uzoraka. Uzorci poroznog betona opterećeni su linijskim tlakom po dvjema suprotnim izvodnicama do sloma.



Slika 4.14. Preša za ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

Zabilježena je vrijednost sile pri kojoj je došlo do loma pa je vlačna čvrstoća:

$$f_{ct} = \frac{2 \cdot F}{\pi \cdot d \cdot L},$$

gdje je:

$f_{ct}$ - vlačna čvrstoća [MPa]

F- sila pri kojoj dolazi do cijepanja [N]

d- promjer uzorka [mm]

L- duljina uzorka [mm].

## 4.5. Rezultati i analiza rezultata ispitivanja

Provedena su laboratorijska ispitivanja na uzorcima svježega i očvrnulog poroznog betona. Sva ispitivanja provedena su u laboratorijskim uvjetima s opremom prema pravilima koja propisuju norme. Postupci ispitivanja provedeni su kako je opisano u poglavlju 4.4..

### 4.5.1. Ispitivanje konzistencije

Konzistenciju uzoraka poroznog betona ispitivali smo metodom oblikovanja grudice svježega betona rukom. Na taj način je korigirana i količina vode u mješavinama te su sve mješavine pokazale zadovoljavajuću konzistenciju.

Na slici 4.15. prikazano je ispitivanje konzistencije mješavine  $K_1$ . Promatranjem kuglice nije se uočilo odvajanje zrna, kao ni izdvajanje cementnog mlijeka pa je konzistencija ispitane mješavine zadovoljavajuća.



**Slika 4.15.** Ispitivanje konzistencije mješavine  $K_1$

Na slici 4.16. prikazano je ispitivanje konzistencije mješavine  $K_2$ . Promatranjem kuglice nije se uočilo izdvajanje cementnoga mlijeka, no ipak je došlo do odvajanja nekog zrna agregata. Ipak, moguće je oblikovati grudicu pa se konzistencija ispitane mješavine može smatrati zadovoljavajućom.



**Slika 4.16.** Ispitivanje konzistencije mješavine K<sub>2</sub>

Na slici 4.17. prikazano je ispitivanje konzistencije mješavine K<sub>3</sub>. Promatranjem kuglice nije se uočilo odvajanje zrna, kao ni izdvajanje cementnog mlijeka pa je konzistencija ispitane mješavine zadovoljavajuća.



**Slika 4.17.** Ispitivanje konzistencije mješavine K<sub>3</sub>

Na slici 4.18. prikazano je ispitivanje konzistencije mješavine K<sub>4</sub>. Promatranjem kuglice nije se uočilo odvajanje zrna, kao ni izdvajanje cementnoga mlijeka. Isto tako, grudicu je bilo moguće s lakoćom oblikovati pa je konzistencija ispitane mješavine zadovoljavajuća.



**Slika 4.18.** Ispitivanje konzistencije mješavine K<sub>4</sub>

Na slici 4.19. prikazano je ispitivanje konzistencije mješavine K<sub>5</sub>. Promatranjem kuglice nije se uočilo odvajanje zrna, kao ni izdvajanje cementnog mlijeka pa je konzistencija ispitane mješavine zadovoljavajuća.



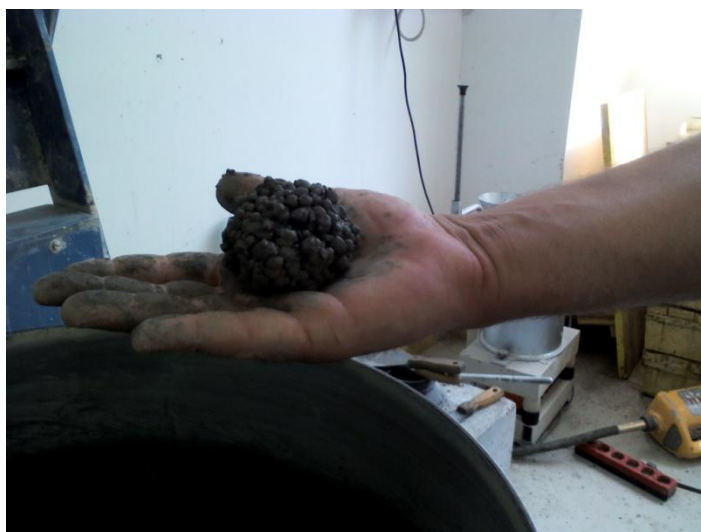
**Slika 4.19.** Ispitivanje konzistencije mješavine K<sub>5</sub>

Na slici 4.20. prikazano je ispitivanje konzistencije mješavine K<sub>6</sub>. Promatranjem kuglice nije se uočilo odvajanje zrna, kao ni izdvajanje cementnog mlijeka pa je konzistencija ispitane mješavine također zadovoljavajuća.



**Slika 4.20.** Ispitivanje konzistencije mješavine K<sub>6</sub>

Na slici 4.21. prikazano je ispitivanje konzistencije mješavine K<sub>7</sub>. Promatranjem kuglice nije se uočilo odvajanje zrna, kao ni izdvajanje cementnog mlijeka pa je konzistencija i ove mješavine zadovoljavajuća.



**Slika 4.21.** Ispitivanje konzistencije mješavine K<sub>7</sub>

**Tablica 4.21.** Konzistencije mješavina

Uzorak	Odvajanje zrna	Izdvajanje cementnog mlijeka	Konzistencija
K <sub>1</sub>	✓	✓	zadovoljavajuća
K <sub>2</sub>	✗	✓	zadovoljavajuća
K <sub>3</sub>	✓	✓	zadovoljavajuća
K <sub>4</sub>	✓	✓	zadovoljavajuća
K <sub>5</sub>	✓	✓	zadovoljavajuća
K <sub>6</sub>	✓	✓	zadovoljavajuća
K <sub>7</sub>	✓	✓	zadovoljavajuća

#### 4.5.2. Poroznost uzoraka

U tablici 4.22. prikazani su rezultati ispitivanja poroznosti uzoraka prema metodi opisanoj u poglavlju 4.4.2.. Osim poroznosti, prikazana je i gustoća uzoraka. Svi uzorci zadovoljavaju kriterijima poroznosti, a ona se kreće u rasponu od 31,5% do 45,1%. Mješavina K<sub>1</sub>, izrađena od Liapor laganoga agregata frakcije 4 - 8 mm, ima najveću poroznost, dok se najmanja poroznost javlja kod mješavine K<sub>2</sub> koja je izrađena od drobljenoga i laganog agregata frakcije 4 - 8 mm čiji je volumni omjer 50/50.

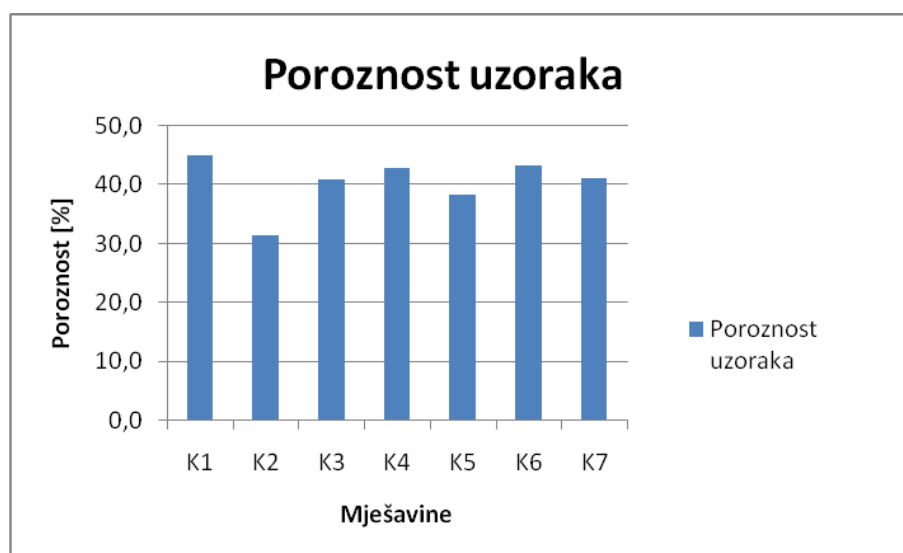
Osim toga, zanimljivo je usporediti poroznost mješavina K<sub>1</sub> i K<sub>7</sub>. Obe mješavine izrađene su od Liapor laganoga agregata frakcije 4 - 8 mm, a u mješavinu K<sub>7</sub> je dodan i leteći pepeo. Dodatkom letećega pepela poroznost mješavine se smanjila za 8,65%.

Isto tako, vidljivo je da i kvaliteta materijala od kojega su izrađene mješavine utječe na poroznost. Tome u prilog govori poroznost mješavine K<sub>5</sub> izrađene od Liapor laganog agregata HD koja je za 14,86% manja od poroznosti mješavine K<sub>1</sub> izrađene od Liapor laganog agregata F9.5.

Ako promotrimo poroznost mješavina K<sub>4</sub> i K<sub>6</sub>, možemo zaključiti da sitnije frakcije utječu na smanjenje poroznosti. Osim toga, na smanjenje poroznosti utjecao je i dodatak 20% Liaver granuliranoga stakla frakcije 1 - 2 mm u mješavini K<sub>3</sub>. Takav njegov utjecaj je očekivan jer sitnije frakcije zapunjavaju šupljine među krupnijim frakcijama agregata.

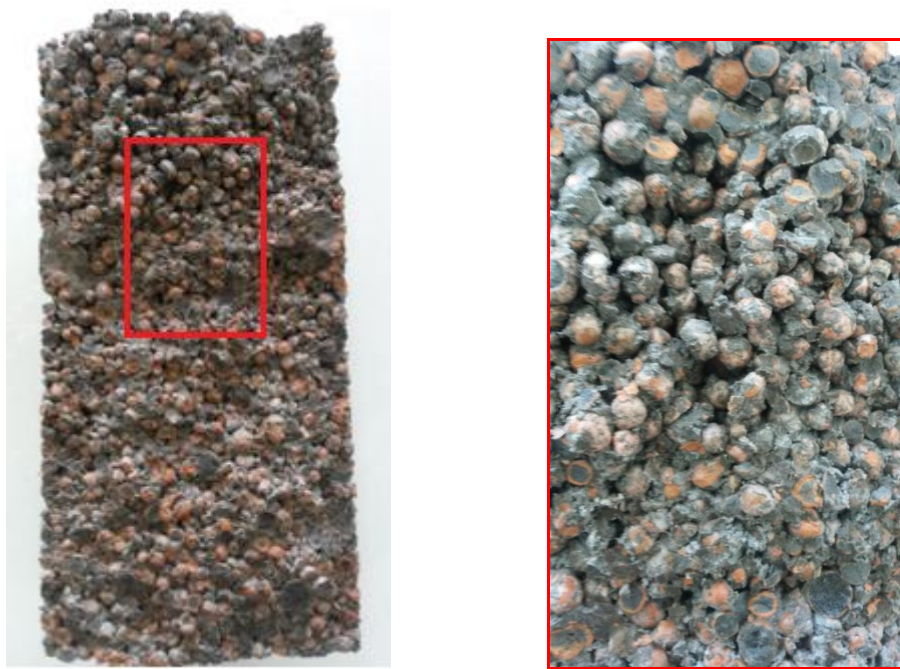
**Tablica 4.22.** Rezultati ispitivanja poroznosti

Oznaka	a	b	c	Volumen	Masa pod vodom	Masa na zraku	Poroznost	Gustoća
-	mm	mm	mm	mm <sup>3</sup>	g	g	%	kg/m <sup>3</sup>
K <sub>1</sub>	150	150	150,5	3386250	2278	4136	45,1	1221,41
K <sub>2</sub>	150	150	151,0	3397500	3221	5548	31,5	1632,97
K <sub>3</sub>	150	150	149,5	3363750	2137	4125	40,9	1226,31
K <sub>4</sub>	150	150	150,0	3375000	1930	3857	42,9	1142,81
K <sub>5</sub>	150	150	151,0	3397500	1913	4006	38,4	1179,10
K <sub>6</sub>	150	150	152,0	3420000	1908	3850	43,2	1125,73
K <sub>7</sub>	150	150	151,5	3408750	2245	4249	41,2	1246,50

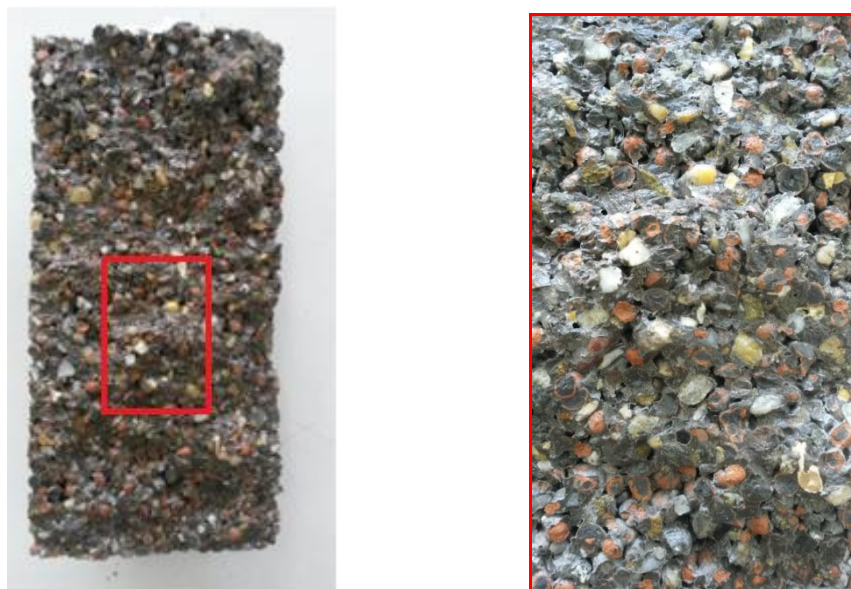
**Slika 4.22.** Poroznost uzoraka

Na slikama od 4.23. do 4.29. prikazani su presjeci svih uzoraka na kojim je vidljiva količina šupljina prisutna u pojedinim uzorcima, odnosno njihova poroznost. Kod uzoraka s manjom poroznošću uočava se zapunjenost šupljina cementnom pastom, dok to nije slučaj kod uzoraka s visokom poroznošću.





**Slika 4.23.** Mješavina K<sub>1</sub>



**Slika 4.24.** Mješavina K<sub>2</sub>



**Slika 4.25.** Mješavina K<sub>3</sub>



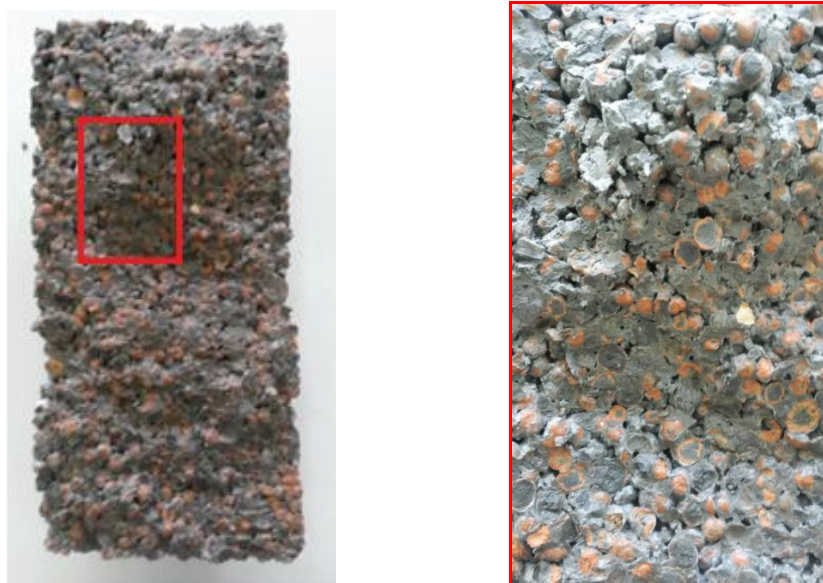
**Slika 4.26.** Mješavina K<sub>4</sub>



**Slika 4.27.** Mješavina K<sub>5</sub>

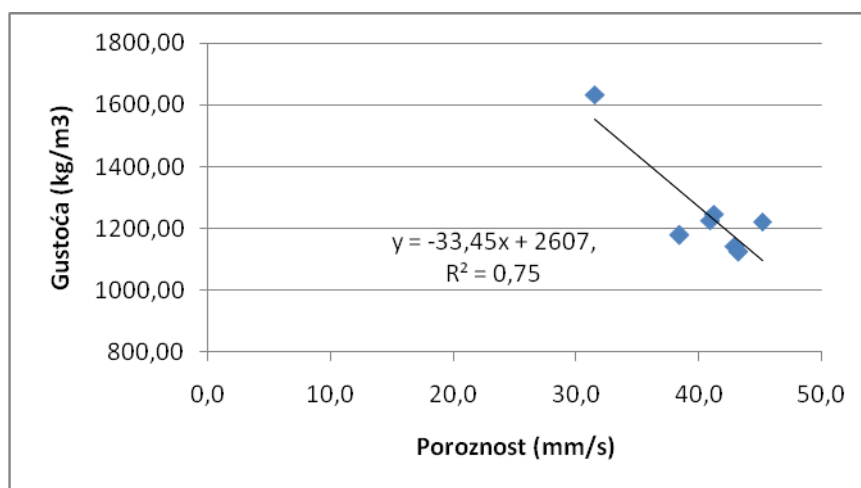


**Slika 4.28.** Mješavina K<sub>6</sub>



Slika 4.29. Mješavina K<sub>7</sub>

Također je promatrana ovisnost gustoće i izmjerene poroznosti uzoraka, a njihova veza prikazana je na slici 4.30. Veza je linearna, a iz vrijednosti  $R = 0,87$  vidljiva je dobra korelacija između jedne i druge vrijednosti. U ovom slučaju radi se o negativnoj korelaciji.



Slika 4.30. Veza između poroznosti i gustoće

### 4.5.3. Koeficijent propusnosti

Koeficijenti propusnosti za sve uzorke ispitani su prema metodi stalne i padajuće razine vodnoga stupca. Postupak provođenja obiju metoda opisan je u poglavlju 4.4.3.

Vrijednosti koeficijenata za obje metode prikazani su u tablici 4.23. Vrijednost koeficijenta  $k_1$  predstavlja koeficijent propusnosti prema metodi padajuće razine stupca, dok koeficijent  $k_2$  predstavlja koeficijent propusnosti prema metodi stalne razine stupca vode.

**Tablica 4.23.** Vrijednosti koeficijenta propusnosti po dvjema metodama

Oznaka	Uzorak			Metoda padajuće razine				Metoda stalne razine		
	Promjer	Visina	Površina	$H_g$	$H_d$	Vrijeme	$k_1$	Volumen	Vrijeme	$k_2$
-	mm	mm	mm <sup>2</sup>	mm	mm	s	mm/s	mm <sup>3</sup>	s	mm/s
K <sub>1</sub>	103	209,67	8332,3	300	100	29	7,93	2040000	30	5,70
K <sub>2</sub>	103	208,67	8332,3	300	100	91	2,52	684000	30	1,90
K <sub>3</sub>	103	206,00	8332,3	300	100	142	1,59	470000	30	1,29
K <sub>4</sub>	103	199,67	8332,3	300	100	157	1,40	465000	30	1,24
K <sub>5</sub>	103	213,00	8332,3	300	100	90	2,60	822000	30	2,33
K <sub>6</sub>	103	206,00	8332,3	300	100	2400	0,09	18000	30	0,05
K <sub>7</sub>	103	204,33	8332,3	300	100	72	3,11	972000	30	2,65

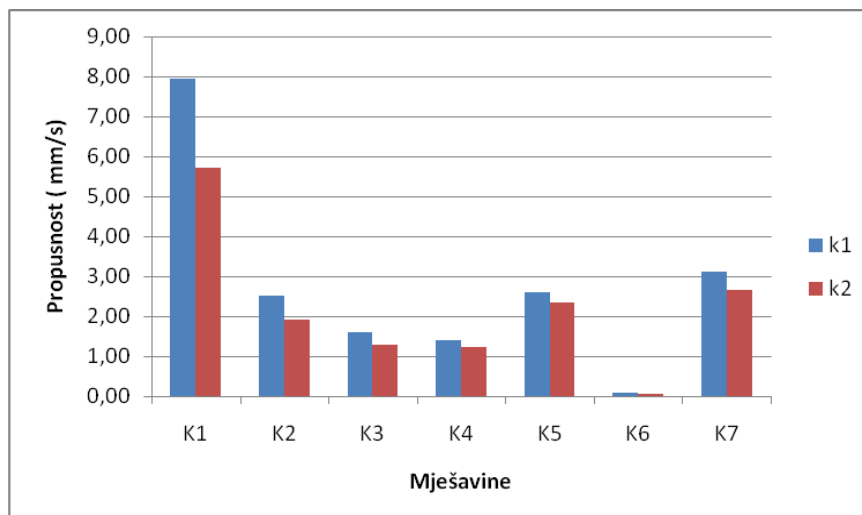
*Napomena:* Ispitivanje uzorka mješavine K<sub>6</sub> po metodi 1 prekinuto je nakon 40 min pa možemo uzeti da je koeficijent propusnosti  $k_1 \approx 0,0$  mm/s.

Vrijednosti koeficijenata propusnosti kreću se u rasponu od 0,00- 7,93 mm/s prema metodi padajuće razine stupca, a prema drugoj metodi u rasponu od 0,05- 5,70 mm/s. U usporedbi s rezultatima dobivenim u prethodnim istraživanjima [15] jasno je vidljivo da je propusnost uzoraka ispitanih u ovom istraživanju znatno manja.

Najveću vrijednost koeficijenta ima mješavina K<sub>1</sub> izrađena od Liapor F9.5 laganoga agregata frakcije 4- 8 mm, dok najmanju vrijednost ima mješavina K<sub>6</sub> izrađena od Liapor HD laganoga agregata frakcije 1 - 4 mm. Ovakve vrijednosti su se mogle očekivati za mješavinu K<sub>6</sub> upravo zbog njenoga sastava, odnosno zbog toga što je, u odnosu na ostale mješavine, izrađena od najsitnijih frakcija.

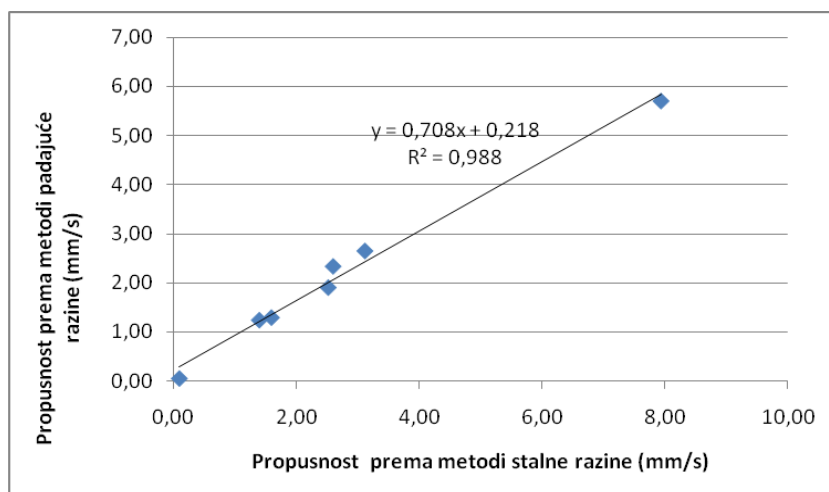
Kod mješavine K<sub>7</sub> također je vidljiv utjecaj dodatka letećega pepela na propusnost pa je tako njegova poroznost smanjena za 50 - 60 % u odnosu na mješavinu K<sub>1</sub>.

Kvaliteta materijala i kod ovog svojstva ima veliki utjecaj pa je tako poroznost mješavine K<sub>5</sub> smanjena za oko 60% u odnosu na mješavinu K<sub>1</sub>.



**Slika 4.31.** Vrijednosti koeficijenta propusnosti

Na slici 4.32. prikazana je ovisnost koeficijenta propusnosti prema metodi padajuće razine vodnog stupca  $k_1$  i koeficijenta propusnosti prema metodi stalne razine vodnoga stupca  $k_2$ . Vidljiva je linearna veza među njima s visokom vrijednosti koeficijenta korelacije ( $R=0,99$ ).



**Slika 4.32.** Ovisnost koeficijenta propusnosti  $k_1$  i  $k_2$

#### 4.5.4. Tlačna čvrstoća

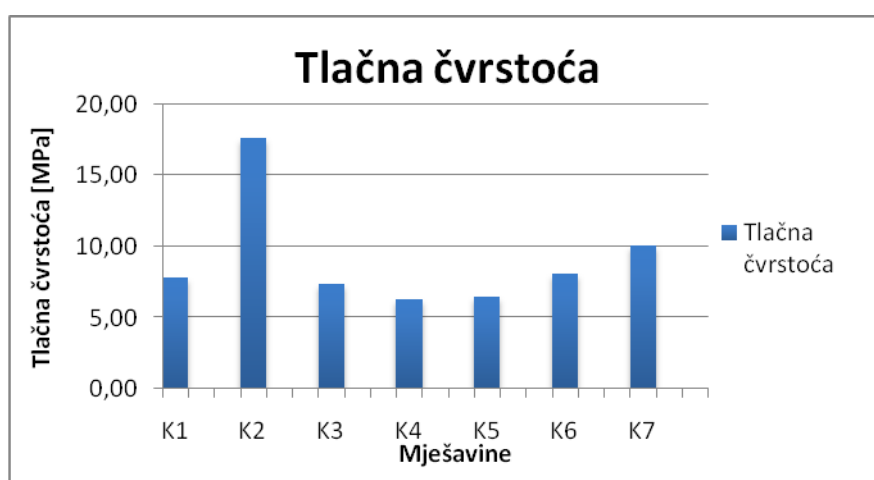
Za ispitivanje tlačne čvrstoće poroznoga betona korištena je hidraulička preša čiji je princip rada opisan u poglavlju o metodama ispitivanja poroznoga betona. U tablici 4.24. prikazani su rezultati ispitivanja tlačnih čvrstoća za tri uzorka od svake mješavine, a kao

relevantna tlačna čvrstoća uzima se njihova srednja vrijednost. Prije ispitivanja tlačne čvrstoće izmjerene su dimenzije svih uzoraka i njihova masa kako bi dobili gustoće. Rezultati svih mjerenja prikazani su u istoj tablici.

**Tablica 4.24.** Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

Oznaka	Masa [g]		Tlačna čvrstoća $f_c$ [MPa]		Sila loma F [N]		Dimenzije			Volumen mm <sup>3</sup>	Gustoća kg/m <sup>3</sup>
							a [mm]	b [mm]	c [mm]		
K <sub>1</sub>	4997	4932,00	8,6	7,80	194	175,43	150,00	150,00	151,67	3412575	1445,243
	4907		7,1		158,9						
	4892		7,7		173,4						
K <sub>2</sub>	6075	6094,67	16,7	17,67	375,1	397,17	150,00	150,00	151,00	3397500	1793,868
	6089		18,5		416,6						
	6120		17,8		399,8						
K <sub>3</sub>	5050	4968,00	8	7,37	180,6	165,87	150,00	150,00	151,50	3408750	1457,426
	4883		6,8		152,8						
	4971		7,3		164,2						
K <sub>4</sub>	4669	4662,00	6,1	6,30	136,3	141,60	150,00	150,00	150,00	3375000	1381,333
	4677		6,5		146,6						
	4640		6,3		141,9						
K <sub>5</sub>	4692	4658,33	7,2	6,47	162,8	145,67	150,00	150,00	151,00	3397500	1371,106
	4635		7,5		168,5						
	4648		4,7		105,7						
K <sub>6</sub>	4657	4776,33	6,8	8,13	153,2	182,83	150,00	150,00	151,67	3412575	1399,627
	4844		8,5		190,7						
	4828		9,1		204,6						
K <sub>7</sub>	5096	5082,67	9,9	10,10	222,1	223,03	150,00	150,00	151,17	3401325	1494,32
	5071		10		224						
	5081		10,4		223						

Promatrajući rezultate ispitanih uzoraka vidimo da se njihove tlačne čvrstoće kreću u rasponu od 6,30- 17,67 MPa. Ako te rezultate usporedimo s rezultatima dosadašnjih istraživanja, kod kojih su se vrijednosti kretale u rasponu od 11,8-19,0 MPa [14], vidljivo je da smo dobili nešto manju čvrstoću. Razlog tome je upotreba laganoga agregata, a ne drobljenoga kao što je slučaj kod dosadašnjih istraživanja [14]



**Slika 4.33.** Tlačne čvrstoće pojedinih mješavina

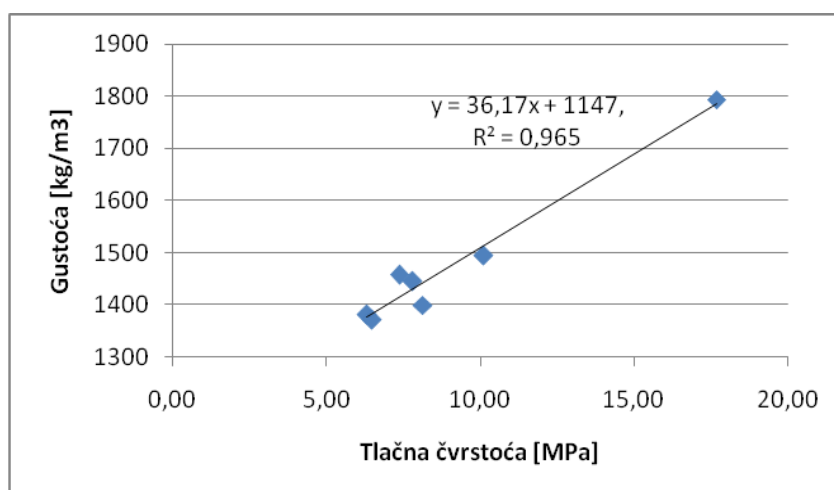
Najveću tlačnu čvrstoću ima mješavina K<sub>2</sub>, dok mješavina K<sub>4</sub> ima najmanju. Najveća vrijednost tlačne čvrstoće očekivana je kod mješavine K<sub>2</sub> upravo zbog dodatka drobljenoga agregata frakcije 4 - 8 mm koji je doziran u omjeru 50/50 u odnosu na Liapor lagani agregat frakcije 4 - 8 mm.

Usporedimo li vrijednost tlačnih čvrstoća mješavina K<sub>1</sub> i K<sub>5</sub>, koje su izrađene od Liapor laganog agregata frakcije 4-8 mm različitih kvaliteta, vidljivo je da se kod mješavine K<sub>5</sub> tlačna čvrstoća smanjila za 17%.

Osim kvalitete agregata, na tlačnu čvrstoću uzoraka utječe i dodatak primjesa. Dodatkom letećega pepela tlačna čvrstoća mješavina K<sub>7</sub> se povećala 22,77% u odnosu na mješavinu K<sub>1</sub> koja je izrađena samo s Liapor laganim agregatom frakcije 4 - 8 mm.

Mješavina K<sub>3</sub> nastala je dodatkom 20% Liaver granuliranoga stakla u mješavinu K<sub>1</sub>. Usporedimo li njihove čvrstoće, možemo zamijetiti njegov utjecaj. Naime, mješavina s dodatkom granuliranog stakla ima nešto manju tlačnu čvrstoću od mješavine K<sub>1</sub>.

Ako obratimo pozornost na mješavine K<sub>4</sub>, K<sub>5</sub> i K<sub>6</sub> izrađene od istog Liapor laganoga agregata različitih frakcija, možemo uočiti da se kod mješavina K<sub>4</sub> i K<sub>5</sub> javlja približno jednaka tlačna čvrstoća, dok je kod mješavine K<sub>6</sub> ona nešto veća. Takvi odnosi su bili očekivani zbog sitnije frakcije agregata u mješavini K<sub>6</sub>.



Slika 4.34. Veza između tlačne čvrstoće i gustoće



Na slici 4.34. prikazana je veza između tlačne čvrstoće i gustoće uzoraka. Vidljivo je da tlačna čvrstoća raste s porastom gustoće, a veza među njima je linearna s visokim koeficijentom korelacije  $R=0.98$ .

#### 4.5.5. Vlačna čvrstoća

U ovom istraživanju vlačna čvrstoća je ispitana cijepanjem, a svi rezultati prikazani su u tablici 4.25.

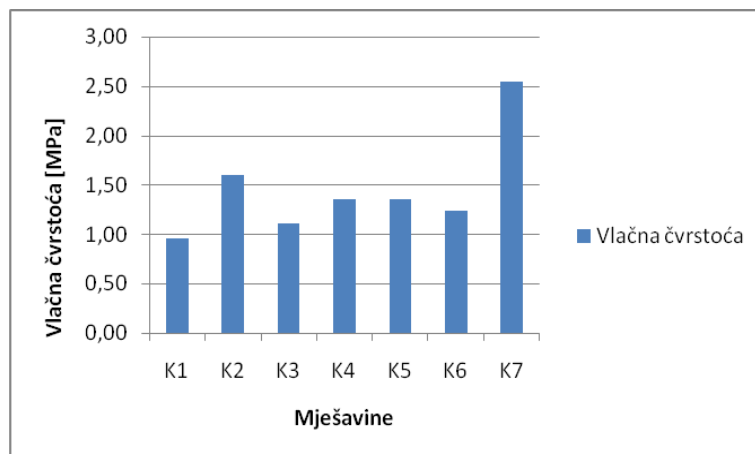
**Tablica 4.25.** Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće cijepanjem

Oznaka	Masa (g)	Promjer (mm)	Visina (mm)	Volumen (cm <sup>3</sup> )	Gustoća (kg/m <sup>3</sup> )	F (kN)	f <sub>ct</sub> (MPa)
K <sub>1</sub>	3443	113	229	2295,4	1499,9	38,7	0,95
K <sub>2</sub>	4297	113	228	2285,4	1880,2	64,8	1,60
K <sub>3</sub>	3458	113	228	2285,4	1513,1	44,9	1,11
K <sub>4</sub>	3457	113	229	2295,4	1506,0	55,2	1,36
K <sub>5</sub>	3289	114	227	2315,8	1420,2	54,8	1,35
K <sub>6</sub>	3358	113	230	2305,4	1456,6	50,4	1,24
K <sub>7</sub>	3587	113	228	2285,4	1569,5	56,7	2,54

Vrijednost vlačne čvrstoće za pojedine uzorke varira u rasponu od 0,95- 2,54 MPa. Najveća vlačna čvrstoća javlja se kod mješavine K<sub>7</sub>, a najmanja kod mješavine K<sub>1</sub> pa se iz toga može vidjeti veliki učinak letećega pepela na vlačnu čvrstoću poroznoga betona. Naime, obje mješavine izrađene su od Liapor laganoga agregata frakcije 4 - 8 mm, a razlikuju se po dodatku letećega pepela u mješavini K<sub>7</sub>.

Također je zanimljivo primijetiti da mješavine K<sub>4</sub> i K<sub>5</sub> imaju gotovo jednaku tlačnu čvrstoću bez obzira na različite frakcije agregata od kojih su izrađene.

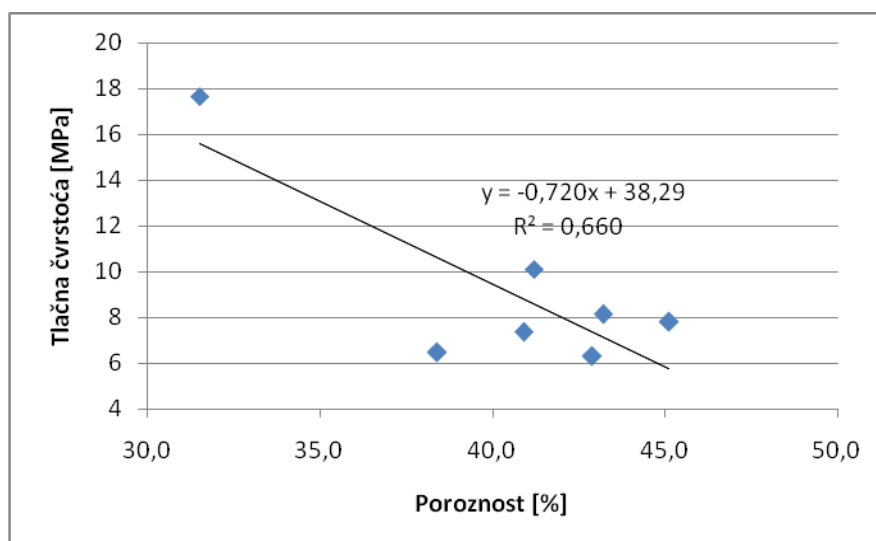
Iz prikazanih rezultata može se primijetiti kako dodatak drobljenoga agregata (mješavina K<sub>2</sub>), ali i granuliranog stakla (mješavina K<sub>3</sub>), iako u manjoj mjeri, utječu na povećanje vlačne čvrstoće uzoraka poroznoga betona. Kod mješavine K<sub>2</sub> vlačna čvrstoća je povećana za 40%, a kod mješavine K<sub>3</sub> za 14% u ovisnosti na mješavinu K<sub>1</sub>.



Slika 4.35. Vlačne čvrstoće mješavina

#### 4.5.6. Veza između poroznosti i tlačne čvrstoće

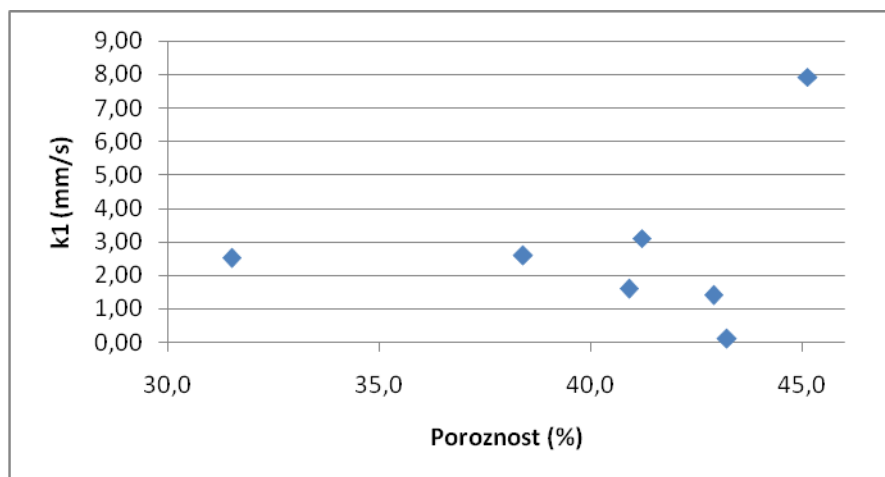
Na slici 4.37. prikazan je odnos između ukupnoga udjela šupljina, odnosno poroznosti i tlačne čvrstoće ispitanih uzoraka. Bez obzira na veličinu frakcije agregata, tlačna čvrstoća gotovo svih uzoraka smanjuje se povećanjem poroznosti. Među njima je uspostavljena linearna veza s koeficijentom korelacije  $R=0,81$ .



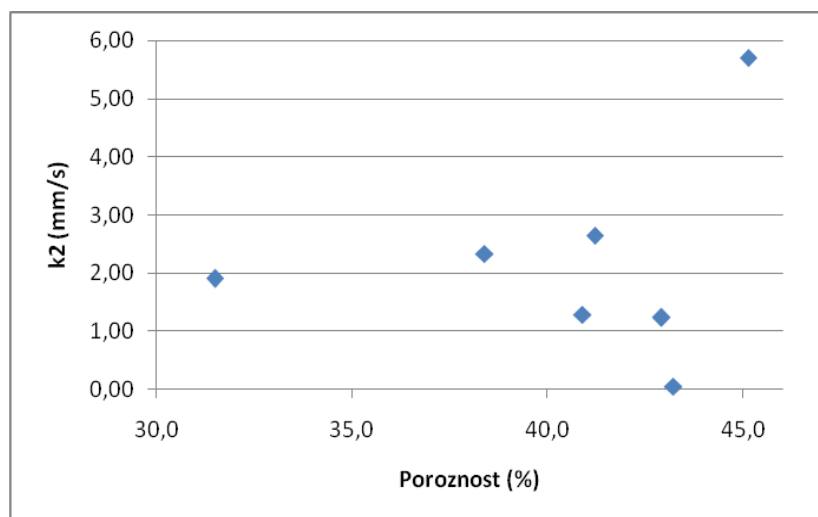
Slika 4.37. Veza između poroznosti i tlačne čvrstoće

#### 4.5.7. Veza između propusnosti i poroznosti

Na slici 4.38. prikazana je veza između koeficijenta propusnosti dobivenoga prema metodi padajuće razine vode ( $k_1$ ) i poroznosti, dok je na slici 4.39. prikazana veza između koeficijenta propusnosti dobivenoga prema metodi stalne razine vode ( $k_2$ ) i poroznosti.



Slika 4.38. Veza između  $k_1$  i poroznosti



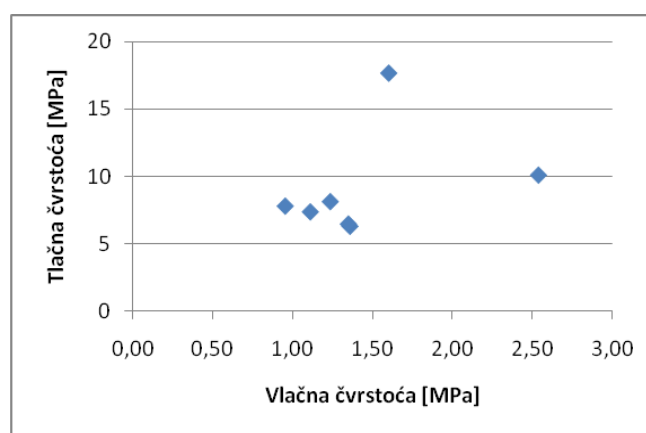
Slika 4.39. Veza između  $k_2$  i poroznosti

Iako se na slikama može uočiti velika raspršenost podataka, općenito dolazi do porasta koeficijenta propusnosti kada raste poroznost. Najveći koeficijent propusnosti  $k_1=7,93$  mm/s, ili prema drugoj metodi  $k_2=5,70$  mm/s, javlja se kada je poroznost uzorka 45,1%. Smatra se

da je do ove raspršenosti došlo zbog upotrebe ukupne poroznosti, a ne efektivne za koju se vjeruje da bi pokazala bolje rezultate.[8]

#### 4.5.8. Veza između tlačne i vlačne čvrstoće

Na slici 4.40. prikazana je veza između tlačne i vlačne čvrstoće. Iako se kod dosadašnjih ispitivanja ta veza pokazala linearnom [16], tj. došlo je do poraste vlačne čvrstoće s porastom tlačne čvrstoće, ispitani uzorci nisu pokazali takvu zakonitost.



Slika 4.40. Veza između tlačne i vlačne čvrstoće

## 5. ZAKLJUČAK

Zbog ograničenja koja se javljaju kod običnoga betona, nije moguća njihova primjena u svim situacijama, pa se iz tog razloga javlja potreba za korištenjem posebnih betona. Takvi betoni izrađeni su posebnim načinima ugradnje i recepturama kako bi se postigla svojstva koja zadovoljavaju neke posebne okolnosti. Upravo takav beton je i porozni beton koji je tema ovoga diplomskog rada.

Karakteristika toga betona je velika propusnost za vodu, koja se postiže korištenjem kontinuirane granulometrijske krivulje, te izbjegavanjem sitnijih frakcija. Za izradu poroznoga betona korišten je lagani agregat različitih frakcija i različite kvalitete, a osim toga u mješavine su dodani drobljeni agregat, granulirano staklo ili leteći pepeo. Optimalnim sadržajem komponenti pokušalo se dobiti porozni beton sa zadovoljavajućom poroznošću, ali

ujedno i dovoljno velikom čvrstoćom kako bi ispunili zahtjeve za upotrebom poroznoga betona.

U tu svrhu izrađeno je sedam različitih mješavina. Uzorci su njegovani 28 dana, s tim da su prva 24 sata bili u kalupima, a zatim su izvađeni iz kalupa i čuvani u komori pri temperaturi od  $20\pm 2^\circ$ . Ispitana su njihova svojstva u svježem i očvrslom stanju. U svježem stanju ispitana je konzistencija, dok se u očvrslom ispitala poroznost, koeficijent propusnosti, vlačna te tlačna čvrstoća.

Na temelju rezultata ispitivanja došlo se do sljedećih zaključaka:

- Ispitivanjem konzistencije ujedno se regulirala količina vode u mješavinama. Mješavine izrađene samo od laganoga agregata zahtijevale su dodatnu količinu vode, ponajviše zbog velike apsorpcije laganoga agregata koja seže i preko 12%. Sve mješavine pokazale su zadovoljavajuću konzistenciju.
- Poroznost svih uzoraka kreće se u rasponu od 31,5 - 15,1%. Najveću poroznost ima mješavina izrađena od Liapor laganoga agregata F9.5 frakcije 4 - 8 mm, dok najmanju poroznost ima mješavina izrađena od Liapor laganoga agregata F9.5 frakcije 4 - 8 mm i drobljenoga agregata iste frakcije čiji je volumni omjer 50/50. Također je uočeno da mješavine izrađene od sitnijih frakcija laganoga agregata, kao i laganoga agregata slabije kvalitete, utječu na smanjenje poroznosti. Osim toga, na smanjenje poroznosti utječe i dodatak letećega pepela, kao i granuliranoga stakla. Uočena je i linearna veza između poroznosti i gustoće, a korelacija među njima je negativna.
- Propusnost je ispitana dvjema metodama, a kreće se u rasponu od 0,09-7,93 mm/s prema metodi padajuće razine vodnoga stupca, i od 0,05-5,70 mm/s prema metodi stalne razine vodnog stupca. Najveći koeficijent propusnosti, kao i poroznost, ima mješavina izrađena od Liapor laganoga agregata F9.5 frakcije 4 - 8 mm, dok najmanju ima mješavina izrađena od Liapor laganoga agregata HD frakcije 1 - 4 mm. Uspoređujući odnos propusnosti i poroznosti, uočena je velika raspršenost podataka, ali općenito, koeficijent propusnosti raste s porastom poroznosti. Smatra se da do takve raspršenosti dolazi zbog upotrebe ukupne, a ne efektivne poroznosti.

- Tlačne čvrstoće uzoraka kreću se u rasponu od 6,30- 17,67 MPa. Kao što je i očekivano, najveću tlačnu čvrstoću ima uzorak koji je izrađen od Liapor laganoga agregata F9.5 frakcije 4 - 8 mm i drobljenoga agregata iste frakcije u omjeru 50/50. Iz rezultata smo također mogli vidjeti veliki utjecaj letećega pepela na tlačnu čvrstoću, pa se tako tlačna čvrstoća uzorka s dodatkom letećega pepela povećala 22,77% u odnosu na isti uzorak bez letećega pepela. Osim sastava pojedinih mješavina, na tlačnu čvrstoću uzoraka utječe i njihova gustoća, kao i poroznost. Porastom gustoće dolazi do porasta tlačne čvrstoće, dok se tlačna čvrstoća smanjuje s porastom poroznosti. Obje veze su linearne s visokim koeficijentima korelacije.
- Cijepanjem uzoraka dobivene su vlačne čvrstoće uzoraka u rasponu od 0,95- 2,54 MPa. Još jednom možemo uočiti veliki utjecaj letećega pepela na svojstva poroznoga betona, pa tako uzorak s letećim pepelom ima 62,6% veću vlačnu čvrstoću u odnosu na uzorak bez letećega pepela. Vlačna čvrstoća uzoraka povećana je i dodatkom drobljenoga agregata, što je i očekivano zbog veće čvrstoće drobljenoga u odnosu na laki agregat.

Tek kod dvije mješavine javlja se tlačna čvrstoća veća od 10 MPa, što se moglo i očekivati zbog laganoga agregata kao glavnoga gradivnog materijala. Kako bi se postigli rezultati koji zadovoljavaju postavljene kriterije za čvrstoću poroznog betona, potrebno je povećati udio sitnih čestica u betonu ili dodati drobljeni agregat u većem omjeru. Drugim rješenjem bi vjerojatno postigli bolje rezultate zbog smanjenja koeficijenta propusnosti do kojega bi dovelo povećanje sitnih čestica.

Ovakav beton nije pogodan za izgradnju prometnih površina, kao ni za primjenu u drenažnim slojevima prometnica upravo zbog malih vrijednosti propusnosti i tlačne čvrstoće. Međutim, zahvaljujući iznimno visokoj poroznosti, što bi trebalo osigurati dobra zvučno-izolacijska svojstva, može se koristiti za izradu zvučnih predgrada, bukobrana ili pročelja zgrada. Za ovakvu primjenu, osim ispitanih svojstava, bilo bi potrebno dodatno ispitati svojstvo apsorpcije zvuka i termičku vodljivost betona.

## LITERATURA:

- [1] M. Felja, K. Ćosić, I. Netinger: Primjena poroznog betona u kolničkim konstrukcijama, br. 7, pp. 68-75, 2013.
- [2] <http://geotechnology.com/2009/08/10/porous-pavement/>
- [3] <http://e-gfos.gfos.hr/index.php/arhiva/broj-5/clanak-6-kraus-tiric-burilo>
- [4] <http://iosrjournals.org/iosr-jmce/papers/sicete%28civil%29-volume4/47.pdf>
- [5] <http://hrcak.srce.hr/file/127819>
- [6] V. Ukrainczyk: Beton, Struktura, svojstva, tehnologija.
- [7] <http://gf.unmo.ba/resources/1/Downloads/Gradjevinski%20materijali/Beton.pdf>
- [8] P. Krstulović: Svojstva i tehnologija betona, Građevinski fakultet sveučilišta u Splitu i Institut građevinarstva Hrvatske, Split, 2000.
- [9] <http://www.slideshare.net/NikiolaZG/majcen-ivan-1>
- [10] <http://www.hamshahrionline.ir/details/171567>
- [11] <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch11/final/c11s20.pdf>
- [12] <http://www.segemar.gov.ar/bibliotecaintemin/LIBROSDIGITALES/Industrialminerals&rocks7ed/pdffiles/papers/016.pdf>
- [13] P. Chindapasirt, S. Hatanaka, T. Chareerat, N. Mishima, Y. Yuasa: Cement paste characteristics and porous concrete properties, *Construction and Building Materials* 22 (2008) pp. 894–901.
- [14] C. Lian, Y. Zhuge, S. Beecham: The relationship between porosity and strength for porous concrete, *Construction and Building Materials* 25 (2011) pp. 4294–4298.
- [15] M. Aamer Rafique Bhutta, K. Tsuruta, J. Mirza: Evaluation of high-performance porous concrete properties, *Construction and Building Materials* 31 (2012) pp. 67–73.
- [16] Ahmed Ibrahim, Enad Mahmoud, Mohammed Yamin, Varun Chowdary Patibandla: Experimental study on Portland cement pervious concrete mechanical and hydrological properties, *Construction and Building Materials* 50 (2014) pp. 524–529 .
- [17] <http://www.cemex.hr/>
- [18] <http://elkomnet.com/liapor.mk/Files/Liapor-HR%20-%20lagani%20beton%202009-07.pdf>
- [19] <http://korak.com.hr/korak-046-lipanj-2014-liapor-lagane-ispune-i-nasipi-u-stropnim-i-podnim-konstrukcijama/>

- [20] [www.liapor.hr](http://www.liapor.hr)
- [21] [http://www.liapor.com/liaver\\_e/wasist.htm](http://www.liapor.com/liaver_e/wasist.htm)
- [22] [http://www.liapor.com/en\\_schuettung/blaehglasschuettung.html](http://www.liapor.com/en_schuettung/blaehglasschuettung.html)
- [23] Okamura H.; Ouchi M.: Self- compacting Concrete, Journal of Advanced Concrete Tehnology, br. 1, pp. 5-15, 2003.
- [24] J. Mandić: Primjena letećeg pepela u pripravi geopolimera, Diplomski rad.
- [25] [http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/PCA\\_manual/Chap03.pdf](http://www.ce.memphis.edu/1101/notes/concrete/PCA_manual/Chap03.pdf)
- [26] Mrakovčić S., Čeh N., Jugovac V.: Utjecaj granulometrijskog sastava na svojstva procjdnog betona, Građevinar 66 (2014) 2 pp. 107-113.