

# Utjecaj tipa mineralnog dodatka na ponašanje mortova s kalcij aluminatnim cementom

---

Mikulić, Zdravka

Undergraduate thesis / Završni rad

2021

*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:123:115716>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-22**



*Repository / Repozitorij:*

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



UNIVERSITY OF SPLIT



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

# **ZAVRŠNI RAD**

**Zdravka Mikulić**

**Split, rujan 2021.**

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

**Utjecaj tipa mineralnog dodatka na ponašanje  
mortova s kalcij aluminatnim cementom**

**Zdravka Mikulić**

**Split, rujan 2021.**

**SVEUČILIŠTE U SPLITU**

**FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE**

Split, Matice hrvatske 15

STUDIJ: PREDDIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ  
GRAĐEVINARSTVA

KANDIDAT: Zdravka Mikulic

BROJ INDEKSA: 4661

KATEDRA: Katedra za građevinske materijale

PREDMET: Građevinski materijali 1

### **ZADATAK ZA ZAVRŠNI RAD**

Tema: Utjecaj tipa mineralnog dodatka na ponašanje mortova s kalcij aluminatnim cementom

Opis zadatka: Zadatak ovog završnog rada je prikazati utjecaj vrste mineralnog dodatka na ponašanje mortova s kalcij aluminatnim cementom. Potrebno je prikazati osnovna svojstva aluminatnog cementa, te mehanizam djelovanja mineralnog dodatka na cement. Prikazati karakteristike materijala i relevantne metode ispitivanja koje su korištene u radu. Eksperimentalno ispitati mješavine morta sastavljene od kalcij aluminatnog cementa, vode, pijeska i različitog tipa mineralnog dodatka. Sve rezultate prikazati tablično i grafički, te dati najvažnije zaključke istraživanja.

U Splitu, 31.03.2021.

Voditelj Završnog rada:

doc.dr.sc. Goran Baloević

## **Utjecaj tipa mineralnog dodatka na ponašanje mortova s kalcij aluminatnim cementom**

### **Sažetak**

Mort je homogena smjesa veziva, vode, agregata i raznih dodataka. Da bi mu se poboljšala tražena svojstva, dodaju se razni dodaci za koje postoji ekonomska ili tehnička opravdanost. U općem dijelu rada su detaljno opisane sve komponente morta i njihov utjecaj na cementne kompozite, a posebna pažnja je obraćena na aluminatni cement kao referentnu točku ovog rada. U eksperimentalnom dijelu rada analizirani su rezultati ispitivanja mortova od kalcij aluminatnog cementa s mineralnim dodacima u odnosu na isti mort bez dodataka. Kao mineralni dodaci korišteni su silikatna prašina, metakaolin i leteći pepeo. Na svježem mortu je provedeno ispitivanje obradivosti, a na očvrnulom mortu ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće, gustoće i brzine ultrazvuka. Svi dobiveni rezultati su prikazani tablično i analitički.

### **Ključne riječi**

*mort, leteći pepeo, metakaolin, silikatna prašina, obradivost, čvrstoća, ultrazvuk*

## **Influence of mineral additive type on the behavior of mortars with calcium aluminate cement**

### **Abstract**

Mortar is a homogeneous mixture of binder, water, aggregates and various additives. In order to improve its required properties, various additives are added for which there is economic or technical justification. In the general part of the work, all mortar components and their influence on cement composites are described in detail, and special attention is paid to aluminous cement as a reference point of this work. In the experimental part of the work were analyzed the results of mortars with mineral additives in relation to mortar without additives. As mineral additives were used silicate dust, metakaolin and fly ash. On fresh mortar was performed workability test, and on hardened mortar were tested flexural and compressive strength, density and speed of ultrasound. All results are presented in tables and graphs.

### **Key words**

*mortar, fly ash, metakaolin, silica fume, workability, strenght, ultrasound*

# SADRŽAJ

1 UVOD .....	1
2 OPĆI DIO.....	3
2.1 Sastav i svojstva mort .....	3
2.2 Cement.....	5
2.2.1. Podjela cementa .....	5
2.3 Aluminatni cement .....	6
2.3.1 Proizvodnja aluminatnog cementa .....	8
2.3.2 Klasifikacija aluminatnog cementa.....	9
2.4 Agregat .....	10
2.4.1 Štetni sastojci i nepovoljni agregati .....	11
2.4.1 Granulometrijski sastav agregata .....	12
2.4.3 Granulometrijska krivulja .....	13
2.5 Mineralni dodaci.....	14
2.5.1 Silikatna prašina.....	14
2.5.2 Utjecaj silikatne prašine na svojstva cementnog kompozita.....	15
2.5.3 Metakaolin .....	16
2.5.4 Utjecaj metakaolina na svojstva cementnog kompozita .....	18
2.5.5 Leteći pepeo .....	19
2.5.6 Utjecaj letećeg pepela na svojstva cementnog kompozita .....	20
2.5.7 Koncept k-vrijednosti.....	20
3 EKSPERIMENTALNI DIO.....	21
3.1 Korišteni materijali .....	22
3.1.1 Cement .....	22
3.1.2 Agregat.....	24
3.1.3 Voda.....	26
3.1.4 Silikatna prašina.....	26
3.1.5 Metakaolin .....	28
3.1.6 Leteći pepeo .....	30
3.2 Izrada ispitnih mješavina .....	31
3.3 Ispitivanje obradivosti prema EN 1015-3.....	33
3.3.1 Rezultati ispitivanja obradivosti.....	34
3.4 Ugradnja svježeg morta u kalupe .....	35

3.5 Ispitivanje morta nerazornom metodom-metoda ultrazvuka.....	37
3.5.1 Rezultati ispitivanja morta nerazornim metodama .....	39
3.6 Ispitivanje čvrstoće morta.....	41
3.6.1 Rezultati ispitivanja čvrstoće morta.....	43
5 ZAKLJUČAK .....	45
LITERATURA.....	47
PRILOZI.....	48

## 1 UVOD

Danas se sve više postavljaju visoki kriteriji kakvoće i trajnosti materijala. Najskuplji dio cementa, klinker, se želi u što većem dijelu zamijeniti jeftinijim materijalom koji se može uklopiti u složene procese hidratacije. Tako se dobivaju novi cementni kompoziti.

Mineralni dodaci znatno pridonose ostvarenju takvih zahtjeva.

Pod pojmom mineralnih dodataka podrazumijevaju se finoizrnatno dispergirani materijali koji mogu biti dodavani u beton u relativno malim udjelima s obzirom na masu cementa. Dodaju se prije svega radi uštede energije, koja se utroši na pečenje cementnog klinkera.

Mineralni dodaci se dijele na:

- prirodne (pucolani, vulkanski pepeli, itd)
- industrijske (filterska  $\text{SiO}_2$  prašina, leteći pepeli, troska visokih peći, pepeo rižinih ljuski itd.). [2]

Neki dodaci su kemijski inertni, ali imaju povoljan učinak na fizikalna svojstva betona i mortova u svježem i očvrslom stanju, kao što su:

- povećavaju čvrstoću
- povećavaju trajnost betona (osobito u ekstremnim klimatskim uvjetima)
- usporavaju ili ubrzavaju vrijeme početka vezanja cementa
- povećavaju obradivost betona u svježem stanju
- poboljšavaju pumpabilnost.

Osim mineralnim dodacima, novi cementni kompoziti s poboljšanim svojstvima dobivaju se uporabom različitih vrsta cementa. Jedan od njih je i kalcij aluminatni cement.

To je cement velike otpornosti na sulfate. Dobiva se mljevenjem klinkera dobivenog sinteriranjem mješavine vapnenca i boksita. S obzirom da se radi o brzoočvršćujućem cementu (24 sata), njegova primjena nije česta. Stoga, kalcij aluminatni cement još uvijek nije dovoljno istražen kao ni utjecaj mineralnih dodataka na njegova svojstva.

U ovom radu je prikazano eksperimentalno istraživanje utjecaja različitih mineralnih dodataka na kalcij aluminatni cement. Istraživanje je provedeno na mješavinama morta, a ispitani su



obrdivost na svježim uzorcima te gustoća, brzina ultrazvuka, dinamički modul elastičnosti, savojna i tlačna čvrstoća na očvrnulim uzorcima.

Ovaj rad, uz teorijske spoznaje o podjeli, djelotvornosti i mehanizmu djelovanja mineralnih dodataka na kalcij aluminatnog cementa, daje i detaljan prikaz eksperimentalnih rezultata, što sigurno daje bolji uvid u opravdanost njihove uporabe.

## 2 OPĆI DIO

### 2.1 Sastav i svojstva mort

Mort (lat. *mortarium*: zgnječiti, zdrobiti, sprešati) je građevinski materijal, homogena smjesa veziva, vode, agregata i raznih dodataka (Slika 1). Nakon primjene u kraćem ili dužem vremenskom razdoblju zbog kemijskih ili fizikalnih procesa otvrdne u očvrslu smjesu.

Stvrdnjavanje morta se može odvijati samo na zraku (zračni mortovi) ili i na zraku i u vodi (hidraulični mortovi). Osim te podjele mort se još može dijeliti i s obzirom na:

- sastav (vapneni, cementni, gipsani, lako agregatni, produžni, epoksidni),
- namjenu (za žbukanje, za fugiranje, za zidanje, injekcioni mort, sanacijski mort, za podlijevanje strojeva),
- mjesto proizvodnje (gradilišni, transportni),
- obradivost i konzistenciju (tekući, prskani, plastični, zemno-vlažni),
- maksimalno zrno agregata (grubi, fini).

Veziva koja se koriste za izradu mortova dobivaju se pečenjem sirovine na visokim temperaturama. Dije se na organska i anorganska veziva. Anorganska se dalje dijele na zračna (vapno, gips, magnezitna veziva, vodeno staklo) i hidraulična (hidraulično vapno i razni cementi). Zračna veziva mogu vezati samo na zraku, a u očvrslom stanju nisu postojani u vodi. Za razliku od njih hidraulična mogu vezati i na zraku i pod vodom, a u očvrslom stanju su postojani i pod vodom (cement). U organska veziva ubrajaju se sintetska ljepila i bitumen.

Voda za izradu mortova mora biti čista. Razlog tomu su određene nečistoće koje utječu na kvalitetu morta. Osobito je štetno prisustvo kiseline, ulja, organske i anorganske soli, spojeva klor, šećera, sulfata i sl. Smatra se da je pitka voda dovoljno čista za primjenu te da pH vode treba biti između 6 i 8. Osim kemijskom analizom podobnost vode za mort može se provjeriti i komparativnim ispitivanjem uzoraka izrađenih od vode koju ispituje i obične pitke vode.

Agregat koji se koristi za mort ima najkrupnije zrno agregata 4 mm (pijesak). Krupniji agregat u ovom slučaju nije moguć pošto se mortovi u najvećem broju slučajeva upotrebljavaju u tankim slojevima čije debljine uglavnom ne prelaze 3 cm. [9]

Osim ograničenja u maksimalnom zrnju postoje i ograničenja u granulometrijskom sastavu i mehaničkim svojstvima agregata. Agregat može sadržavati štetne sastojke kao što su silikatna zrna, sumporni spojevi i spojevi klora, tanki sloj gline, blata, ... Udio svih štetnih sastojaka ne smije prijeći 4%.

Razni dodaci, koji se dodaju radi poboljšanja svojstava, dijele se na mineralne i kemijske dodatke (aditive). Mogu se dodati prije ili za vrijeme miješanja. Primjenjuju se samo ako se za to dokaže ekonomska i tehnička opravdanost. Njihova namjena je poboljšanje određenih svojstava betona ili morta. Neki dodaci mijenjaju svježja svojstva, neki konačna svojstva, a neki oba. Kemijski dodaci se dodaju u manjim omjerima tj. do 5% na težinu cementa, a mineralni u značajnijem omjeru od 5–20%.

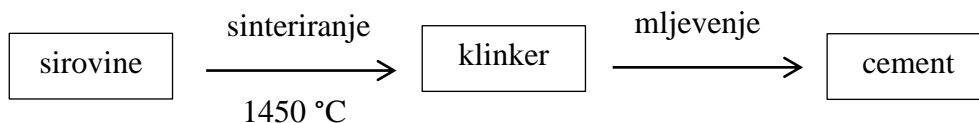


*Slika 1, Svježi mort*

## 2.2 Cement

Cement (lat. caementum: zidarski kamen, prema caedere: obrađivati dljetom) je mineralno hidraulično vezivo. Praškast je materijal, koji pomiješan s vodom, kemijskim reakcijama i pratećim fizikalnim procesima prelazi u očvrsnulu cementnu pastu ili cementni kamen.[9]

Najčešće sirovine za proizvodnju cementa su glina i vapnenac. Danas se uglavnom koristi suhi postupak u rotacijskoj peći zbog uštede na vodi koja je potrebna kod mokrog postupka. Tijekom transformacije od sirovina do očvrsnulog cementnog kamena postoje dvije faze. U prvoj fazi se sirovine sinteriraju na 1450 °C pri čemu nastaju minerali klinkera, pretežito kalcijevi silikati i aluminati. O njihovom udjelu ovise svojstva cementa kao što su čvrstoća i toplina hidratacije. Mljevenjem klinkera dobiva se fini prah, cement. U drugoj fazi cementu se dodaje voda i nastupa hidratacija. U prvih nekoliko sati se gubi obradivost smjese (dolazi do vezivanja), a nakon toga slijedi očvršćavanje i traje nekoliko mjeseci.



*Slika 2, Shematski prikaz nastanka cementa*

### 2.2.1. Podjela cementa

Postoji mnogo vrsta cementa. Najčešće se upotrebljava Portland cement (PC). Još neke od važnijih vrsta su: aluminatni cement (AC), metalurški i pucolanski cementi, supersulfatni cement i ekspanzivni cement.

Prema kemijskom sastavu se dijele u dvije skupine:

- silikatni cementi
- aluminatni cementi.

Silikatni cementi su oni koji kao glavne minerale klinkera sadrže silikate. Tu spadaju čisti Portland cement, Portland cement s dodacima, miješani cement, bijeli cement, pucolanski i metalurški cement. Aluminatni (boksitni) cementi kao glavne minerale klinkera sadrže kalcijeve aluminatne.

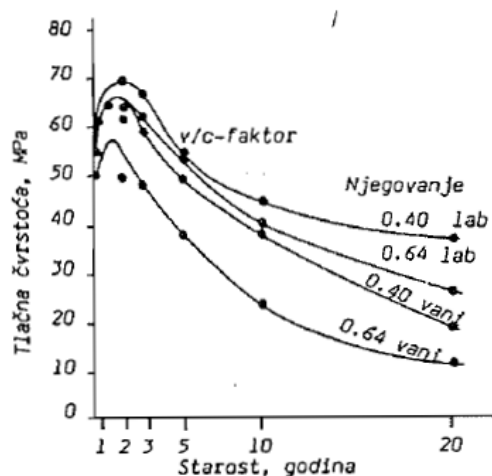
## 2.3 Aluminatni cement

Aluminatni cement ili Lafarge cement je prvi put proizveden 1913. u tvornici La Farge u Francuskoj po kojoj je i dobio naziv. Razvio se kao cement velike otpornosti na sulfate.

Manje se zna o njegovom mineraloškom sastavu nego o sastavu Portland cementa. Tamniji je od Portland cementa te za razliku od njega sporije počinje vezati, ali njegovo vezivanje završi prije tj. brže očvrstne. Iz ovog se zaključuje da se radi o brzoočvršćujućem, a ne o brzovezujućem cementu. Aluminatni cement 80 % čvrstoće razvije za 24 sata, dok Portland cement istu tu čvrstoću razvije tek za 28 dana. Međutim, najveći utjecaj na konačnu čvrstoću betona i mortova ima vodocementni faktor,  $w/c$ . Kada je vodocementni faktor velik, većina materijala koji hidratiziraju mogu reagirati i stvoriti metastabilne hidrate koji ispunjavaju veći dio volumena i daju veliku čvrstoću, ali kada dođe do pretvorbe volumen hidrata se smanjuje, a time i čvrstoća.

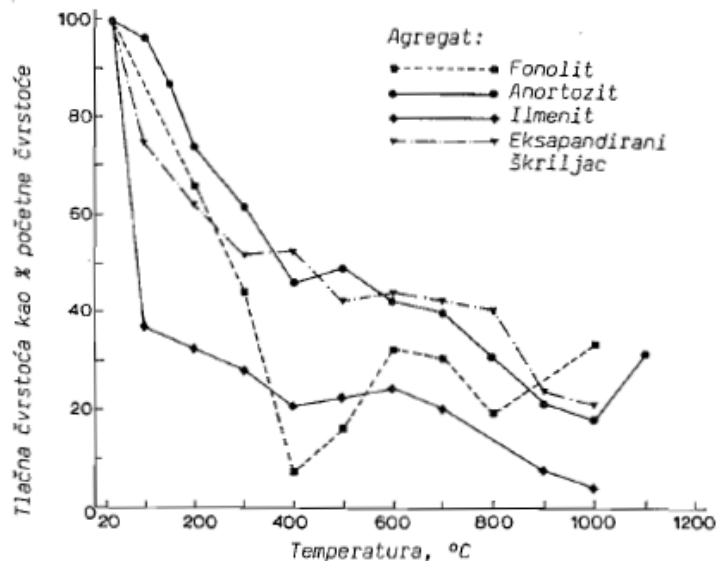
Kada je vodocementni faktor mali, prostor za hidrataciju je ograničen pa će samo dio hidrantnih materijala reagirati dajući metastabilne hidrate. U tom slučaju, kada dođe do pretvorbe, voda se oslobađa i može reagirati s preostalim hidrantnim materijalom. Tako poroznost ostaje niska, a čvrstoća dobra i nakon pretvorbe.

Za postizanje bržeg početka vezanja može se miješati s Portland cementom, gipsom, vapnom i organskim dodacima. U tom slučaju dolazi do pada čvrstoće u odnosu na čvrstoću čistog aluminatnog cementa.



Slika 3, Promjene čvrstoće tijekom vremena za betone spravljene s aluminatnim cementom [2]

Rezultat brze hidratacije je velika toplina hidratacije, stoga se aluminatni cement preporučuje na područjima niskih temperatura i za betoniranje na mrazu. Međutim, u državama visokih temperatura i vlažnosti zbog već poznatih inženjerskih kalvarija njegova primjena je zabranjena.



Slika 4, Promjena čvrstoće aluminatnog cementa u funkciji promjene temperature [2]

Prema prethodno navedenom, svojstva aluminatnog cementa su:

- brzo stvrdnjavanje, 2-4 h,
- brzo postizanje čvrstoće, unutar 24 h,
- dobra vatrostalna svojstva,
- velika otpornost na sulfate,
- otpornost na kiseline,
- velika otpornost na abraziju,
- niske temperature primjene do  $-10$  °C. [4]

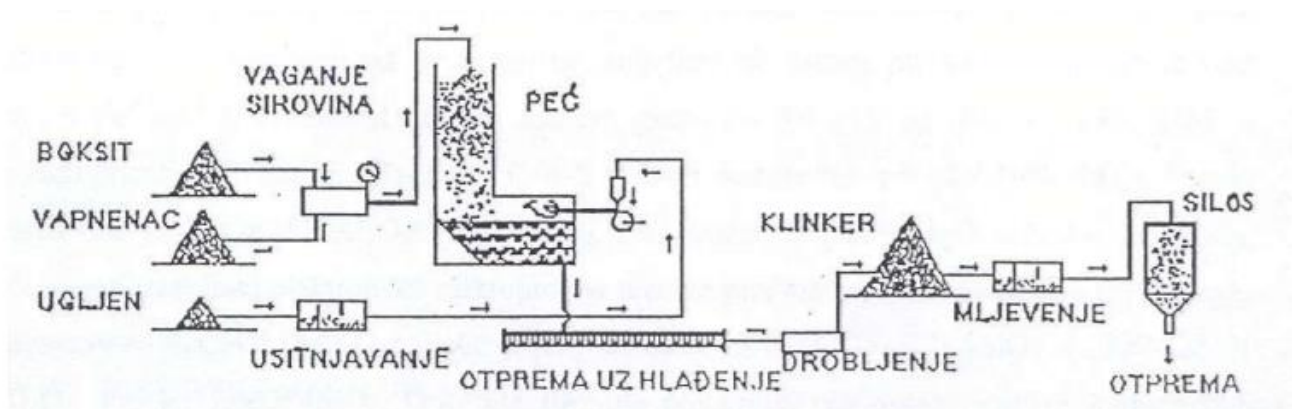
Prva veća primjena aluminatnog cementa bila je za izgradnju Maginot linije u Francuskoj u Prvom svjetskom ratu. Danas se u građevinarstvu upotrebljava za:

- samonivelirajuće podove,
- gdje postoje zahtjevi za brzo postizanje čvrstoće (sanacije iznenadnih oštećenja, zatvaranje prodora vode u rudnicima...),

- obloge otporne na koroziju, abraziju, sulfate i kiseline (za radove u moru, stajama, kanalima za otpadne vode....),
- kao vatrostalno vezivo pri izradi vatrostalnih obloga peći i dimnjaka pri temperaturi 1200-1500 °C.

### 2.3.1 Proizvodnja aluminatnog cementa

Aluminatni cement se dobiva mljevenjem klinkera dobivenog sinteriranjem ili taljenjem mješavine vapnenca (cca 40 %) i boksita (cca 60 %). Većinom se proizvodi taljenjem, a u manjoj mjeri sinteriranjem gdje se umjesto boksita koristi glinica. Taljenje se vrši u rotacijskoj peći pri temperaturi od oko 1600 °C. Tako dobiven klinker je znatno tvrdi što uz veću količinu topline i cijenu boksita, aluminatni cement čini znatno skupljim od Portland cementa. Glavni mineral klinkera je monokalcijev aluminat (CA) s udjelom preko 45 %.



Slika 5, Shematski prikaz proizvodnje aluminatnog cementa [10]

### 2.3.2 Klasifikacija aluminatnog cementa

Aluminatni cement se klasificira prema udjelu aluminata. Postoje tri osnovne skupine:

- cement s niskim udjelom aluminata (npr. KAC 40),
- cement sa srednjim udjelom aluminata (npr. KAC 50),
- cement s visokim udjelom aluminata (npr. KAC 70).

KAC označava kalcij aluminatni cement, a brojka udjel aluminata. Detaljniji prikaz klasifikacije aluminatnog cementa s pripadajućim udjelima glavnih oksida prikazan je u tablici 1.

*Tablica 1, Klasifikacija aluminatnog cementa*

Vrsta	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (KAC) %	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> %	SiO <sub>2</sub> %	CaO %	Proizvodni proces	Boja
visok sadržaj željezo-oksida (standard)	nizak udio aluminata 36 - 42	12 – 20	3 - 8	36 - 42	taljenje	tamno siva
niski sadržaj željezo-oksida	srednji udio aluminata 48 - 60	1 – 3	3 - 8	36 - 42	taljenje/ sinteriranje	svjetlo siva
bez željezo- oksida	visoki udio aluminata 65 - >80	0 – 0,5	0 – 0,5	17 - 27	sinteriranje	bijela



## 2.4 Agregat

Agregat se dobiva drobljenjem kamena. Zbog toga se često naziva kameni ili mineralni agregat. Može se podijeliti na prirodno ili umjetno drobljeni.

Prirodno drobljeni agregat nastaje raspadanjem kamenih masiva. Stijene se raspadaju na komade koje valjaju potoci i rijeke te ih tako dalje drobe i bruse. Stoga su najkvalitetnija zrna agregata upravo iz riječnih nanosa. Prirodni agregat može nastati i djelovanjem ledenjaka koji isto valjaju, drobe i bruse komade.

Prirodni agregat koji ima zaobljena zrna naziva se i šljunak.

Umjetno drobljeni agregat nastaje drobljenjem u drobilicama. Danas se uobičajeno zove samo drobljeni agregat, a nekad se zvao tucanik (dobivao se tucanjem većih komada kamena).

Specijalni agregat je posebna vrsta agregata dobiven drobljenjem barita, zrna željeza i slično.

Prema veličini zrna agregat dijelimo na dvije osnovne grupe (prema PBAB):

- sitni agregat, zrna sitnija od 4 mm,
- krupni agregat, zrna krupnija od 4 mm.

Sitni agregat (posebno prirodnog porijekla) često se naziva pijesak.

Sitnija zrna su manje sklona segregaciji pa je od takvog agregata (0 – 4 mm) moguće formirati relativno homogenu hrpu agregata. Krupnijim zrnima (> 4 mm), zbog izrazite segregacije, dobivamo izrazito nehomogenu hrpu.

### 2.4.1 Štetni sastojci i nepovoljni agregati

Štetni sastojci i nepovoljni agregati uvelike utječu na prionjivost agregata i cementnog kamena. U štetne sastojke se ubrajaju:

- 1) glinu i druge sitne čestice – prisutnost gline, koja obaviće zdrave čestice agregata, sprječava dobru vezu agregata i cementnog kamena. Na sličan način djeluje i kamena prašina. Ukupnu količinu gline treba ograničiti, jer povećava potrebnu količinu cementa i vode. Dozvoljena količina sitnih čestica se određuje tzv. mokrim sijanjem. Ukoliko je prisutna i glina i kamena prašina, njihova ukupna količina se ograniči na 4,5 % mase za rječne agregate i 7,5 % mase za drobljene agregate.
- 2) organske tvari – sprječavaju normalni proces hidratacije cementa, stvaraju zračne mjehuriće i čine beton poroznim. Ulaze u agregat preko otpadnih voda raznih industrija ili kao rezultat raspadanja organizama. Potrebno ih je isprati iz agregata s tim da se ispiranje ne smije vršiti vodom koja sadrži organske tvari. Kod suhog agregata sitne čestice mogu se odstraniti i strujom zraka.
- 3) soli – pijesak iz mora ili pokraj mora može sadržavati štetne količine klorida, vrlo opasne za koroziju armature u betonu. Mogu se isprati običnom vodom ili ostaviti da dosta dugo odleži na kiši. Prije upotrebe količina soli se mora nužno ispitati i ocijeniti mogućnost uporabe agregata. Osim na sadržaj klorida moraju se ispitati i na sadržaj nitrata, nitrita, sulfida i sulfata.
- 4) lake čestice, trošna zrna i nepovoljne minerale – količina im je ograničena propisima, a ispituju se pri mineraloško petrografskoj analizi. Prisutnost nekih minerala narušava čvrstoću pa se moraju kalati. Također, neki materijalima mogu stvoriti ružne mrlje na površini očvrstulog betona, kao npr. ugljen i bitumen.

Tablica 2, Nepovoljne karakteristike agregata [2]

Fizičke		Kemijske	
Vanjske:	Unutrašnje:	Reakcije s cementom:	Neovisno o cementu:
<ul style="list-style-type: none"> <li>• inkrustacije i obavijenost</li> <li>• vrlo trošna površina</li> <li>• vrlo glatka površina</li> <li>• nepovoljan oblik zrna</li> <li>• suviše sitni pijesak</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nepovoljna poroznost</li> <li>• velike volumne promjene uslijed sušenja/vlaženja</li> <li>• kalavost i pukotine</li> <li>• trošna meka i slaba zrna</li> <li>• nepovoljna termička promjena volumena</li> <li>• materijali koji bujaju (škrljci, ugljen, drvo,..)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• alkalna reaktivnost</li> <li>• organske nečistoće (šećer, celuloza, ...)</li> <li>• soli (kloridi, nitrati, sulfati)</li> <li>• izmjena bazičnih tvari</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• karbonatizacija</li> <li>• tvari koje uvlače zrak</li> <li>• oksidacija konstituenata agregata</li> <li>• (npr. limonitizacija)</li> </ul>

#### 2.4.1 Granulometrijski sastav agregata

Granulometrijski sastav ili granulacija agregata su podaci koji pokazuju od kakvih se veličina zrna sastoji agregat i kolika je količina svake vrste.

Ispituje se prosijavanjem na standardnim sitima pri čemu agregat mora biti potpuno suh. Utvrđuje se masa agregata koja je prošla kroz svako sito i izražava se u % ukupne mase uzorka. Svaki taj podatak se naziva prolazom, a dio uzorka, koji sadrži pojedino sito zove se ostatak na situ. Otvori standardnih sita (prema ISO) su: 0.063, 0.125, 0.25, 0.5, 1, 2, 4, 8, 16, 31.5, 63, 125. Postoje i sita drugih standardnih dimenzija otvora, ali ne spadaju u standardnu seriju. Veličina otvora se definira stranicom kvadrata.

Sita za prosijavanje se izrađuju od mreže ili performiranog lima s kvadratnim otvorima. Prije su u upotrebi bila rešeta s kružnim otvorima od performiranog lima. Međutim, ako je sito s kružnim otvorima potrebno je podatke iz jednog sistema pretvoriti u drugi (s kvadratima).

Uvijek se za tri posljednja sita u seriji uzimaju otvori sita 32, 64 i 128. Razlog tomu je broj zrna na tim sitima pri jednakoj masi materijala. Taj broj je znatno manji nego na sitima koji

imaju manje otvore pa svako zrno ima veću mogućnost da se izmjesti i lakše prođe kroz otvor. Posljedično kroz sito prođe više zrna neznatno koja su zanemarivo manji od otvora, nego kroz otvor od 31,5 mm.

### 2.4.3 Granulometrijska krivulja

Granulometrijska krivulja je prikaz rezultata ispitivanja granulometrijskog sastava dijagramom. Na ordinatu se nanosi prolaz kroz sito, a na apscisu veličina otvora. Zbog preglednosti, otvori sita se nanose u logaritamskom mjerilu tj. nanosi se logaritamska vrijednost veličine otvora.

Ne postoji idealan granulometrijski sastav. Međutim, određenim proporcijama frakcija postiže se optimalan granulometrijski sastav. Neki od postupaka za određivanje relativnog udjela frakcija su: pokusne mješavine s konstantnim udjelom cementa i vode, a promjenjivim udjelom frakcija, pokusne mješavine s raznim omjerima frakcija agregata da bi se postigao minimum šupljina, iskustveni omjeri pijeska i krupnijih frakcija agregata, izračunom omjera frakcija agregata najbližeg nekoj od ranije poznatih zakonitosti.

Najčešće su to parabole oblika:

$$y_i = 100 \left( \frac{d_i}{D} \right)^n$$

pri čemu su:  $y_i$  – kumulativni volumni udio agregata izražen u postocima

$D$  – usvojeno maksimalno zrno agregata

$d_i$  – promjer zrna agregata za koje se izračunava kumulativni udio

$n$  – eksponent (0,4...0,5)

Najpoznatije granulometrijske krivulje su Fullerova i EMPA. [2]

Analitički izraz za Fullerovu je:  $y_i = 100 \sqrt{\frac{d_i}{D}}$ , a za MPA :  $y_i = 50 \left( \frac{d_i}{D} + \sqrt{\frac{d_i}{D}} \right)$ .

## 2.5 Mineralni dodaci

Pod pojmom mineralnih dodataka podrazumijevaju se finoizrnatno dispergirani materijali koji mogu biti dodavani u relativno malim udjelima s obzirom na masu cementa.

Mineralni dodaci se dijele na prirodne (pucolani, dijatomejske zemlje, vulkanski pepeli) i industrijske (leteći pepeli, troska visokih peći, filterska SiO<sub>2</sub> prašina, pepeo rižinih ljuski itd.). Dodaju se radi uštede u energiji, odnosno ekonomične proizvodnje veziva, ali i zbog poboljšanja mehaničkih i trajnosnih svojstava, poboljšanja obradivosti, estetskog izgleda, smanjenja topline hidratacije.

U ovom dijelu će se posebna pažnja obratiti na djelovanje silikatne prašine, metakaolina i letećeg pepela zbog primjene u eksperimentalnom dijelu rada.

### 2.5.1 Silikatna prašina

Silikatna prašina (eng. silica fume) je najkvalitetniji pucolan, s najvećom pucolanskom aktivnošću. Dobiva se kao nusprodukt pri proizvodnji silicijske i ferosilicijske legure u elektrolučnim pećima. U tom procesu, kvarc se zagrijava na oko 2000 ° C uz dodatak izvora ugljika za reduciranje kvarca u silicij. Male količine silikatne prašine oslobađaju se iz peći, oksidiraju i kondenziraju se u mikrosfere, koje se zatim skupljaju ventilatorima i vrećastim filterima. [12] Skupljanje vrećastim filterima je započelo 1960-ih zbog pojačanog zakonodavstva o zaštiti okoliša. Zatim su studije u Norveškoj pokazale potencijal silike za trajnost beton i tako stvorile potencijalno tržište. Najpoznatija primjena silikatne prašine je bila za gradnju najveće zgrade u svijetu, Burj Khalifa u Dubaiju (2014.).



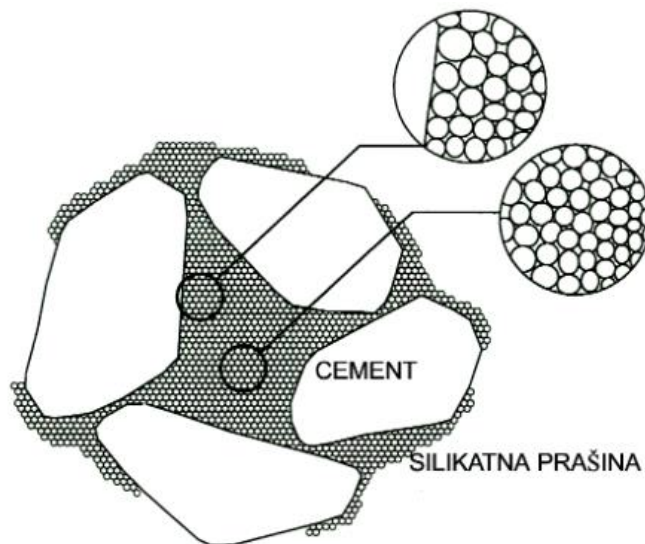
*Slika 6, Silikatna prašina*

Pucolanska aktivnost silikatne prašine se povećava s povećanjem amorfnih formi  $\text{SiO}_2$ . Velik udio  $\text{SiO}_2$  čini njezinu strukturu amorfnom. Ukoliko dolazi iz ferosilicijske peći, mogu biti prisutne veće količine željeza. Ostali elementi su prisutni samo u malim količinama (do 1%).

Primarna čestica joj je sferičnog oblika i srednjeg promjera 0,15  $\mu\text{m}$ . Zbog izuzetno male veličine čestice ima veliku specifičnu površinu (15-30  $\text{m}^2/\text{kg}$ ), a više od 95 % čestica je manje od 1  $\mu\text{m}$ .

### 2.5.2 Utjecaj silikatne prašine na svojstva cementnog kompozita

Silikatna prašina zbog velike specifične površine povećava volumen koji okružuje čestice cementa (Slika 7) te utječe na ubrzanje hidratacije radi veće reaktivnosti.



Slika 7, Utjecaj silikatne prašine na povećanje volumna oko cementnih čestica

Čestice reagiraju s kalcij hidroksidom i stvaraju kalcij silikatne hidrate (C-S-H). Hidrati premošćuju prostor između produkata hidratacije cementa i zrna agregata što povećava čvrstoću i smanjuje propusnost zgušnjavanjem matrice. [4] Za razliku od drugih zamjena cementa kao što su leteći pepeo i mljevena granulirana zgura, upotreba silikatne prašine zbog velike specifične površine dovodi do brže hidratacije i tipično veće čvrstoće. Međutim, s upotrebom silikatne prašine treba biti oprezan. Prvi razlog je  $\text{SiO}_2$  koji kada reagira s

kalcijevim hidroksidom  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  znatno smanjuje pH betona i mortova. Drugi razlog je što upotreba silikatne prašine povećava potrebu za vodom te stvara "prividnu" obradivost pa se preporučuje upotreba zajedno s plastifikatorima ili superplastifikatorima.

Eksperimentalno utvrđena količina silikatne prašine koja se dodaje kreće se do 10% od mase cementa. Ako se prekorači određeno doziranje silikatne prašine, neće doći do povećanja čvrstoće, već krtosti cementnih kompozita. Uz povišenje čvrstoće te obradivosti i kohezivnosti svježje mase, očituje se i nepropusnost očvrstnalog materijala.

### 2.5.3 Metakaolin

Metakaolin (Slika 8) je bezvodni kalcinirani oblik minerala gline kaolinita. Minerali bogati kaolinitom poznati su kao pucolanska glina ili kaolin, koji se tradicionalno koriste u proizvodnji porculana. Primjenjuje se od početka 90-ih godina dvadesetog stoljeća. Dakle, relativno je nov mineralni dodatak. Ima pucolanska svojstva. Kemijska formula metakaolina je  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2$ , a prosječno sadrži 50-55 %  $\text{SiO}_2$  i 40-45 %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ .

Po svojoj pucolanskoj reaktivnosti usporediv je sa silikatnom prašinom, ali je jeftiniji od nje. Čestice metakaolina su manje od čestica cementa, ali ipak ne manje od čestica silikatne prašine.



*Slika 8, Metakaolin*

Kvaliteta i reaktivnost metakaolina jako ovise o karakteristikama upotrijebljene sirovine. Može se proizvesti iz različitih primarnih i sekundarnih materijala koji u sastavu imaju kaolinit kao npr. naslaga kaolina visoke čistoće, naslaga kaolinita ili tropska tla slabije čistoće, otpada od papirnog mulja (ako sadrži kaolinit) i jalovine od uljnog pijeska (ako sadrži kaolinit). Prvenstveno se proizvodi od spomenute kaolinske (pucolanske) gline kojoj je jedna od osnovnih komponenta mineral kaolinit – hidratizirani aluminij disilikat ( $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ ). O aktivaciji kaolinske gline ovisi pucolanska aktivnost rezultirajućeg proizvoda. Temperatura kalcinacije koja dovodi do aktivnog stanja je 600-800 °C. U tom trenutku dolazi do gubitka hidroksidnih iona (dehidroksikacija) što rezultira preuređenjem strukture gline. Dehidroksikacija se mora odvijati postupno bez pregrijavanja kako bi se metakaolin mogao koristiti kao dopunski materijal. Ako se zagrijavanje vrši na temperaturi nižoj od potrebne za dehidroksikaciju (600 °C) dolazi do sintetiziranja i formiranja mulita koji nije reaktivan. Na temperaturama iznad 850 °C dolazi do rekristalizacije u kvarc i mulit, a to su inertni materijali. Njihova prisutnost dovodi do opadanja reaktivnosti. Dakle, da bi se postigla optimalna transformacija kaolinita u metakaolin, potrebno je za svaku sirovinu odrediti optimalnu temperaturu kalcinacije, brzinu zagrijavanja, vrijeme zadržavanja u peći i režim hlađenja.

Kalcinacija se najčešće odvija u rotacijskim pećima ili korištenjem procesa u fluidiziranom sloju, čime se vrijeme kalcinacije skraćuje iz sati u minute. Proces brze kalcinacije (vrijeme skraćeno na sekunde) se sastoji od brzog grijanja, kalcinacije i hlađenja. Istraživanjima je dokazano da do povećane tlačne čvrstoće i sniženja kalcijeva hidroksida u očvrnulim betonima i mortovima dolazi kada polazna sirovina ima velik sadržaj kaolina ( $\approx 90\%$ ). Ako se polazna sirovina ne pročisti, sadržavat će nečistoće koje mogu djelovati kao razblaživači.

Metakaolin se najčešće primjenjuje za:

- visokočvrste i lagane beton,
- predgotovljene i izlivenne betone,
- proizvode od vlakana i ferocementa,
- armirani beton od staklenih vlakana,
- ploče, umjetničke skulpture,
- mort i štukature,
- povećane čvrstoće na pritisak i savijanje,
- smanjenje propusnosti (uključujući propusnost klorida).



#### 2.5.4 Utjecaj metakaolina na svojstva cementnog kompozita

S obzirom na to da se radi o relativno novom mineralnom dodatku, još uvijek nema dovoljno podataka vezanih uz njegovo reagiranje s ostalim cementnim kompozitima. Smatra se da ima dvostruko veću reaktivnost od većine drugih pucolana.

Glavna reakcija događa se između metakaolina i kalcijevog hidroksida koji nastaje hidratacijom cementa. Nastali kristalni proizvod uglavnom ovisi o odnosu metakaolin/kalcijev hidroksid i temperature reakcije. Pored toga, ako su prisutni i slobodni karbonati, može doći do formiranja karbo-aluminata. [14]

Metakaolin pridonosi: porastu čvrstoće, olakšava završnu obradu, smanjuje eflorescenciju, smanjuje vodoupojnost, smanjuje mogućnost pojave alkalnosilikatne reakcije (ASR), olakšava zadržavanje boja betona i mortova. Osim navedenih svojstava metakaolin pridonosi smanjenju skupljanja, zbog "pakiranja čestica", što betone i mortove čini gušćim. Sva ta svojstva metakaolina rezultiraju povećanjem trajnosti.

Vrijedan je dodatak za primjenu u betonu/cementu. Zamjenom cementa s metakaolinom nastaje mješavina koja pokazuje povoljna inženjerska svojstva, uključujući: učinak punila, ubrzanje hidratacije i pucolansku reakciju. Učinak punila je trenutčan, dok se učinak pucolanske reakcije javlja između 3 i 14 dana.

### 2.5.5 Leteći pepeo

Leteći pepeo (Slika 9) je industrijski materijal dobiven iz termoelektrana spaljivanjem praškastog ugljena (sve češće u kombinaciji s drugim organskim materijalima ili gorivom). Čestice letećeg pepela su sferične i staklaste, ali pokazuju i druge morfologije. Pretežno se radi o česticama silikatnog stakla. Ponekad su prisutne i šuplje kuglice nastale od mnoštva malih kuglica. Promjer čestica može biti od ispod 1 do oko 150  $\mu\text{m}$ . Sve te karakteristike (morfologija, veličina čestica, fazni sustav) uvelike ovise o maksimalnoj temperaturi koja se postigne pri spaljivanju.

Najznačajnije svojstvo letećeg pepela je pucolanska aktivnost. To znači da nema latentna hidraulična svojstva, ali kemijski reagira s vapnom pa nastaju spojevi koji imaju cementirajuća, hidraulična svojstva.

Glavne kristalne komponente u letećim pepelima s niskim sadržajem CaO su  $\alpha$ -kvarc, hematit, magnetit, mulit i silimanit. Pri normalnim temperaturama navedene kristalne komponente su slabo reaktivne.



*Slika 9, Leteći pepeo*

Prema mineraloškom sastavu leteći pepeo se može podijeliti u dvije skupine:

1. skupina - sadržava manje od 10% analitičkog CaO i uglavnom nastaje izgaranjem antracita i bitumenskog (crnog ili mrkog) ugljena,
2. skupina - obično sadrži od 15 do 40% CaO i uglavnom nastaje izgaranjem lignita i subbitumenskog ugljena.

## 2.5.6 Utjecaj letećeg pepela na svojstva cementnog kompozita

Utjecaj letećeg pepela na svojstva betona i mortova očituje se na dva načina:

- pucolanskim i/ili hidrauličkim reakcijama,
- fizikalnim efektom povezanim s povišenjem udjela finih čestica (čestice letećeg pepela manje su nego čestice cementa).

Prisutnost sitnih čestica letećeg pepela pri izradi betona i mortova smanjuje potrebu za vodom (zbog smanjenja volumena zraka u mješavini), ali i izdvajanje vode te tako povećava nepropusnost i obradivost cementnih kompozita u plastičnom stanju. Upravo povećana nepropusnost povećava trajnost betona i otpornost na različite agresivne utjecaje okoliša. To je razlog široke primjene letećeg pepela u elementima mostova. Osim povećanja nepropusnosti, smanjuje se ukupni potencijal i usporava oslobađanje topline hidratacije. Razlog tomu je što leteći pepeo u prvih nekoliko dana hidratacije ne daje toplinu. Stoga se zamjenom udjela cementa (koji daje najviše topline) letećim pepelom, kao rezultat dobiva smanjenje ukupnog potencijala za razvoj topline hidratacije. Također, leteći pepeo produžuje vrijeme vezanja jer usporava hidrataciju cementa. Posljedično su početne čvrstoće cementnih kompozita s dodatkom letećeg pepela niže, a poslije mogu biti i više od specificirane čvrstoće. Jedno od rješenja za nisku početnu čvrstoću je dodavanje aditiva, superplastifikatora te smanjenje vodocementnog faktora, w/c. Projektirana čvrstoća postiže se kod starosti kompozita većoj od 90 dana.

## 2.5.7 Koncept k-vrijednosti

Koncept k-vrijednosti je jako važan pri primjeni mineralnih dodataka. Njime se dopušta uključivanje reaktivnih mineralnih dodataka (pucolanskih i hidrauličkih) vezanih na količinu cementa i w/c omjer u sastav betona i mortova. Uvjeti pod kojim dopušta primjenu su:

- zamjena termina "w/c omjer" sa "w/(cement+k·dodatak) omjerom",
- zahtjev minimalne količine cementa.

Stvarna vrijednost k ovisi o specifičnom dodatku, a podobnost koncepta k-vrijednosti rezultira iz europskog tehničkog odobrenja ili relevantne nacionalne norme pri čemu se obje specifično odnose na uporabu mineralnog dodatka u betonu sukladno EN 206-1.

### 3 EKSPERIMENTALNI DIO

Zadatak eksperimentalnog dijela ovog rada je ispitati utjecaj mineralnih dodataka na svojstva morta. Cilj zadatka je ispitati uzorke, prikazati dobivene rezultate grafički i analitički te ih analizirati.

Svojstva morta ovise o karakteristikama svih komponenti od kojih se proizvodi. S obzirom na to da je potrebno ispitati samo utjecaj mineralnih dodataka na ponašanje morta s kalcij aluminatnim cementom, mijenjani su samo mineralni dodaci. Izuzetak je napravljen kod letećeg pepela, koji je reaktivan dodatak. Povećana mu je količina vode kako bi se održao isti vodovezivni faktor tj. zadovoljio koncept k-vrijednosti.

Mort je ispitan u svježem i očvrslom stanju, a za potrebe ispitivanja su napravljene četiri ispitne mješavine koje se razlikuju po mineralnim dodacima. To su:

- R1 – prva ispitna mješavina bez mineralnog dodatka,
- R2 – druga ispitna mješavina s dodatkom silikatne prašine,
- R3 – treća ispitna mješavina s dodatkom metakaolina,
- R4 – četvrta ispitna mješavina s dodatkom letećeg pepela.

Prva ispitna mješavina je referentna. Na osnovu nje su izvršene usporedbe i donesen zaključak o utjecaju dodatka. U svim ostalim mješavinama je 10 % mase cementa zamijenjeno mineralnim dodatkom.

U svježem stanju je ispitana obradivost morta. U očvrslom stanju su ispitani gustoća uzoraka i brzina ultrazvuka te savojna i tlačna čvrstoća. Tlačna i savojna čvrstoća očvrslulih uzoraka su ispitani nakon 5 dana.

Uzorci su čuvani u komori na temperaturi  $20 \pm 2$  °C.

U nastavku slijedi detaljan opis korištenih materijala, metoda ispitivanja te dobivenih rezultata ispitivanja.

### 3.1 Korišteni materijali

Prilikom izrade mješavina morta korišteni su sljedeći materijali:

- cement,
- agregat,
- voda,
- silika,
- metakaolin,
- leteći pepeo.

Svi podaci su preuzeti iz tehničkih listova korištenih materijala.

#### 3.1.1 Cement

Pri izradi mješavina morta korišten je kalcij-aluminatni cement ISTRA 50 5.0. Testiran je prema EN 14647 za kalcijeve aluminatne cemente. Proizvodi se taljenjem odabranih sirovina (boksita i vapnenca) u posebnim pećima. Nakon hlađenja, specijalni klinker se melje pomoću kuglastih mlinova.

##### Mineraloški sastav

ISTRA 50 5.0 sadrži uglavnom monokalcijev aluminat (CA). Ova mineralna faza odgovorna je za visoku ranu čvrstoću. Manje faze brzog postavljanja (C12A7) su svedene na minimum. Kad se pomiješa s vodom, ISTRA 50 5.0 tvori hidrate kalcijevog aluminata kao svoje proizvode hidratacije.

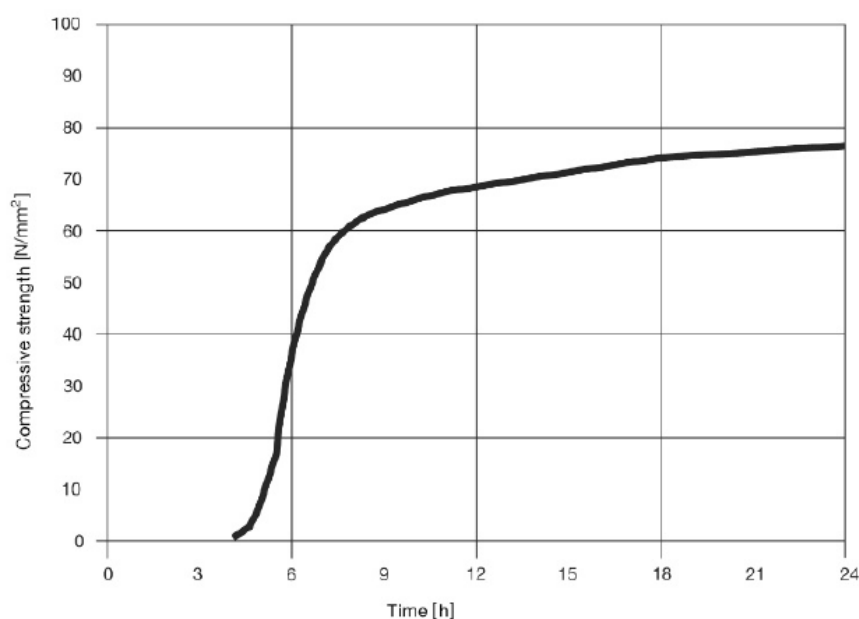
##### Kemijski sastav (%)

SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>
≤ 6	50–55	≤ 3,0	≤ 40	≤ 1,5	≤ 0,4

Razvoj čvrstoće

Nakon stvrdnjavanja, čvrstoća se razvija vrlo brzo. ISTRA 50 5.0 je cement s vrlo velikom ranom čvrstoćom i velikom tlačnom čvrstoćom. Nakon jednog dana, tlačna čvrstoća je veća od visokokvalitetnih portlandskih cementa CEM I 52,5 R nakon 28 dana.

Vrijeme	6 h	1 d
Čvrstoća [N/mm <sup>2</sup> ]	> 18	> 60



*Graf 1, Povećanje tlačne čvrstoće unutar 24 sata*

Ispitivanja su provedena na prizmama za mort 4 x 4 x 16 cm, proizvedenima prema DIN EN 14647. Sadrže pijesak prema standardu CEN i uz omjer voda/cement od 0,40.

Teška topljivost

Nakon sušenja, žbuke i betoni izrađeni od ISTRA 50 5.0 polako ispuštaju svoju hidratnu vodu bez uništavanja matrice. Na visokim temperaturama (>1000 °C) dolazi do keramičkog lijepljenja između dijelova cementa s visokim glicom i vatrostalnih agregata. Ove keramičke veze čine ISTRA 50 5.0 izvrsnim vezivom u vatrostalnim betonima i drugim vatrostalnim mortovima ili mješavinama.

### 3.1.2 Agregat

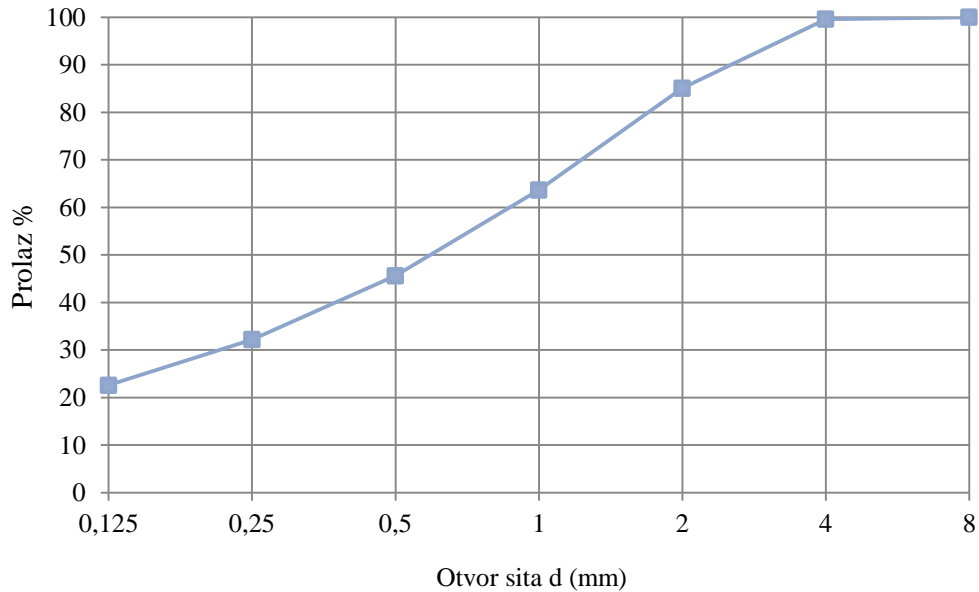
Pri izradi mješavina morta korišten je pijesak granulacije 0-2 mm. Po sastavu je vapnenac. Ispitivanje granulometrijskog sastava agregata je provedeno u laboratoriju Fakulteta građevine, arhitekture i geodezije u Splitu.

*Tablica 3, Granulometrijski sastav agregata*

FRAKCIJA (sito)		OSTATAK	PROLAZ	PROLAZ
PROLAZI	OSTAJE	gr	gr	%
8	4	3,2	815,8	100,00
4	2	118,5	812,6	99,60
2	1	174,7	694,1	85,08
1	0,5	147,1	519,4	63,66
0,5	0,25	108,1	372,3	45,63
0,25	0,125	79,9	264,2	32,19
0,125	Tava	184,3	184,3	22,59
UKUPNO		815,8		
POČETNA MASA		819,1		

*Tablica 4, Mokro sisanje*

MOKRO SIJANJE	gr	%
masa prije ispiranja	415,4	-
ostatak na situ 0,09	337,1	18,85



Graf 2, Granulometrijska krivulja agregata

Granulometrijski sastav se može definirati i preko modula finoće.

Modul finoće je površina lika iznad granulometrijske krivulje:

$$MF = \frac{\sum_{0,125}^D o}{100}$$

pri čemu je  $o$  ostatak na situ, a  $D$  maksimalno zrno agregata.

Za sitni pijesak (0-4 mm) frakcija mora imati modul finoće od 2,30 do 2,60, a između dva uzastopna sita ostatak smije biti najviše 45 %.

Za ovaj pijesak, modul finoće iznosi:

$$MF = \frac{236,98}{100} = 2,37$$

Koeficijent zrnatosti tj. površina lika ispod granulometrijske krivulje za ovaj pijesak iznosi:

$$K = \frac{\sum_{0,125}^D p}{100} = n - MF, n - \text{broj sita}$$

$$K = \frac{448,95}{100} = 4,49$$



### 3.1.3 Voda

Pri izradi mješavina morta korištena je demineralizirana voda. Za sve ostale vode je potrebna kemijska analiza. Mogla bi se upotrebljavati i pitka voda, ali ne smije sadržavati previše klora.

Demineralizirana voda je kemijski i biološki čista voda bez:

- otopljenih minerala,
- teških metala,
- organskih kemikalija
- mikroorganizama.

pH - neutralna. Idealna je za upotrebu u laboratorijima, glačalima, automobilskim hladnjacima, akumulatorima, otopinama antifrizi i sl.

### 3.1.4 Silikatna prašina

Za izradu ispitne mješavine korištena je silikatna prašina Meyco MS 610 proizvođača The Chemical Company O-BASF. Riječ je o zgusnutoj mikrosilici. Mikrosilika je samo komercijalni naziv za silikatnu prašinu.

#### Opis proizvoda

To je mineralni dodatak koji se koristi za normalni i prskani beton. Povećava mehanička svojstva betona kao što su tlačna otpornost, otpornost na savijanje, otpornost na mehanički lom te nepropusnost poboljšavanjem svojstava površine betona i mikrostrukture cementne paste.

U skladu je s ASTM C 618 , ASTM C1240/95 AASHTO M 307 CAN/CSA 23,5-M86.

#### Područja primjene ove silikatne prašine su:

- u radovima punjenja tunela (fugiranje zatrpavanjem),
- u sustavu mokrog prskanja i tradicionalnim primjenama betona,
- u proizvodnji normalnog i lakog betona,
- u betonima s visokim otporom,

- u proizvodnji betona s ili bez pumpi,
- u betonima s niskim dozama cementa.

#### Prednosti korištenja

- Smanjuje dozu ubrzivača skrućivanja u raspršenom betonu.
- Daje mogućnost nanošenja u debljim slojevima u raspršenom betonu.
- Smanjuje omjer odskoka kod nanošenja raspršenog betona.
- Pruža veći pritisak i otpor pri vučenju u bilo kojoj vrsti betona.
- Povećava izdržljivost protiv mehaničkih i kemijskih utjecaja.
- Povećava vodonepropusnost betona.
- Sprječava ispuštanje i odvajanje vode u svježem betonu.
- Smanjuje propusnost klora.

#### Podudarnost s ostalim materijalima

- Koristi se sa svim tipovima cementa.
- Koristi se zajedno sa Micro Air 200 kako bi se povećao ciklus smrzavanja – otapanja.
- Preporučuje se sa superplastifikatorima Glenium ili Rheobuild.
- Moguća je upotreba sa Delvo Crete stabilizatorom u sistemu mokrog prskanja.

Da bi se spriječila evaporacija (isparavanje) mješavine vode unutar betona u okruženjima u kojima su visoke temperature i cirkulacija zraka gusti, mora se izabrati i upotrijebiti odgovarajući među sljedećim korigirajućim materijalima: Mastercure 101, Mastercure 107, Mastercure 176, Mastercure 181 ili Mastercure 215.

#### Tehnički podaci

Struktura materijala	zgusnuta mikroslika
Boja	siva
Gustoća	0.55 – 0.70 kg/litar
Količina klora	< 0.1 %
Finoća mliva	> 15000 m <sup>2</sup> /kg
SiO <sub>2</sub> udjel	> % 85
CaO udjel	< % 1

SO <sub>3</sub> udjel	< % 2
0,045 < omjer čestica	< % 40
Indeks aktivnosti	> % 95
Specifična težina	2300 kg/m <sup>3</sup>

### 3.1.5 Metakaolin

Za izradu ispitne mješavine R3 korišten je metakaolin marke METAVER - termički obrađen čisti kaolin (metakaolin), pucolanski dodatak za stvrdnjavanje za cementne građevinske materijale.

#### Opis proizvoda

Metakaolin se proizvodi kalcinacijom koncentriranog kaolina i blago je crvenkast, uglavnom amorfni aluminosilikat koji reagira s portlanditom (kalcijev hidroksid) za stvaranje cementnih CSH-faza.

#### Kemijski sastav (M.-%)

SiO <sub>2</sub> 52-54	CaO < 0,5
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 41-44	MgO < 0,4
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> < 1,5	Na <sub>2</sub> O < 0,1
TiO <sub>2</sub> < 1,0	K <sub>2</sub> O < 2,0

#### Fizikalne karakteristike

Specifična gustoća:	2,6	g/cm <sup>3</sup>
Raspodjela veličine čestica:	d <sub>50</sub> ~ 3,4 - 4,5	μm
	d <sub>95</sub> ~ 12 - 18	μm
Specifična površina (Blaine):	ca. 22 000	cm <sup>2</sup> /g
Specifična površina (BET):	ca. 18	m <sup>2</sup> /g
Boja:	bijela	
Bjelina ( Dr. Lange ):	ca. 87	
Prividna gustoća slobodnim taloženjem:	0,32-0,37	g/cm <sup>3</sup>
	prisilnim taloženjem:	0,45-0,52

### Funkcije

Metaver N je uglavnom sastavljen od minerala kaolina - slojeviti silikatni mineral s razmakom od 7,2 Å između slojeva. Između slojeva od SiO<sub>2</sub> i Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> u omjerima 1: 2 je ugrađena voda koja može isparavati tijekom toplinske obrade kalcinacijom. Kaolin je tad aktiviran.

Posebnost metavera je njegova sposobnost vezanja velike količine slobodnog vapna u obliku stabilnih CSH-faza. Brzina i količina reakcije može biti kontrolirana kroz kemijske i konstrukcijske adekvatne metode. U korelaciji s tim, reaktivnost ovog metakaolina može biti kvalificirana kao „brzo“. Zajedno za vezivom i vodom aktivnost će započeti za oko 4 sata (metoda Newchem).

### Nanošenje

Metaver (metakaolin) je pucolanski mineralni dodatak koji može poboljšati mnoga ponašanja hidrauličkih cementnih mortova, betona i analognih proizvoda. Lako se umiješa i daje meku plastičnu konzistenciju s kojom je lako raditi. Zbog distribucije veličina čestica nema potrebe za povećanjem vode.

Metaver je pokazao prednosti u zahtjevima čvrstoće, gustoće i otpornosti.

### Zahtjevima u kojima se pokazao jako korisnim

Plastičnost	- "shot-creet", reparaturni mortovi, premazi
Stabilnost	-samozbijajući beton i žbuke, samonivelirajući spojevi
Čvrstoća	-žbuke na bazi vapna i cementa
Vezivanje	-ljepilo za pločice, premazivanje vodovodnih cijevi i rezervoara vapna
Otpornost	-premazi konstrukcija za otpadne vode ili morske vode
Pigmentacija	-bolja disperzija u predgotovljenom ili vidljivom betonu
Eflorescencija	-krovni crijep, montažna fasada
Trajnost	-poboljšana reakcija alkalnog silikata

### Doziranje

Dozira se kao 5 do 15 % zamjene od težine cementa.

### Trajnost

Neograničena u suhim uvjetima.

### **3.1.6 Leteći pepeo**

Za pripremu ispitne mješavine korišten je leteći pepeo čiji ostatak na situ 0,045 mm iznosi 5,8 %. Specifična površina čestica po Blaine-u iznosi 5118 g/cm<sup>2</sup>.

### Opis proizvoda

To je industrijski materijal pucolanske aktivnosti. Nema latentna hidraulička svojstva, ali kemijski reagira s vapnom.

### Kemijski sastav

Glavne kristalne komponentne s niskim sadržajem CaO su:

- $\alpha$ -kvarc,
- hematit,
- magnetit,
- mulit,
- slimanit.

### Toplina hidratacije

Primjenom letećeg pepela smanjuje se potreba za vodom te povećava nepropusnost. Tijekom prvih nekoliko dana hidratacije leteći pepeo ne daje toplinu. Dakle, zamjenom cementa letećim pepelom smanjuje se potencijal za razvoj topline hidratacije. Tako se uspori hidratacija.

### Čvrstoća

Početne čvrstoće cementnog kompozita s letećim pepelom su niske, ali konačne mogu biti i više od specificirane čvrstoće. Rješenja za povećanje početne čvrstoće su niži vodocementni faktor i dodatak aditiva. Projektirana čvrstoća se postiže kod starosti cementnog kompozita većoj od 90 dana.

### 3.2 Izrada ispitnih mješavina

Sve ispitne mješavine morta su izrađene u laboratoriju Fakulteta građevinarstva, arhitekture i geodezije u Splitu.

Za potrebe ispitivanja izrađene su četiri različite mješavine. Prva mješavina (R1) je referentna pa u nju nije dodan mineralni dodatak. U preostale tri mješavine su dodana tri različita mineralna dodatka (silikatna prašina, metakaolin, leteći pepeo).

U tablici 5 su prikazane recepture svih mješavina.

Omjer veziva i pijeska u svim recepturama iznosi 1:3. Vidljivo je kako je količina vode kod recepture R4 smanjena za 25 ml da bi se održao isti vodovezivni faktor tj. zadovoljio uvjet koncepta k-vrijednosti. Ostale komponente se nisu mijenjale kako ne bi utjecale na svojstva morta.

*Tablica 5, Recepture mješavina*

SASTAV [g]	R1 ( - )	R2 (silikatna prašina)	R3 (metakaolin)	R4 (leteći pepeo)
Cement	500	450	450	450
Voda	250	275	275	250
Pijesak 0-2 mm	1500	1500	1500	1500
Mineralni dodatak	-	50	50	50
w/b	0,5	0,5	0,5	0,50

Svi potrebni sastojci se izmjere na preciznoj vagi da bi se dobili mjerodavni rezultati. Pazi se da se izvagana masa sastojka u istoj količini prebaci u miješalicu.

U posudu miješalice su redom dodavani demineralizirana voda, kalcij-aluminatni cement, pijesak pa mineralni dodatak po potrebi.

Miješanje se vrši u laboratorijskoj električnoj miješalici (Slika 10). Miješa se tako da se prvih 90 sekundi miješalica radi u prvoj brzini, nakon čega se prebacuje u drugu brzinu i miješa još 90 sekundi.



*Slika 10, Laboratorijska miješalica [slika zabilježena tijekom ispitivanja]*

Nakon završetka miješanja, miješalica se gasi i promatra se dobiveni mort. Zatim slijedi ispitivanje obradivosti i ugradba morta u kalupe. Zbog izrazito brzog očvršćivanja kalcij aluminatnog cementa proces ispitivanja obradivosti se mora odvijati u što kraćem roku.

### 3.3 Ispitivanje obradivosti prema EN 1015-3

Ispitivanje obradivosti je napravljeno prema standardnoj metodi razastiranja. Za ispitivanje je potreban potresni stol, mesingani kalup oblika krnjeg stošca i drveni bat.

Mort iz miješalice se ugrađuje u mesingani kalup koji je prethodno navlažen iznutra. Ugradnja se vrši u dva sloja. Svaki sloj se drvenim navlaženim batom zbija 10 puta. Zatim se odstrani kalup pa se ručka potresnog stola okreće 15 puta (1 okretaj u sekundi).

Zatim se mort razastire poprimajući kružni oblik, a promjer "pogače" se mjeri u dva okomita smjera (Slika 11). Iz dobivenih rezultata se izračunava srednja vrijednost.



*Slika 11, Ispitivanje obradivosti [Slike zabilježene tijekom ispitivanja]*

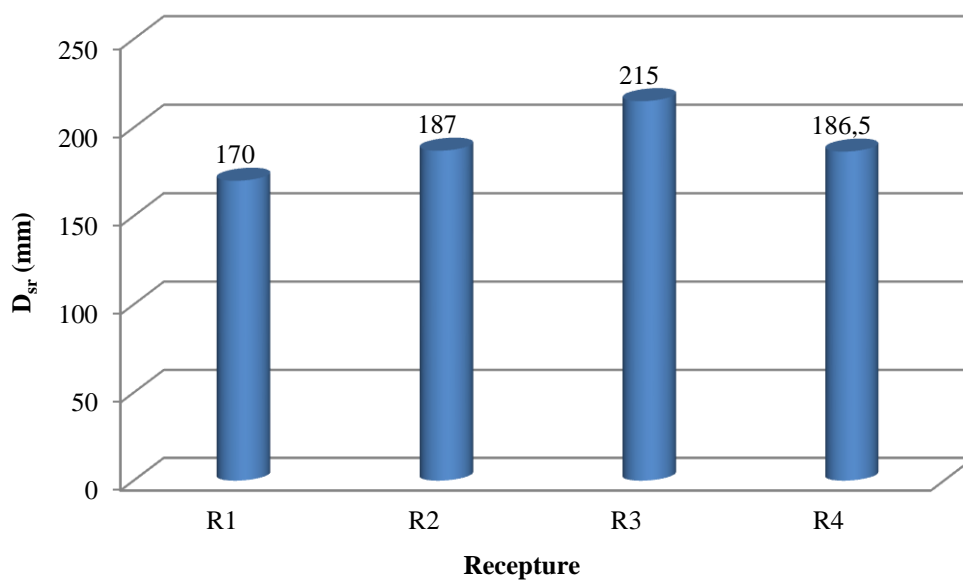


### 3.3.1 Rezultati ispitivanja obradivosti

Tablica 6, Rezultati ispitivanja obradivosti

	R1 (bez dodatka)	R2 (silikatna prašina)	R3 (metakaolin)	R4 (leteći pepeo)
Promjeri (mm)				
$D_1$	170	187	215	183
$D_2$	170	187	215	190
$D_{sr}$	170	187	215	186,5

Prema dobivenim podacima najveću obradivost ima mort s dodatkom metakaolina. Samo metakaolin ima promjer veći od 200 mm pa spada u kategoriju tekuće konzistencije, a ostali u plastično-elastičnu (140-200 mm).



Graf 3, Rezultati ispitivanja obradivosti

### 3.4 Ugradnja svježeg morta u kalupe

Nakon obavljenog ispitivanja obradivosti svježeg morta, pristupa se ugradbi morta u kalupe. Prethodno se kalupi premažu sredstvom za lakše odvajanje kalupa od očvrstnalog morta. Svi uzorci morta su ugrađeni u kalupe dimenzija 40 x 40 x 160 mm.

Nakon pažljive ugradbe morta, kalupi se pričvrste na vibro stol. Vibriranje stola traje 120 sekundi da bi se mort pravilno ugradio.



*Slika 12, Svježi mort u kalupima na vibro stolu [slike zabilježene tijekom ispitivanja]*

Nakon vibriranja kalupi se skidaju s vibro stola te se uklanja suvišni dio morta koji prelazi preko rubova kalupa.

Postupak je jednako ponavljan za sve uzorke.

Uzorci stoje u kalupima 24 sata i to u kontroliranim uvjetima, odnosno pri relativnoj vlažnosti zraka većoj od 90% i na temperaturi  $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ . Nakon 24 sata uzorci se vade iz kalupa i potapaju u vodu gdje se čuvaju do dana ispitivanja.



Serija uzoraka R1

Serija uzoraka R2

Serija uzoraka R3

Serija uzoraka R4

*Slika 13, Ugrađeni mort u kalupima u komori [slike zabilježene tijekom ispitivanja]*

Nakon šest dana serije uzoraka su izvađene iz vode te obrisane tako da im površina bude suha (vodom zasićeni, površinski suhi uzorci).



*Slika 14, Vodom zasićeni uzorci [slike zabilježene tijekom ispitivanja]*

### 3.5 Ispitivanje morta nerazornom metodom-metoda ultrazvuka

Nakon šest dana čuvanja u komori, vodom zasićeni uzorci su ispitani nerazornim metodama. Prvo su svi uzorci izvagani. Na temelju mase i dimenzija uzoraka dobivena je gustoća. Zatim su se metodom ultrazvuka dobile brzine longitudinalnog ultrazvučnog impulsa. Na osnovu svih navedenim podataka, matematičkim postupcima, su izračunati dinamički moduli elastičnosti uzoraka te srednje vrijednosti za svaku seriju uzoraka.

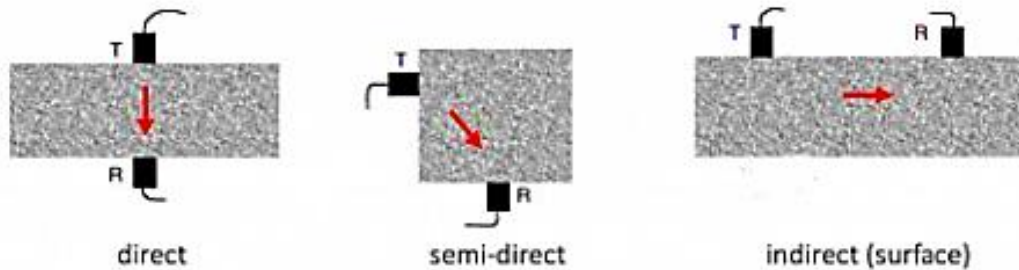
Metoda ultrazvuka je jako jednostavna. Za mjerenje se koristi specijalni generator. Prijenos ultrazvučnih valova se vrši pomoću posebnih prijenosnika. Na prijenosnike i na rubove elementa se stavlja gel koji omogućava bolji unos uzdužnih, poprečnih i površinskih ultrazvučnih valova kroz element (Slika 15). Zatim prijemnik pretvara mehaničke valove u električne, a indikator vremena daje vrijeme trajanja kretanja ultrazvuka.

Zbog jednostavnosti ova metoda ima široku primjenu u građevinarstvu.



*Slika 15, Ispitivanje brzine ultrazvuka [slika zabilježena tijekom ispitivanja]*

Postoje tri načina mjerenja brzine ultrazvuka: direktna, semi-direktna i indirektna (slika 16). Za potrebe ovog ispitivanja je korištena direktna metoda kao što je vidljivo na slici 15.



Slika 16, Načini mjerenja brzine ultrazvuka [10]

Vrijednost koja se očitava na uređaju je vrijeme trajanja kretanja ultrazvuka,  $t_{UZV}$ . Poznavajući dužinu puta tj. duljinu uzorka ( $L$ ) i vrijeme kretanja ultrazvuka, dolazi se do brzine ultrazvuka  $v$ .

$$v = \frac{L}{t_{UZV}} \quad [m/s]$$

Vaganjem uzoraka dobiva se masa uzorka ( $m$ ). Poznavajući masu i dimenzije uzorka ( $b \times h \times L$ ), dolazi se do gustoće uzorka  $\rho$ .

$$\rho = \frac{m}{b \cdot h \cdot L} \quad [kg/dm^3]$$

Na temelju izračunatih vrijednosti brzine ultrazvuka i gustoće, izračunava se dinamički modul elastičnosti  $E_d$ .

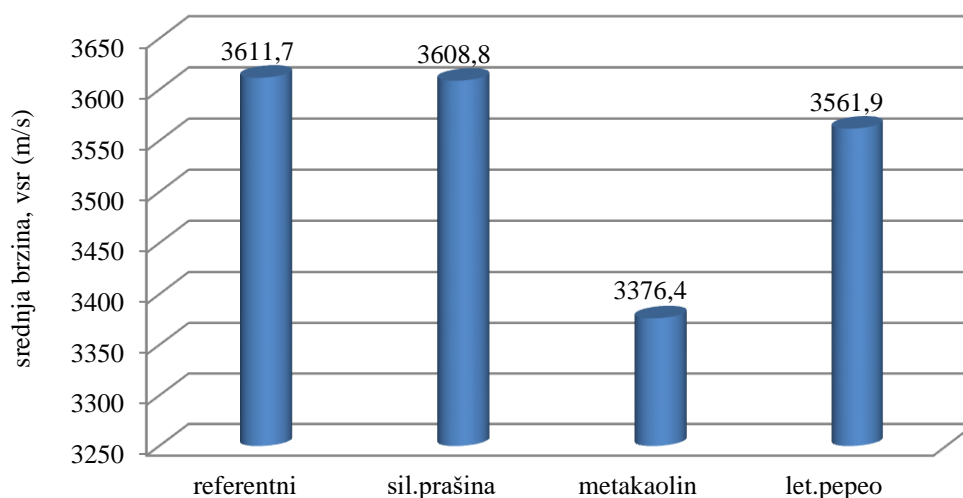
$$E_d = \frac{v^2 \cdot \rho \cdot (1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \quad [MPa]$$

### 3.5.1 Rezultati ispitivanja morta nerazornim metodama

Tablica 7, Rezultati ispitivanja brzine ultrazvuka

	v (m/s)	$v_{sr}$ (m/s)
Receptura 1	3555,6	3611,7
	3433,5	
	3846,2	
Receptura 2	3661,3	3606,8
	3603,6	
	3555,6	
Receptura 3	3404,3	3376,4
	3426,1	
	3299,0	
Receptura 4	3644,6	3561,9
	3539,8	
	3501,1	

Iz tablice 7 je vidljivo kako se dodatkom mineralnog dodatka smanjuje brzina ultrazvuka, što je i očekivano. Zanimljivo manja brzina je zabilježena na uzorcima s dodatkom silikatne prašine. Razlog tomu je njegova veličina čestica koja je manja od čestica cementa, ali ipak ne manja od čestica ostalih dodataka. Leteći pepeo i metakaolin svojim izrazito sitnim česticama (sitnijim od silikatne prašine) smanjuju potrebu za vodom jer se smanjuje volumen zraka i tako mort čine gušćim i smanjuju brzinu ultrazvuka. Osobito je to izraženo kod metakaolina koji ima posebno "pakiranje čestica". Posljedično, uzorci s dodatkom letećeg pepela bilježe brzinu manju za  $\approx 100$  m/s, dok uzorci s metakaolinom najmanju brzinu (manju za  $\approx 300$  m/s).

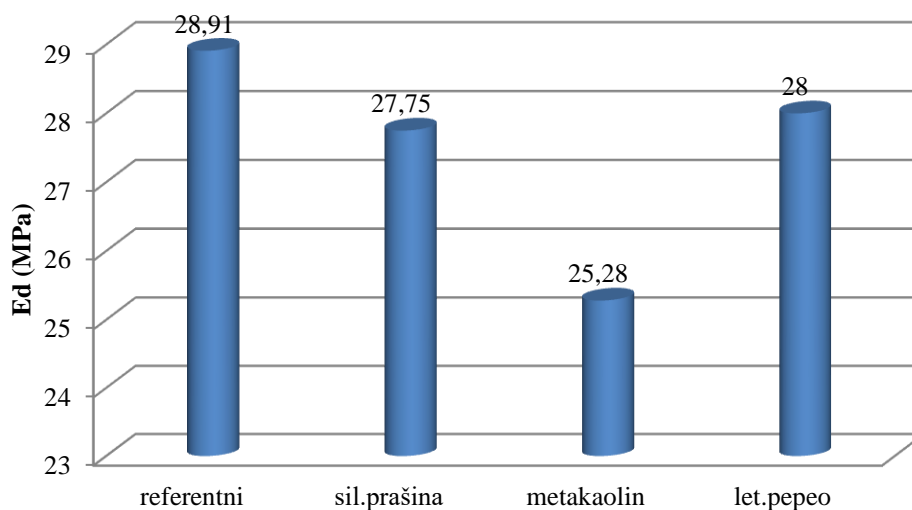


Graf 4, Srednje vrijednosti brzine ultrazvuka

Tablica 8, Dobivene vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti

	Ed (MPa)	Ed <sub>sr</sub> (MPa)
Receptura 1	27,94	28,91
	26,21	
	32,77	
Receptura 2	28,53	27,75
	27,72	
	26,99	
Receptura 3	25,70	25,28
	25,98	
	24,18	
Receptura 4	29,29	28,00
	27,73	
	26,99	

Kao što je vidljivo iz tablice 8 dinamički moduli elastičnosti opadaju na uzorcima s mineralnim dodacima. Međutim, uzorci s dodatkom silikatne prašine i letećeg pepela bilježe približne vrijednosti modula elastičnosti naspram referentnih uzoraka, ali uzorci s metakaolinom ne. Razlog tomu je opet, već navedeno, posebno "pakiranje čestica" metakaolina.



Graf 5, Srednje vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti

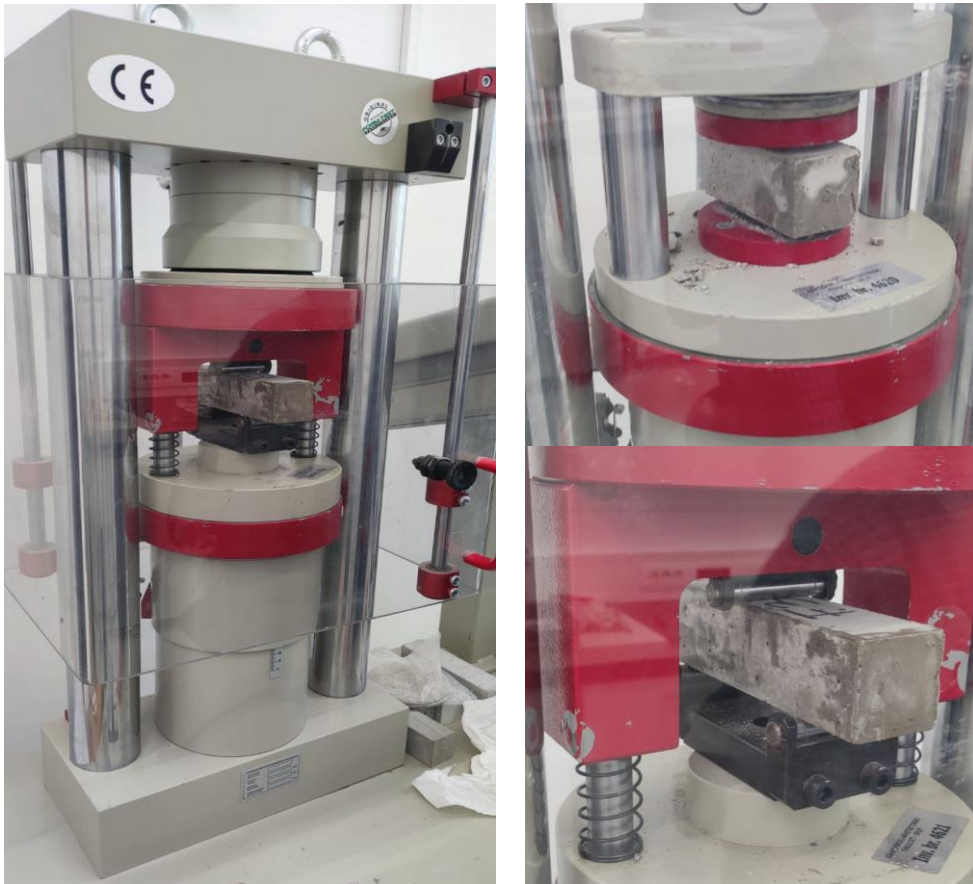
### 3.6 Ispitivanje čvrstoće morta

Nakon ispitivanja brzine ultrazvuka, ispitana je čvrstoća uzoraka na vlak savijanjem i na pritisak prema HRN B.C8.022.

Prvo je ispitana čvrstoća na vlak savijanjem,  $f_{sav}$ . Svaka prizma (40x40x60 mm) je ispitana kao prosta greda raspona L na uređaju koji ima mogućnost ispitivanja vlačne i tlačne čvrstoće (Slika 17). Uzorak se stavio u stroj i postepeno opterećivao do loma. U tom trenutku su očitani naprezanje i sila F. Naprezanje na rubu poprečnog presjeka prizme pri lomu iznosi:

$$f_{sav} = \frac{M}{W} = \frac{F \cdot l}{\frac{4}{b^3}} = \frac{3}{2} \frac{l}{b^3} F \quad [MPa]$$

Kao rezultat ispitivanja je uzeta srednja vrijednost 3 pojedinačna rezultata.



Slika 17, Ispitivanje čvrstoće morta [slike zabilježene tijekom ispitivanja]



Zatim je ispitana čvrstoća na pritisak tj. tlačna čvrstoća,  $f_{tlak}$ . Ispitivanje se vršilo na polovicama prizma dobivenim nakon ispitivanja savojne čvrstoće (Slika 18).



*Slika 18, Polovice prizmi nakon ispitivanja savojne čvrstoće*

*[Slika zabilježena tijekom ispitivanja]*

Tlačna čvrstoća na svaku polovicu prizme iznosi:

$$f_{tlak} = \frac{F}{A} \quad [MPa]$$

Kao rezultat ispitivanja je uzeta srednja vrijednost 6 pojedinačnih rezultata.

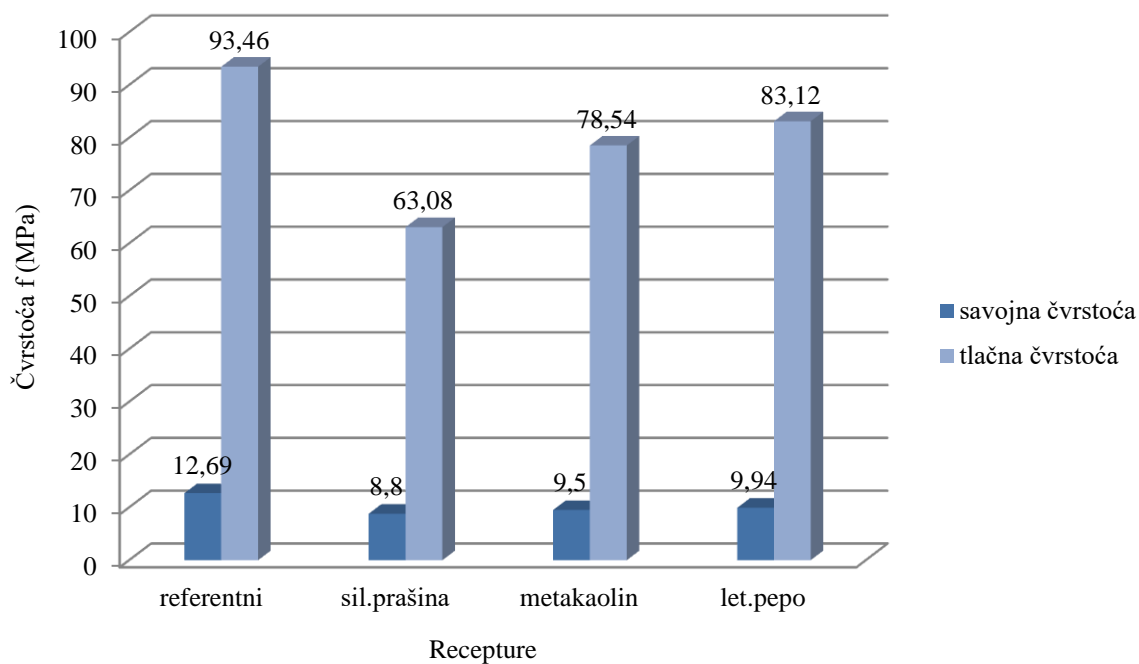
### 3.6.1 Rezultati ispitivanja čvrstoće morta

Tablica 9, Srednje vrijednosti čvrstoća

	Savojna čvrstoća $f_{sav}$ (MPa)	Tlačna čvrstoća $f_{tlak}$ (MPa)
Receptura 1	12,69	93,46
Receptura 2	8,80	63,08
Receptura 3	9,50	78,54
Receptura 4	9,94	83,12

Detaljni rezultati ispitivanja čvrstoće su dani u prilogima. Iz tablice 9 je vidljivo kako su recepture s mineralnim dodacima pokazale manju čvrstoću naspram referentne recepture. Dakle, dodatkom mineralnog dodatka pada čvrstoća. Da bi se postigla veća čvrstoća od referentne, morao se dodati odgovarajući superplastifikator kao što je navedeno u tehničkim listovima korištenih mineralnih dodataka.

Najveću čvrstoću je pokazala receptura s dodatkom letećeg pepela pa metakaolina i na posljetku silikatne prašine (Graf 6).



Graf 6, Srednje vrijednosti čvrstoća

Iako mortovi s dodatkom silikatne prašine daju veću čvrstoću nego oni s letećim pepelom, ovo ispitivanje nije tako pokazalo.

Prvi razlog je vodovezivni faktor. Smanjenjem vodovezivnog faktora morta s dodatkom letećeg pepela, osigurana je veća početna čvrstoća. Da bi se postigla veća čvrstoća morta sa silikatnom prašinom, vodovezivni faktor je trebalo povećati. Drugi razlog su spomenuti superplastifikatori. Ovo ispitivanje je još jedan dokaz važnosti njihove uporabe u mortovima s mineralnim dodacima.

Ako se uspoređi mort s metakaolinom i mort s letećim pepelom, veću čvrstoću opet daje mort s letećim pepelom. Pucolanski učinak metakaolina između 3 i 14 dana starosti uzoraka kao ni njegova dobra reakcija s kalcijevim hidroksidima, nije dala veću čvrstoću od morta s letećim pepelom.

## 5 ZAKLJUČAK

Korištenje mineralnih dodataka predstavlja izrazit napredak u građevinarstvu, osobito kad je riječ o utjecaju na okolišu. U ovom radu su obrađeni mineralni dodaci: silikatna prašina, metakaolin i leteći pepeo. S obzirom na to da Portland cementa razvije čvrstoću tek za 28 dana, nije bio prikladan za ovo ispitivanje. Stoga je korišten kalcij-aluminatni cement (Istra 50 5.0), koji razvije istu čvrstoću za 24 sata.

Za potrebe eksperimentalnog dijela rada, napravljene su 4 recepture morta. Jedna receptura je napravljena kao referentna (bez dodatka), kako bi se mogli analizirati rezultati mortova s mineralnim dodacima. U preostale recepture su dodani mineralni dodaci u jednakim količinama (10%). Jedini izuzetak je receptura s dodatkom letećeg pepela gdje je dodana manja količina vode da bi se zadovoljio uvjet koncepta k-vrijednosti i održao vodovezivni faktor. Razlog tomu je neaktivnost letećeg pepela. Dakle, mineralnim dodacima obradivost morta se povećava od plastično-elastične konzistencije prema tekućoj.

Ispitivanjem obradivosti svježeg morta bez dodatka dobiven je promjer pogače na potresnom stolu u veličini od 170 mm. U nastavku ispitivanja morta s dodacima promjer se povećavao. Receptura s dodatkom letećeg pepela je imala promjer 186,5 mm. Tu u obzir treba uzeti smanjenje količine vode za 25 ml. Na recepturi s dodatkom silikatne prašine je dobiven promjerom od 187 mm, a najveći promjer je kod recepture s dodatkom metakaolina- 215 mm, što iznosi 26,47 % više u odnosu na referentnu recepturu i oko 15 % u odnosu na druge mineralne dodatke. Time se dokazuje kako mineralni dodaci uistinu povećavaju obradivost svježeg morta bez povećanja količine vode.

Ultrazvučno ispitivanje je pokazalo kako mineralni dodaci smanjuju brzinu ultrazvuka kroz mort. Nešto manju brzinu od referentne je pokazala receptura sa silikatnom prašinom. Dok je najmanju brzinu pokazala receptura s letećim pepelom. Srednje vrijednosti dinamičkog modula elastičnosti su u korelaciji s rezultatima brzine ultrazvuka.

Ispitivanjem čvrstoće se pokazalo kako mineralni dodaci ne povećavaju čvrstoću morta od kalcij-aluminatnog cementa. Sve recepture s dodacima su dale manje čvrstoće od referentne. Najbolji rezultat je ipak dala receptura s dodatkom letećeg pepela - 83,12 MPa, što iznosi 11,06 % manje u odnosu na referentnu recepturu. Receptura s metakaolinom je pokazala bolju čvrstoću (78,54 MPa) u odnosu na recepturu sa silikatnom prašinom (63,08 MPa). Točnije,

16,55 % veću od recepture sa silikatnom prašinom. Moguće uzrok male čvrstoće receptura sa silikatnom prašinom i metakaolinom je taj da nisu imali dovoljno C-S-H faza za vezanje. Naravno, za dokaz je potrebna detaljna analiza mehanizma vezivanja. U obzir treba uzeti i smanjene količina vode u recepturi s letećim pepelom zbog koncepta k-vrijednosti.

Naposljetku, možemo zaključiti da se mineralnim dodacima u kombinaciji s kalcij-aluminatnim cementom mogu poboljšati određena svojstva mortova kao što je obradivost, ali ne nužno i čvrstoća. Najbolju kompatibilnost sa kalcij-aluminatnim cementom za postizanje obradivosti je pokazao metakaolin, za postizanje gustoće i brzine ultrazvuka silikatna prašina, a za postizanje čvrstoće leteći pepeo. Stoga, ako je potrebno poboljšati navedena svojstva morta s kalcij-aluminatnog cementa, njihova uporaba je opravdana.

---

## LITERATURA

- [1] Juradin S., Krstulović P.: Samozbijajući beton; Predavanja iz Građevinskih materijala
- [2] Ukrainczyk V.: Beton-Struktura svojstva tehnologija
- [3] Krstulović P.: Svojstva i tehnologija betona, Građevinsko – arhitektonski fakultet sveučilišta u Splitu i Institut građevinarstva Hrvatske, Split, 2000.
- [4] Cement chemistry, 2nd edition by H.F.W. Taylor, Emeritus Professor of Inorganic Chemistry, University of Aberdeen
- [5] Leas Chemistry of Cement and Concrete 5th Edition 2019 by Peter Hemlet, Martin Liska
- [6] Nonconventional and Vernacular Construction Materials, 2016
- [7] Developments in the Formulation and Reinforcement of Concrete (Second Edition), 2019
- [8] Građevinar 10/2017, Fizikalno-mehanička svojstva letećeg pepela primjenjivog pri građenju cesta
- [9] Građevinski materijali, Mihailo Muravljov
- [10] Primjena nerazornih ispitivanja u građevinarstvu, Banjard Pečur I.
- [11] <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=11190>
- [12] <http://docplayer.rs/193718524-Betoni-visokih-%C4%8Dvrsto%C4%87a-i-visokih-uporabnih-svojstava.html>
- [13] <https://hr.delachieve.com/leteci-pepeo-opis-sastav-gost-ocjene-i-posebnu-primjenu/>
- [14] <https://en.wikipedia.org/wiki/Metakaolin>

**PRILOZI****Ispitivanje gustoće i brzine ultrazvuka****R1**

uzorak	Masa	b	h	L	$\rho$	$t_{UZV}$	v
	(g)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/dm <sup>3</sup> )	(Ms)	(m/s)
prizma 1	597,5	40	40	160	2,334	45,0	3555,6
prizma 2	601,1	40	40	160	2,348	46,6	3433,5
prizma 3	589,9	40	40	160	2,339	41,6	3846,2
srednja brzina ultrazvuka $v_{sr} = 3611,70$ (m/s)							
srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{s,sr} = 28,91$ (MPa)							

**R2**

uzorak	Masa	b	h	L	$\rho$	$t_{UZV}$	v
	(g)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/dm <sup>3</sup> )	(Ms)	(m/s)
prizma 1	575,3	40	40	160	2,447	43,7	3661,3
prizma 2	577,1	40	40	160	2,454	44,4	3603,6
prizma 3	577,3	40	40	160	2,755	45,0	3555,6
srednja brzina ultrazvuka $v_{sr} = 3606,80$ (m/s)							
srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{s,sr} = 27,75$ (MPa)							

**R3**

uzorak	Masa	b	h	L	$\rho$	$t_{UZV}$	v
	(g)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/dm <sup>3</sup> )	(Ms)	(m/s)
prizma 1	599,4	40	40	160	2,341	47,0	3404,3
prizma 2	598,3	40	40	160	2,337	46,7	3426,1
prizma 3	600,5	40	40	160	2,346	48,5	3299,0
srednja brzina ultrazvuka $v_{sr} = 3376,40$ (m/s)							
srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{s,sr} = 25,28$ (MPa)							

**R4**

uzorak	Masa	b	h	L	$\rho$	$t_{UZV}$	v
	(g)	(mm)	(mm)	(mm)	(kg/dm <sup>3</sup> )	(Ms)	(m/s)
prizma 1	596,1	40	40	160	2,329	43,9	3644,6
prizma 2	598,3	40	40	160	2,337	46,2	3539,8
prizma 3	595,2	40	40	160	2,325	45,7	3501,1
srednja brzina ultrazvuka $v_{sr} = 3561,90$ (m/s)							
srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{s,sr} = 28,0$ (MPa)							

**Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće****R1**

Ispitivanje na savijanje			Ispitivanje na pritisak		
uzorak	Savojna čvrstoća $f_{sav}$ (MPa)	Sred. vrij. $f_{sav}$	uzorak	Tlačna čvrstoća $f_{tlak}$ (MPa)	Sred. vrij. $f_{tlak}$
1	11,12	12,69	1a	93,11	93,46
			1b	93,35	
2	13,58		2a	92,71	
			2b	93,04	
3	13,37		3a	91,61	
			3b	96,92	

**R2**

Ispitivanje na savijanje			Ispitivanje na pritisak		
uzorak	Savojna čvrstoća $f_{sav}$ (MPa)	Sred. vrij. $f_{sav}$	uzorak	Tlačna čvrstoća $f_{tlak}$ (MPa)	Sred. vrij. $f_{tlak}$
1	8,85	8,80	1a	65,31	63,08
			1b	66,21	
2	8,55		2a	64,51	
			2b	55,54	
3	8,99		3a	62,84	
			3b	64,07	

**R3**

Ispitivanje na savijanje			Ispitivanje na pritisak		
uzorak	Savojna čvrstoća $f_{sav}$ (MPa)	Sred. vrij. $f_{sav}$	uzorak	Tlačna čvrstoća $f_{tlak}$ (MPa)	Sred. vrij. $f_{tlak}$
1	9,39	9,50	1a	80,03	78,54
			1b	75,28	
2	8,97		2a	78,57	
			2b	80,74	
3	10,14		3a	75,73	
			3b	76,89	

**R4**

Ispitivanje na savijanje			Ispitivanje na pritisak		
uzorak	Savojna čvrstoća $f_{sav}$ (MPa)	Sred. vrij. $f_{sav}$	uzorak	Tlačna čvrstoća $f_{tlak}$ (MPa)	Sred. vrij. $f_{tlak}$
1	9,72	9,94	1a	87,02	83,12
			1b	82,12	
2	10,52		2a	82,24	
			2b	80,68	
3	9,58		3a	81,76	
			3b	84,88	