

# Upotreba cementnog otpadnog mulja kao zamjenskog materijala u mortu

---

**Filipović, Tin**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2023**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering / Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:157:471974>

*Rights / Prava:* [Attribution 4.0 International](#)/[Imenovanje 4.0 međunarodna](#)

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



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Civil Engineering - FCERI Repository](#)



image not found or type unknown

**SVEUČILIŠTE U RIJECI**  
**GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Tin Filipović**

**Upotreba cementnog otpadnog mulja kao zamjenskog materijala u  
mortu**

**Završni rad**

**Rijeka, 2023.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Sveučilišni prijediplomski studij  
Građevinarstvo  
Inženjerski materijali**

**Tin Filipović  
JMBAG: 0114032650**

**Upotreba cementnog otpadnog mulja kao zamjenskog materijala u  
mortu**

**Završni rad**

**Rijeka, rujan 2023.**

## **IZJAVA**

Završni rad izradio sam samostalno, u suradnji s mentoricom i uz poštivanje pozitivnih građevinskih propisa i znanstvenih dostignuća iz područja građevinarstva. Građevinski fakultet u Rijeci je nositelj prava intelektualnog vlasništva u odnosu na ovaj rad.

---

Tin Filipović

U Rijeci, 10. kolovoza 2023.

## ZAHVALA

*Zahvaljujem mentorici doc. dr. sc. Natalija Bede Odorčić na odličnom mentorstvu, pomoći i strpljenju. Zahvaljujem se svim laborantima na pomoći i savjetima prilikom izrade ovog završnog rada te toplom radnom okruženju i atmosferi u laboratoriju.*

## SAŽETAK

Proizvodnja betona doživjela je značajan porast diljem svijeta. Beton je ključni materijal u građevinskoj industriji i koristi se za izgradnju različitih objekata, od stambenih i poslovnih zgrada do infrastrukturnih projekata kao što su mostovi, ceste i tuneli. Međutim, ovaj porast proizvodnje betona ima negativne ekološke posljedice. Proizvodnja betona i cementa zahtijeva velike količine prirodnih sirovina poput pijeska, šljunka i vapnenca. Prekomjerna eksploatacija ovih sirovina može imati ozbiljne posljedice na okoliš, uključujući eroziju obala, degradaciju staništa i potencijalno iscrpljivanje tih resursa. Kako bi se smanjila prekomjerna upotreba prirodnih sirovina i ublažio negativan utjecaj proizvodnje betona na okoliš, raste potražnja za zamjenskim materijalima. Alternativni materijali postaju sve popularniji jer mogu uključivati i otpadne materijale čime se rješava problem njegovog zbrinjavanja, poput danas sve češće korištenog recikliranog agregata koji se dobiva drobljenjem građevnog otpada. S obzirom na navedene činjenice, osnovna ideja ovog rada je upotreba otpadnog materijala nastalog u procesu proizvodnje betona. U ovom radu ispitivan je cementni otpadni mulj koji se generira u taložniku nakon odvajanja od otpadne vode u postrojenjima koji se bave spravljanjem betonskih i cementnih mješavina. Eksperimentalni dio rada se temeljio na izradi vlastitih mješavina cementnog morta u kojima se cement zamijenio s cementnim otpadnim muljem u količini od 0%, 5%, 10% te 15% mase cementa. Rezultati ispitivanja mješavina s različitim udjelima cementnog otpada uspoređivani su s referentnom mješavinom. Cilj je dobiti cementnu mješavinu s određenim udjelom cementnog otpadnog mulja koja i dalje zadovoljava uvijete čvrstoće zahtijevane normom za cement korišten za spravljanje referentne mješavine. Ustanovljen je gubitak obradivosti mješavina s povećanjem udjela cementnog otpadnog mulja. Na očvrslim uzorcima cementnog morta provedeno je standardno ispitivanje čvrstoće cementa, koje uključuje ispitivanje čvrstoće na tlak kao i ispitivanje vlačne čvrstoće pri savijanju. Sve očvrslje mješavine cementnog morta ispitane su pri starosti od 3 dana i 28 dana. Kao i kod standardnih uzoraka morta, uzorci veće starosti postižu veću čvrstoću, što sugerira da se unutar tog vremenskog razdoblja odvijaju određeni procesi stvrdnjavanja. Rezultati ispitivanja pokazuju da tlačna i vlačna čvrstoća materijala padaju s povećanjem količine cementnog otpadnog mulja u mješavini.

**Ključne riječi:** zamjenski materijali, cementni otpadni mulj, cementni mort, konzistencija rasprostiranjem, tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća savijanjem

## ABSTRACT

The production of concrete has experienced significant growth worldwide. Concrete is a key material in the construction industry and is used in the construction of various structures, from residential and commercial buildings to infrastructure projects such as bridges, roads, and tunnels. However, this increase in concrete production has negative environmental consequences. The production of concrete and cement requires large quantities of natural resources such as sand, gravel, and limestone. Excessive exploitation of these resources can have serious environmental consequences, including coastal erosion, habitat degradation, and potential resource depletion. To reduce the excessive use of natural resources and mitigate the negative impact of concrete production on the environment, there is a growing demand for alternative materials. Alternative materials are becoming increasingly popular because they can include waste materials, solving the problem of their disposal, such as the commonly used recycled aggregate obtained by crushing construction waste. Given these facts, the basic idea of this thesis is to use waste material generated in the concrete production process. This thesis examines cement waste sludge generated in settling tanks after separation from wastewater in facilities that deal with the preparation of concrete and cement mixtures. The experimental part of the study was based on the preparation of custom cement mortar mixes in which cement was replaced with cement waste sludge in amounts of 0%, 5%, 10%, and 15% by weight of cement. The results of testing mixes with different proportions of cement waste were compared to a reference mix. The goal is to obtain a cement mixture with a certain proportion of cement waste sludge that still meets the strength requirements specified by the standard for cement used in the preparation of the reference mix. A loss of workability of the mixes was observed as the proportion of cement waste sludge increased. Standard cement strength tests were conducted on hardened cement mortar samples, including compressive strength testing and flexural strength testing. All hardened cement mortar mixtures were tested at 3 days and 28 days of age. As with standard mortar samples, samples at a greater age achieved higher strength, suggesting that certain curing processes occur within that time frame. The test results show that the compressive and flexural strength of the material decreases with increasing amounts of cement waste sludge in the mixture.

**Keywords:** substitution materials, cement waste sludge, cement mortar, workability, compressive strength, flexural strength

## POPIS TABLICA

Tablica 1. Prikaz određivanja granulometrijskog sastava cementnog otpadnog mulja za uzorak br. 1 .....	8
Tablica 2. Prikaz određivanja granulometrijskog sastava cementnog otpadnog mulja za uzorak br. 2. ....	9
Tablica 3. Prikaz određivanja granulometrijskog sastava cementnog otpadnog mulja za uzorak br. 3 .....	9
Tablica 4. Rezultat ispitivanja gustoće cementnog otpada .....	13
Tablica 5. Tipična fizikalna i kemijska svojstva i usporedba s normom HRN EN 197-1 [5] .....	14
Tablica 6. Prikaz određivanja granulometrijskog sastava cementa za uzorak br. 1 .....	15
Tablica 7. Prikaz određivanja granulometrijskog sastava cementa za uzorak br. 2 .....	16
Tablica 8. Prikaz određivanja granulometrijskog sastava cementa za uzorak br. 3 .....	16
Tablica 9. Količina materijala za spravljanje referentne mješavine .....	21
Tablica 10. Promjer rasprostiranja svježeg morta .....	34
Tablica 11. Dimenzije i mase uzoraka starosti od 3 dana .....	40
Tablica 12. Dimenzije i mase uzoraka starosti od 28 dana .....	41
Tablica 13. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem pri starosti od 3 i 28 dana .....	43
Tablica 14. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće pri starosti od 3 dana .....	43
Tablica 15. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće pri starosti od 28 dana .....	44
Tablica 16. Dimenzije i mase uzoraka nakon 3 dana njegovanja .....	45
Tablica 17. Dimenzije i mase uzoraka nakon 28 dana njegovanja .....	46
Tablica 18. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem mješavine CM 5% pri starosti od 3 i 28 dana ..	47
Tablica 19. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine CM 5% pri starosti od 3 i 28 dana .....	48
Tablica 20. Dimenzije i mase uzoraka nakon 3 dana njegovanja .....	50
Tablica 21. Dimenzije i mase uzoraka nakon 28 dana njegovanja .....	51
Tablica 22. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem mješavine CM 10% pri starosti od 3 i 28 dana	52
Tablica 23. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine CM 10% pri starosti od 3 i 28 dana .....	53



Tablica 24. Dimenzije i mase uzoraka nakon 3 dana njegovanja .....	55
Tablica 25. Dimenzije i mase uzoraka nakon 28 dana njegovanja .....	56
Tablica 26. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem mješavine CM15%? i CM 15% pri starosti od 3 i 28 dana.....	57
Tablica 27. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine CM15%? i CM 15% pri starosti od 3 i 28 dana .....	58
Tablica 28. Rezultati ispitivanja vlačnih čvrstoća svih uzoraka.....	60
Tablica 29. Rezultati ispitivanja tlačnih čvrstoća svih uzoraka.....	61

## POPIS SLIKA

Slika 1. Sušionik.....	5
Slika 2. Prosijavanje uzorka cementnog otpadnog mulja .....	5
Slika 3. Uređaj za prosijavanje .....	6
Slika 4. Korištena sita za prosijavanje uzorka cementa i cementnog otpada .....	7
Slika 5. Prikaz granulometrijske krivulje za 3 prosijana uzorka cementnog otpadnog mulja .....	10
Slika 6. Tikvica Le Chatelier-a .....	11
Slika 7. Očitavanje volumena na Le Chatelierovoj tikvici.....	12
Slika 8. Prikaz granulometrijske krivulje za prosijana 3 uzorka cementa .....	15
Slika 9. Pijesak frakcije od 0 do 4mm.....	19
Slika 10. Izvagana količina cementa za spravljanje referente mješavine .....	21
Slika 11. Stolna miješalica za spravljanje morta .....	23
Slika 12. Normirano spravljanje cementnog morta .....	24
Slika 13. Uzorak na potresnom stoliću .....	25
Slika 14. Prikaz kalupa korištenog za ispitivanje .....	25
Slika 15. Promjer rasprostiranja svježeg morta .....	26
Slika 16. Ugrađivanje smjese u kalupe.....	28
Slika 17. Rasprostiranje cementne mješavine CM5%.....	30
Slika 18. Rasprostiranje cementne mješavine CM10%.....	31
Slika 19. Rasprostiranje cementne mješavine CM15%.....	33
Slika 20. Usporedna rezultata rasprostiranja svih mješavina.....	34
Slika 21. Uređaji za ispitivanje čvrstoće.....	35

Slika 22. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem.....	36
Slika 23. Primjer završenog ispitivanja na vlačnu čvrstoću.....	38
Slika 24. Pomična mjerka.....	40
Slika 25. Tipični primjer grafa sila tokom vremenu za uzorak REF – 1 nakon ispitivanja vlačne čvrstoće.....	42
Slika 26. Tipični primjer grafa sila tokom vremenu za uzorak Tref 1 – 1 nakon ispitivanja tlačne čvrstoće.....	42
Slika 27. Rezultati vlačnih čvrstoća svih uzoraka starosti 3 dana.....	62
Slika 28. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće svih uzoraka starosti 28 dana .....	62
Slika 29. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće svih uzoraka starosti 3 dana.....	63
Slika 30. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće svih uzoraka starosti 28 dana.....	63

## SADRŽAJ

<b>1. UVOD.....</b>	<b>1</b>
<b>2. KORIŠTENI MATERIJALI .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Cementni otpad .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1.1. Finoća mliva cementnog otpada.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.2. Fizikalni parametri.....</b>	<b>11</b>
<b>2.2. Cement.....</b>	<b>14</b>
<b>2.3. Pijesak.....</b>	<b>17</b>
<b>2.4. Voda.....</b>	<b>19</b>
<b>3. MJEŠAVINE MORTA.....</b>	<b>20</b>
<b>3.1. Referentna mješavina, REF.....</b>	<b>27</b>
<b>3.2. Mješavina CM5%.....</b>	<b>29</b>
<b>3.3. Mješavina CM10%.....</b>	<b>31</b>
<b>3.4. Mješavina CM15%.....</b>	<b>32</b>
<b>3.5. Usporedba rezultat ispitivanja konzistencije metodom rasprostiranja.....</b>	<b>33</b>
<b>4. ISPITIVANJE ČVRSTOĆA CEMENTNIH PRIZMI.....</b>	<b>35</b>
<b>4.1. Postupak ispitivanja i konfiguracija hidrauličke preše.....</b>	<b>36</b>
<b>4.2. Čvrstoća referentne mješavine, REF.....</b>	<b>39</b>
<b>4.3. Čvrstoća mješavine CM5%.....</b>	<b>45</b>

4.4.	Čvrstoća mješavine CM10%.....	49
4.5.	Čvrstoća mješavine CM15%? i CM15%.....	54
4.6.	Usporedba rezultata ispitivanja čvrstoće .....	59
5.	USPOREDBA REZULTATA I ZAKLJUČAK.....	64
6.	LITERATURA.....	66

## 1. UVOD

Globalna potražnja za tehnologijama recikliranja i odlaganja i dalje raste, jer su sirovine sve manje dostupne, a pitanje "ekoloških aspekata" sve više se stavlja u prvi plan. . Ekološki održiva gradnja predstavlja ključni i presudni element u građevinskoj industriji. Glavni cilj građevinske industrije jest da količina proizvedenog otpada bude što manja pa recikliranje otpadnih materijala postaje sve važnije. Građevinske tvrtke su i bit će sve više primorane koristiti reciklirane materijale. Proizvodnim metodama s malo otpada i odgovarajućim procesima recikliranja moguće je smanjiti povećanje količine otpada. Ako se gore navedeni aspekti ne poštuju, to može dovesti do uništavanja okoliša. Zbog visokih zahtjeva, industrija recikliranja postaje sve više zastupljena i tako zadovoljava globalnu potražnju.

S ekonomskog gledišta, recikliranje se provodi samo kada su iskorišteni ostaci materijala jeftiniji od zbrinjavanja sirovina i kupnje novih. Recikliranje građevinskog materijala zato ovisi mnogo o tvrtkama koje provode isto. Većina tvrtki u građevinskoj industriji to zagovara budući da ekološka pitanja i ekologija postaju sve važniji u svim granama industrije [1].

Konkretno, cementni otpad se stvara kao nusprodukt na razne načine. Tijekom procesa proizvodnje cementa, dolazi do otpada u obliku prašine, pepela i drugih materijala koji se generiraju pri sagorijevanju goriva, kalcinaciji vapnenca i oblikovanju cementnog klinkera. Nalazimo ga prekomjerno i u građevinskom otpadu, poput betonskih ostataka nastali ljudskim djelovanjem ili prirodnim katastrofama. U posljednjih 3 godine zabilježena su veći potresi na nacionalnoj razini (Petrinja) te svjetskoj razini (Turska) koji su ostavili velike materijalne štete iza sebe. Radi toga treba pronaći rješenje da se maksimalno iskoristi otpadni materijal iz ruševina stambenih i poslovnih zgrada kao i obiteljskih kuća, kako bi njihova rekonstrukcija protekla što brže i ekonomičnije. U današnjem svijetu, gdje briga za okoliš postaje sve važnija, optimizacija procesa rekonstrukcije zgrada i kuća kako bi se maksimalno iskoristio otpadni materijal iz ruševina postaje ključan cilj. Ovaj pristup donosi nekoliko prednosti: smanjuje se potreba za novim sirovinama, smanjuju se troškovi i utjecaj na okoliš, te se ubrzava proces obnove.

Jedan od glavnih koraka prema održivijem pristupu građevinskoj industriji je selektivno prikupljanje i sortiranje otpadnog materijala prilikom rušenja. Ovo omogućava razdvajanje materijala poput betona, cigle, drva i metala, čime se stvaraju čiste struje otpada koje su pogodne

za daljnju obradu. Recikliranje je ključno u procesu. Na primjer, beton se može drobiti i koristiti kao agregat za spravljanje novog betona, čime se smanjuje potreba za novim kamenim agregatom. Drveni materijal može se iskoristiti za proizvodnju novih građevinskih komponenti ili kao izvor energije. Čak i metalni materijali mogu se reciklirati i koristiti za nove konstrukcije.

Da bi se postigla maksimalna učinkovitost u iskorištavanju otpadnog materijala, razvoj inovativnih tehnologija igra ključnu ulogu. Napredne drobilice i separacijski uređaji omogućavaju bolju obradu otpada i efikasnije razdvajanje materijala, što povećava kvalitetu recikliranog materijala. Standardizacija ovih materijala također je važna. Kroz uspostavljanje standarda za proizvode od recikliranog materijala, omogućava se njihova šira upotreba u građevinskim projektima, olakšavajući planiranje i izvođenje rekonstrukcija.

U ovom završnom radu ispitana je mogućnost primjene cementnog otpadnog mulja koji se generira u taložniku nakon odvajanja od otpadne vode u postrojenjima koji se bave spravljanjem betonskih i cementnih mješavina. Velika je težnja za ekološki prihvatljivim rješenjima, u obliku zbrinjavanja otpada te provođenju reciklaže i ponovnom iskorištavanju otpadnog materijala. Supstitucijom običnog cementa sa cementnim otpadom štedi se korištenje novo proizvedenog cementa i istovremeno zbrinjava nastali cementni otpad.

Eksperimentalni dio završnog rada uključuje izradu uzoraka cementnog morta standardnih dimenzija te ispitivanje karakteristika cementnog morta u svježem i očvrslom stanju. Ukupno su izrađene četiri cementne mješavine. Prva cementna mješavina spravljena je na standardni način, dakle sastojala se od cementa, pijeska i vode, u omjeru 1:3:0.5, te je nazvana referentnom mješavinom (oznaka REF). Preostale 3 (tri) mješavine cementnog morta dobivene su zamjenom udjela cementa sa suhim cementnim otpadom (cementni mulj), u udjelu od 5%, 10% i 15% ukupne mase cementa. Prilikom spravljanja mješavina svježeg morta ispitivana je konzistencija rasprostiranjem sukladno normi HRN EN 1015-3. Očvrslu uzorci oblika prizme dimenzija 40 mm x 40 mm x 160 mm ispitani su na tlak i na savijanje nakon 3 i 28 dana starosti kako bi se dobile vrijednosti tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće savijanjem.

Dobiveni rezultati ispitivanja uspoređeni su referentnom mješavinom. Cilj je dobiti cementnu mješavinu morta s određenim udjelom cementnog otpadnog mulja koja i dalje zadovoljava uvijete čvrstoće zahtijevane normom za cement korišten za spravljanje referentne mješavine.



## 2. KORIŠTENI MATERIJALI

Za spravljanje cementnih mješavina korišten je pijesak proizvođača Holcim d.o.o, cement oznake Holcim Lumen cement, CEM II/A-LL 42,5R; voda iz slavine te cementni otpad (mulj) iz taložnika Laboratorija za materijale Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Rijeci

Obradivost i konzistencija svježe smjese mora biti zadovoljena kako bi ugradnja u kalupe bila moguća pa se na svježim cementnim mješavinama ispitivala sukladno normi HRN EN 1015-3, Određivanje konzistencije svježeg betona pomoću potresnog stolića [3]. Izrađene i ispitane su ukupno četiri mješavine cementnog morta, od toga tri mješavine s različitim udjelima cementnog otpada te referentna mješavina koja ne sadrži cementni otpad.

### 2.1. Cementni otpadni mulj

Cementni otpadni mulj koji je korišten u svrhu izrade cementnih mješavina potječe iz taložnika Laboratorija za materijale Građevinskog fakulteta sveučilišta u Rijeci. Kako bi se cementni mulj mogao koristiti kao zamjena udjela cementa prethodno je posušen do stalne mase sušenjem na  $110 \pm 5^{\circ}\text{C}$  u sušioniku (Slika 1). Primijenjeni laboratorijski sušionik klasični je Memmertov uređaj za kontrolu temperature u znanosti, istraživanju i ispitivanju materijala u industriji [2]. Na tako pripremljenom uzorku cementnog otpadnog mulja su izvršena ispitivanja finoće mliva postupkom prosijevanja radi usporedivosti s cementom te gustoća.



Slika 1. Sušionik



Slika 2. Prosijavanje uzorka cementnog otpadnog mulja

### 2.1.1. Finoća mliva cementnog otpadnog mulja

Prije spravljanja svježih mješavina cementnog morta za uzorak suhog cementnog otpada određena je finoća mliva postupkom prosijavanja (Slika 3) . Ispitivanje finoće mliva cementnog otpada provedeno je prema normi HRN EN 196-6 Metode ispitivanja cementa-6. dio: Određivanje finoće mliva korištenjem uređaja za prosijevanje [4]).



Slika 3. Uređaj za prosijavanje

Prilikom postupka prosijavanja korištena su tri sita promjera 20 mm s kvadratnim otvorima različitih dimenzija : 0,2 mm; 0,1 mm i 0,063 mm te dno. (Slika 4). Sita se raspoređuju tako da na vrhu bude sito najvećeg otvora a na dnu sito najmanjeg otvora. Na dnu se prikupljaju sitne čestice promjera zrna manjeg od 0,063 mm. Vrijeme prosijavanja kroz uređaj za prosijavanje je određeno tako da se broj sita pomnoži s 2 minute. Jedan proces prosijavanja je sukladno tome trajao 6 minuta. Ukupno je prosijano 625 g cementnog otpadnog mulja, dakle 25 prosijavanja s 25 grama uzorka cementnog otpada (Slika 4).



Slika 4. Korištena sita za prosijavanje uzorka cementa i cementnog otpada

Po završetku postupka sisanja, materijala koji ostane na situ se pažljivo odstrani sa sita u posudu i izvaže, a masa zabilježi kao rezultat. Zatim se iz ostatka na situ računa postotak prolaza, a rezultat ispitivanja se prikazuje grafički granulometrijskom krivuljom. U sljedećim tablicama prikazana su po tri rezultata prosijavanja cementnog otpada (Tablice 1 do 3) i cementa (Tablice 6 do 8), te kumulativni postotak prolaza na pojedinom situ svakog od prosijanog uzorka.

Na Slikama 5 i 8 prikazane su granulometrijske krivulje cementnog otpada i cementa za ukupno 3 prosijanih uzorka za svaku vrstu materijala. Granulometrijska krivulja se prikazuje u koordinatnom sustavu gdje se na ordinati nalaze postoci prolaza pojedinih sita dok su na apscisi otvori sita u logaritamskom mjerilu. Na temelju dobivenih rezultata granulometrijskih krivulja vidljivo je da su čestice cementnog otpada znatno krupnije, samo oko 40% čestica cementnog otpada je manje od 0,1 mm.

Tablica 1. Prikaz određivanja granulometrijskog sastava cementnog otpadnog mulja za uzorak br.

1

Ispitivanje 1.	Masa $m_1=25$ g	Materijal Cementnog otpadnog mulja	
Otvor sita $D_i$ [mm]	Ostatak na situ $R_i$ [g]	Ostatak na situ [% ukupne mase] $100 \cdot R_i / m_1$	Kumulativni postotak prolaza [% ukupne mase] $100 - \sum(100 \cdot R_i / m_1)$
0,2	11,38	45,52	54,48
0,1	3,11	12,44	42,04
0,063	2,10	8,40	33,64
Dno	8,41	33,64	0

Tablica 2. Prikaz određivanja granulometrijskog sastava cementnog otpadnog mulja za uzorak br.

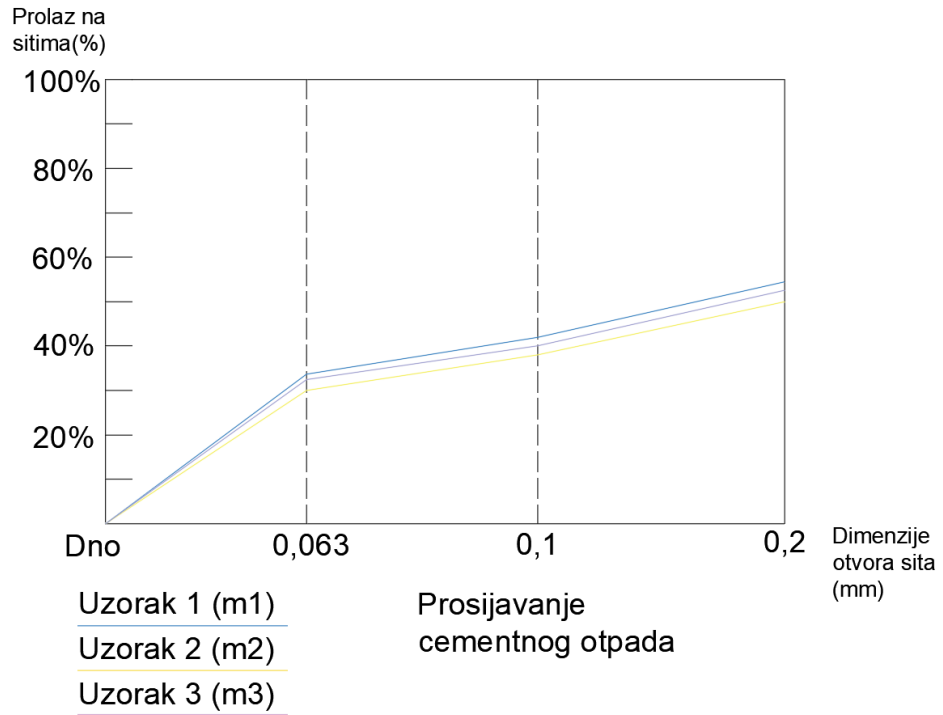
2

Ispitivanje 2.	Masa 25 g	Materijal Cementnog otpadnog mulja	
Otvor sita Di [mm]	Ostatak na situ Ri [g]	Ostatak na situ [% ukupne mase] $100 \cdot Ri/m_2$	Kumulativni postotak prolaza [% ukupne mase] $100 - \sum(100 \cdot Ri/m_2)$
0,2	12,54	50,16	49,84
0,1	2,98	11,92	37,92
0,063	1,80	7,20	30,72
Dno	7,68	30,72	0

Tablica 3. Prikaz određivanja granulometrijskog sastava cementnog otpadnog mulja za uzorak br.

3

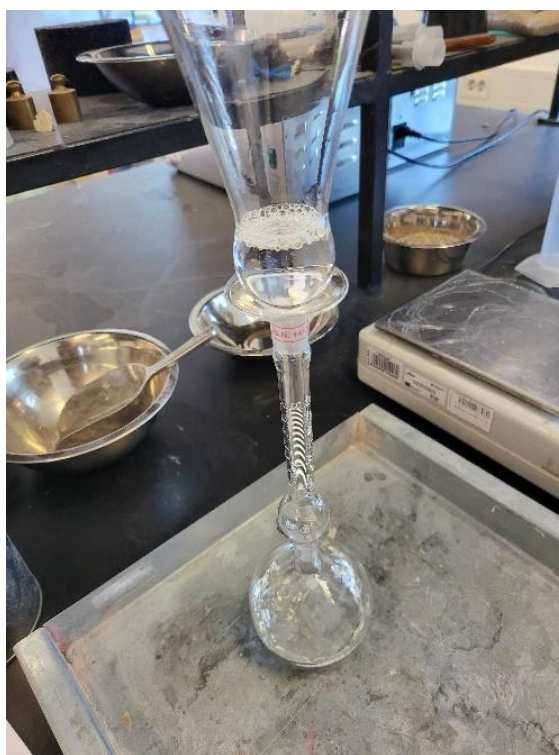
Ispitivanje 3.	Masa 25 g	Materijal Cementnog otpadnog mulja	
Otvor sita Di [mm]	Ostatak na situ Ri [g]	Ostatak na situ [% ukupne mase] $100 \cdot Ri/m_3$	Kumulativni postotak prolaza [% ukupne mase] $100 - \sum(100 \cdot Ri/m_3)$
0,2	11,83	47,32	52,68
0,1	3,16	12,64	40,04
0,063	1,87	7,48	32,56
Dno	8,14	32,56	0



Slika 5. Prikaz granulometrijske krivulje za 3 prosijana uzorka cementnog otpadnog mulja

### 2.1.2. Fizikalni parametri

Fizikalni parametri materijala su mjerne karakteristike koje opisuju fizička svojstva materijala. Gustoća, poroznost, toplinska vodljivost i električna vodljivost su samo neki od parametara. Kako bismo bolje razumjeli karakteristike cementnog otpada, potrebno je detaljnije proučiti svojstva i svojstvene značajke tog materijala. Le Chatelierov-a tikvica (Slika 6) korištena je za određivanje gustoće cementnog otpada.



Slika 6. Tikvica Le Chatelier-a

Zbog poteškoća pri unošenju cementnog otpada u tikvicu i većeg volumena cementnog otpada od cementa, količina materijala koja je korištena iznosila je 45 grama umjesto propisanih 65 grama prema normi za cement.





Slika 7. Očitavanje volumena na Le Chatelierovoj tikvici

Le Chatelierova tikvica se prvo napunila petrolejom do oznake 0. Nakon taloženja cementnog otpadnog mulja očitana je podatak za volumen materijala koji iznosi 18,1 cm<sup>3</sup>. Ukoliko je poznata masa cementnog morta ( $m_d$ ) i njegov volumen ( $V$ ) moguće je izračunati gustoću cementnog otpadnog mulja (cementni mulj, kratko CM) preko izraza (1).

$$\rho_{CM} = \frac{m_{d,CM}}{\Delta V} \quad (1)$$

Gdje je  $m_{d,CM}$  masa suhog uzorka CM (g)

$\Delta V$  – volumen CM (cm<sup>3</sup>)

U tablici 4 prikazan je rezultat ispitivanja gustoće cementnog otpadnog mulja koja iznosi 2,49 g/cm<sup>3</sup>.

Tablica 4. Rezultat ispitivanja gustoće cementnog otpada

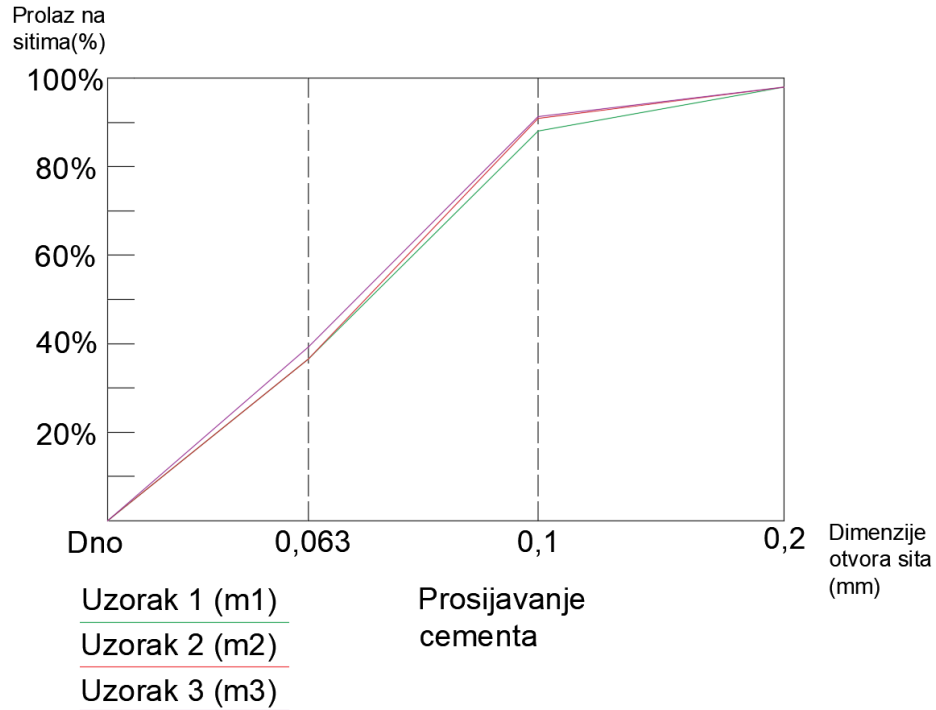
Gustoća cementnog otpadnog mulja		
Masa CM $m_{d,CM}$ [g]	Promjena V $\Delta V$ [cm <sup>3</sup> ]	Gustoća $\rho$ [g/cm <sup>3</sup> ]
65	18,1	2,49

## 2.2. Cement

Za spravljanje mješavina cementnog morta korišten je cement oznake Holcim Lumen cement, CEM II/A-LL 42,5R; portlandski cement s dodatkom vapnenca prema HRN EN 197-1. Proizvođač cementa Holcim ima svoju tvornicu smještenu u Koromačnu, Hrvatska. Po opisu proizvoda, Holcim Lumen cement se sastoji od 80-94% portlandskog cementnog klinkera, od 6-20% prirodnog vapnenca (LL) i do 5% filtarske prašine, a kao regulator vezivanja koristi se dihidrat industrijskog gipsa. Namijenjen je u razne svrhe, a posebno prilagođen za predgotovljene betonske elemente, dekorativne proizvode i prednapete betonske konstrukcije. Posebno je istaknut dodatak visokokvalitetnog vapnenca koji poboljšava nepropusnost vode, zadržava i općenito smanjuje zahtjev za vodom. Od važnih značajki treba istaknuti ubrzan razvoj čvrstoće i povećan razvoj topline hidratacije, te svjetla i ujednačena boja. Uvjeti norme tlačne čvrstoće nakon 2 dana su  $\geq 20$  MPa i nakon 28 dana  $\geq 42,5 \leq 62,5$ . Holcim Lumen cement ispunjava kriterije norme, sa vrijednostima od 29,3 MPa za tlačnu čvrstoću nakon 2 dana i 52,5 MPa nakon 28 dana. Ostali fizikalna i kemijska svojstva opisana su u tablici 5 [5].

Tablica 5. Tipična fizikalna i kemijska svojstva i usporedba s normom HRN EN 197-1 [5]

Fizikalna svojstva	JM	Holcim Lumen® cement CEM II/A-LL 42,5 R	Uvjet norme
Postojanost volumena (Le Chatelier)	mm	0,4	$\leq 10$
Početak vezivanja	min	197	$\geq 60$
Tlačna čvrstoća na 2 dana	MPa	29,3	$\geq 20$
Tlačna čvrstoća na 28 dana	MPa	52,5	$\geq 42,5 \leq 62,5$
Specifična težina cementa	g/cm <sup>3</sup>	3,08	-
<b>Kemijska svojstva</b>			
SO <sub>3</sub>	%	2,73	$\leq 4,0$
Cl	%	0,043	$\leq 0,10$



Slika 8. Prikaz granulometrijske krivulje za prosijana 3 uzorka cementa

Tablica 6. Prikaz određivanja granulometrijskog sastava cementa za uzorak br. 1

Ispitivanje 1.	Masa 25 g	Materijal Cement	
Otvor sita Di [mm]	Ostatak na situ Ri [g]	Ostatak na situ [% ukupne mase] $100 \cdot Ri / m1$	Kumulativni postotak prolaza [% ukupne mase] $100 - \sum(100 \cdot Ri / m1)$
0,2	0,17	0,68	98,64
0,1	2,71	10,84	87,8
0,063	12,78	51,12	36,68
Dno	9,17	36,68	0

Tablica 7. Prikaz određivanja granulometrijskog sastava cementa za uzorak br. 2

Ispitivanje 2.	Masa 25 g	Materijal Cement	
Otvor sita Di [mm]	Ostatak na situ Ri [g]	Ostatak na situ [% ukupne mase] $100 \cdot Ri/m1$	Kumulativni postotak prolaza [% ukupne mase] $100 - \sum(100 \cdot Ri/m1)$
0,2	0,05	0,2	98,08
0,1	1,76	7,04	91,04
0,063	13,66	54,64	36,4
Dno	9,1	36,4	0

Tablica 8. Prikaz određivanja granulometrijskog sastava cementa za uzorak br. 3

Ispitivanje 3.	Masa 25 g	Materijal Cement	
Otvor sita Di [mm]	Ostatak na situ Ri [g]	Ostatak na situ [% ukupne mase] $100 \cdot Ri/m1$	Kumulativni postotak prolaza [% ukupne mase] $100 - \sum(100 \cdot Ri/m1)$
0,2	0,05	0,2	98,2
0,1	1,59	6,36	91,84
0,063	13,19	52,76	39,08
Dno	9,77	39,08	0

Na temelju prikazanih granulometrijskih krivulja cementa (slika 8) vidljivo je da je veličina većine čestica cementa manja od 0,1mm (oko 90%). Poznato je da veličina čestica utječe na proces brzine vezanja pa je za spravljanje cementnih mješavina s cementnim otpadom odabrana veličina čestica manja od 0,2 mm.

### 2.3. Pijesak

Pijesak frakcije 0-4 (Slika 9) se uvelike koristi u građevinskoj industriji prvenstveno za spravljanje betonskih mješavina te mješavina morta a označava pijesak čije zrnje varira u veličini od 0 do 4 mm. Kvalitetan pijesak je čist, bez nečistoća poput gline, šljunka ili organskih tvari, te ima ravnomjernu granulaciju. U svrhu izrade ovog završnog rada korišten je pijesak marke Holcim d.o.o.

Radi poštivanja omjera cementa, agregata i vode (1:3:0.5) potrebno je ispitati vlažnost ( $W$ ) (2, 3), površinsku vlažnost ( $A_w$ ) (4) i apsorpciju ( $A_s$ ) (5) korištenog pijeska te izračunat korištenjem sljedećih izraza:

$$W = A_s + A_w \quad (2)$$

$$W = \frac{100 \cdot (m_{wv} - m_z)}{m_d} \quad (3)$$

$$A_w = \frac{100 \cdot (m_z - m_d)}{m_d} \quad (4)$$

$$A_s = \frac{100 * (m_{wv} - m_z)}{m_d} \quad (5)$$

gdje ( $m_{wv}$ ) predstavlja masu vlažnog materijala, ( $m_z$ ) masu materijala s određenom količinom površinske vlažnosti te već spomenutu masu potpuno suhog materijala ( $m_d$ ). Pošto je na ambalaži Holcimovog pijeska iščitana jednaka vrijednost površinske vlažnosti i apsorpcije, nije potrebna regulacija dodane vode u mortne mješavine te se može koristiti točne količine iz navedenog omjera.



Slika 9. Pijesak frakcije od 0 do 4mm

#### 2.4. Voda

Dobre temperature za betoniranje i očvršćivanje betonskih i cementnih mješavina su između 10 i 25 °C, a za proces hidratacije idealna je 13 °C [6]. Za spravljanje cementnih mješavina koristila se voda iz slavine na sobnoj temperaturi (približno 21 °C). Količina vode za spravljanje svih mješavina cementnog morta iznosila je 225 grama (225 ml).



### 3. MJEŠAVINE CEMENTNOG MORTA

Nakon ispitanih svojstava cementnog otpada, krenulo se na spravljanje prvih mješavina cementnog morta. Prva mješavina cementnog morta spravljen je sukladno normi HRN EN 196-1 [7]. Jedino odstupanje od zahtjeva norme jest što se nije koristio CEN standardni pijesak već drobljeni pijesak proizvođača Holcim (Hrvatska) d.o.o. Poštivajući zadani omjer od 1:3:0.5 za cement, pijesak i vodu, napravljena je prva mješavina, nazvana referentna mješavina, koja u sastavu ne sadrži cementni otpadni mulj. Dakle, referentna mješavina cementnog morta, skraćeno REF, se spravljala od  $450 \pm 1$  grama cementa (Slika 10),  $1350 \pm 2$  grama pijeska granulacije 0 do 4 mm te  $225 \pm 1$  grama vode (Tablica 9). Za potrebe istraživanja i usporedbu čvrstoća napravljene su još 3 dodatne mješavine koje sadrže cementni otpadni mulj. Kod izrade tih mješavina jedina razlika je bila u zamjeni dijela cementa sa cementnim otpadnim muljem.



Slika 10. Izvagana količina cementa za spravljanje referente mješavine

Tablica 9. Količina materijala za spravljanje referentne mješavine

Referentna mješavina REF	Cement	Pijesak	Voda
Masa sastojaka za spravljanje jedne mješavine [g]	450	1350	225

Cementni otpadni mulj se dodavao u postocima, i to u udjelu od 5%, 10% i 15% ukupne mase cementa potrebnog za spravljanje mješavine. Npr. Za mješavinu sa 5% cementnog otpada, nazvana CM5%, umjesto 450 grama cementa dodano je 427,5 g cementa te 22,5 g cementnog otpadnog

mulja. U nastavku dan primjer izračuna mase cementa i mase cementnog otpada za smjesu CM5%: Taj postupak se ponavlja za uzorak s 10% cementnog otpada i za 15% otpada. Primjer izračuna mase cementa i mase cementnog otpada za smjesu CM5%:

$$m_{cem} = 450 \text{ g} - 450 \text{ g} * 5\%$$

$$m_{cem} = 450 \text{ g} - 450 \text{ g} * 0,05 = 450 \text{ g} - 22,5 \text{ g} = 427,5 \text{ g}$$

$$m_{CM5\%} = 450 \text{ g} * 5\%$$

$$m_{CM5\%} = 450 \text{ g} * 0,05 = 22,5 \text{ g}$$

$$m_{uk} = m_{cem} + m_{CM5\%}$$

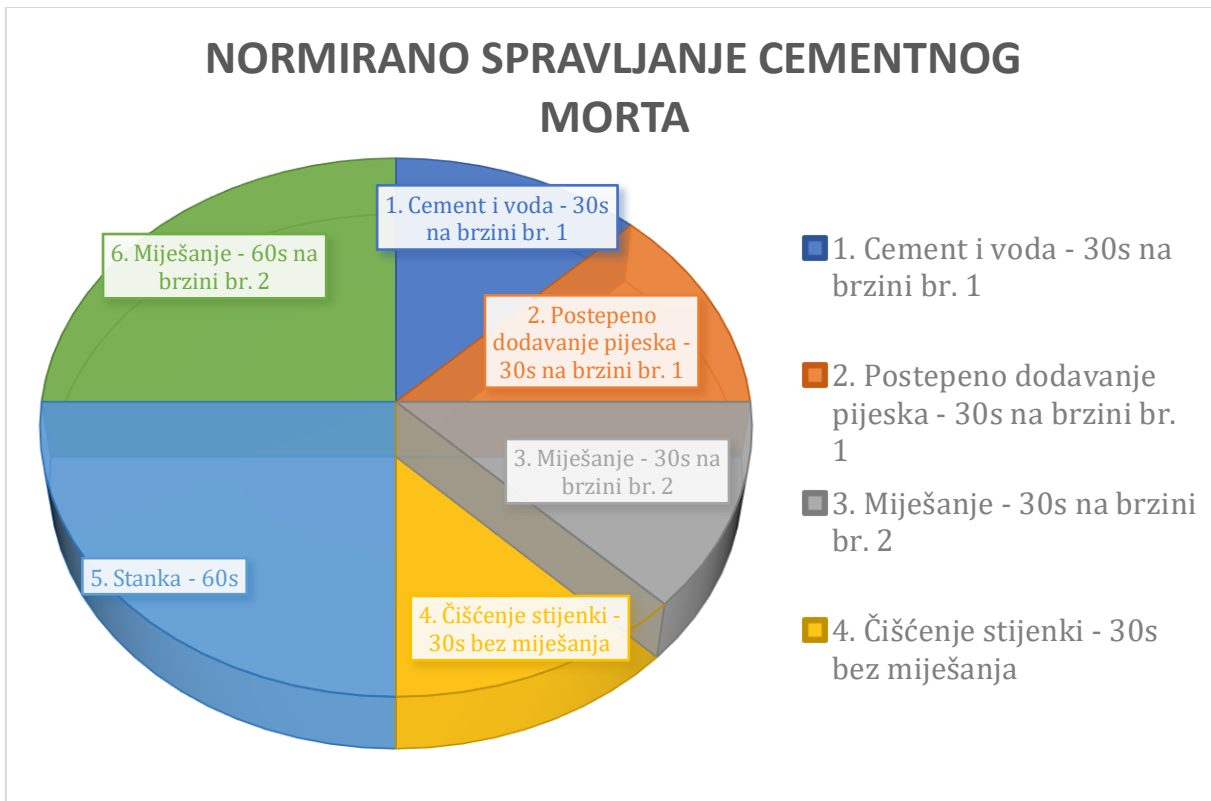
$$m_{uk} = 427,5 \text{ g} + 22,5 \text{ g} = 450 \text{ g}$$

Prije miješanja svih sastojaka cementni otpad i cement su ručno promiješani u posudici. Time se dobila ravnomjerna smjesa cementa i cementnog otpada koja se kasnije miješa sa ostalim sastojcima sukladno standardnoj proceduri danoj u normi HRN EN 196-1 [7].

Sam postupak miješanje morta se odvijalo u stolnoj miješalici (Slika 11). Miješalica se sastoji od tijela uređaja, žlice za miješanje i posude. Sveukupno postoje 2 brzine miješanja, prva brzina i druga brzina. Točan postupak miješanja opisan je u normi HRN EN 196-1. Spravljanje mješavine započinje se dodavanjem 450 grama cementa i 225 mililitara vode u posudu te pokretanjem miješalice na brzinu jedan. Nakon 30 sekundi započinje postepeno dodavanje pijeska u smjesu. Ukupno 1350 grama pijeska se koristi za spravljanje jedne mješavine cementnog morta. Neposredno nakon dodavanja pijeska miješalica se pokreće na brzinu broj dva na novih 30 sekundi. Primjećuje se da se smjesa počinje lijepiti za stjenke posude. Kako bi se riješio taj problem, preporučuje se zaustaviti uređaj na 90 sekundi, gdje se prvih 30 sekundi utroši na čišćenje morta sa stjenka posude. Nakon uklanjanja, može se nastaviti s miješanjem na brzini broj dva posljednjih 60 sekundi normiranog procesa (Slika 12).

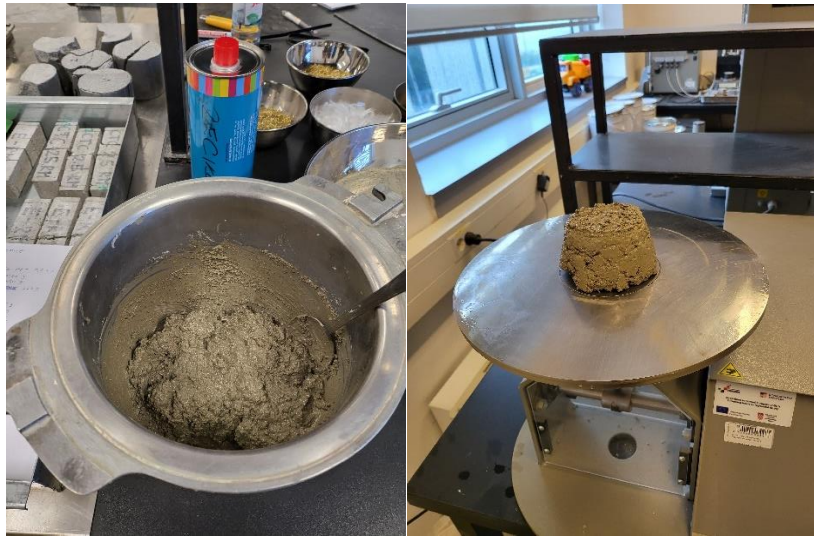


Slika 11. Stolna miješalica za spravljanje morta



Slika 12. Normirano spravljanje cementnog morta

Nakon spravljanja svježih mješavina ispitivana je obradivost standardnom metodom na potresnom stoliću sukladno normi HRN EN 1015-3 [3] (Slika 13). Prije provođenja samog postupka ispitivanja obradivosti, četvrtanjem se odvoji dio smjese koji se koristio za ispitivanje konzistencije mjerenjem rasprostiranja. Pripremljenom smjesom kalup (Slika 14) se puni u 2 sloja, gdje se svaki sloj nabija s 10 laganih udaraca kako bi se osiguralo ravnomjerno punjenje kalupa. Prilikom zadnjeg punjenja se kalup prepuni, sabije, poravna i višak se uklanja. Nakon toga kalup se podiže i potresni stolić automatski sabija uzorak s 15 udaraca. Nakon 15 udaraca cementna smjesa se rasprostrela po glatkoj površini stolića i time završavam sam postupak ispitivanja. Zatim se na uzorku mjeri rasprostiranje na pozicijama dva okomita promjera (Slika 15) a kao rezultat se prikazuje srednja vrijednost dva izmjerena promjera [3].



Slika 13. Uzorak na potresnom stoliću



Slika 14. Prikaz kalupa korištenog za ispitivanje





Slika 15. Promjer rasprostiranja svježeg morta (REF mješavina)

Svaka svježa mješavina se nakon postupka miješanja ugrađivala u standardne kalupe za određivanje čvrstoće morta, prizmica dimenzija 40 mm x 40 mm x 160 mm. Radi lakšeg raskalupljivanja uzoraka iz kalupa, kalup se premazao sredstvom naziva Oplatol. Oplatol je mineralno ulje koje se koristi za odvajanje betona od kalupa i oplata u građevinskoj industriji [8]. Prilikom ugradnje morta u kalupe obavezno se kalup napunjen svježom mješavinom morta vibrira na stol za vibriranje.

Nakon ugradnje u kalupe, sve cementne mješavine su prekrivene staklom i označene (prikazano na slici 16). Sveukupno je izrađeno 8 cementnih mješavina, po dvije od svake vrste mješavine radi ispitivanja čvrstoće uzoraka pri starosti od 3 i 28 dana od trenutka ugradnje u kalupe. Prva tri dana uzorci svih mješavina njegovani su na zraku na  $20 \pm 2$  °C, uključujući i one uzorke za ispitivanje na vlačnu i tlačnu čvrstoću pri starosti od 28. dan nakon spravljanja. Dakle, uzorci koji su ispitani pri starosti od 3 dana nisu njegovani u vodi. Uzorci koji su ispitani nakon 28 dana su 25 dana njegovani u vodi.

### 3.1. Referentna mješavina, REF

Referentna mješavina služila je kao mjerodavna mješavina u pogledu čvrstoće, izgleda, boje i obradivosti za ostale eksperimentalne mješavine sa dodatkom cementnog otpadnog mulja. Promjer rasprostiranja referentne mješavine, oznake REF, iznosio je 165 mm (Slika 15). Ustanovljeno je da je moguće ugraditi izmiješanu referentnu smjesu u kalupe i započeta je ugradnja morta u kalupe za prizme (Slika 16).





Slika 16. Ugrađivanje smjese referentne mješavine u kalupe

### 3.2. Mješavina CM5%

Mješavina s 5% cementnog otpada, skraćeno CM5%, je mješavina gdje je 5% mase cementa zamijenjeno sa cementnim otpadom. Masa cementa je iznosila 427,5 grama, cementnog otpada 22,5 grama, pijeska 1350 grama i vode 225 grama (kompletan izračun se nalazi u poglavlju 3). Sve mase sastojaka su ostale jednake, samo količina cementa se smanjuje s povećanjem udjela cementnog otpadnog mulja. Prilikom spravljanja ustanovljeno je da je smjesa sa 5% cementnog otpada minimalno kruće konzistencije nego referentna. To proizlazi iz gustoća cementa i cementnog otpada. Gustoća cementa je poznata i iznosi  $2,9 \text{ g/cm}^3$  dok je gustoća cementnog otpada nešto manja, ona iznosi  $2,49 \text{ g/cm}^3$ . Dok masa ostaje ista (450 grama), volumen raste jer se dio cementa zamijenio cementnim otpadom.

Rezultati rasprostiranja za mješavinu s 5% cementnog otpada razlikuju se od referentne mješavine. Minimalno kruća konzistencija dovela je do manjeg rasprostiranja po stolicu i iznosila je 140 mm (Slika 17).



Slika 17. Rasprostiranje cementne mješavine CM5%

Ugradnja je tekla kao kod referentne mješavine. Manja obradivost nije stvarala probleme prilikom ugradnje cementne mješavine u kalupe.

### 3.3. Mješavina CM10%

Mješavina s 10% cementnog otpada, skraćeno CM10%, je mješavina gdje je 10% mase cementa zamijenjeno sa cementnim otpadom. Masa cementa je iznosila 405 grama, cementnog otpada 45 grama, pijeska 1350 grama i vode 225 grama. Količina pijeska i vode je jednaka kao kod prijašnjih smjesa. Sada se upotrijebila dvostruko veća količina cementnog otpada pa se očekuje i manja obradivost nego kod referentne mješavine i mješavine s 5% cementnog otpada. Ispitivanje konzistencije metodom rasprostiranja je to i dokazao, rezultat promjera rasprostiranja iznosio je 125 mm. Uzorak je nakon 15 udaraca na potresnom stoliću ostao sličniji prvobitnom obliku (Slika 18) korištenog kalupa (stožca).



Slika 18. Rasprostiranje cementne mješavine CM10%

Smjesa sa 10% cementnog otpada se jednako lako ugrađivala u kalupe kao i referentna mješavina i mješavina sa 5% cementnog otpada. Dobrim vibriranjem se odstranilo većina sitnih šupljina koje nastanu između gušće smjese i kalupa.

### 3.4. Mješavina CM15%

Mješavina s 15% cementnog otpada, skraćeno CM15%, je mješavina gdje je 15% mase cementa zamijenjeno sa cementnim otpadom. Masa cementa je iznosila 382,5 grama, cementnog otpada 67,5 grama, pijeska 1350 grama i vode 225 grama. Količina pijeska i vode je ostala jednaka kao kod svih smjesa. Smjesa cementnog morta sa 15% udjela cementnog otpadnog mulja znatno se razlikovala već vizualnim izgledom od ostalih mješavina. Također, obradivost te mješavine je bila smanjena. Kako bi se potvrdilo da se u postupku spravljanja mješavine nije dogodila greška izrađena je dodatno još jedna mješavina. Tako su spravljene dvije smjese cementnog morta sa 15% udjela cementnog otpadnog mulja, nazvane CM15%-? i CM15%. Druga mješavina, CM15%, cementnog morta bila je istog karakterističnog izgleda i konzistencije kao prva mješavina, CM15%-?. Ispitivanje konzistencije rasprostiranjem za obje mješavine dalo je iste rezultate, vrijednost rasprostiranja iznosila je 105 mm (Slika 19).



Slika 19. Rasprostiranje cementne mješavine CM15%

Ugradnja cementnih mješavina CM15%-? i CM15% nije bila jednostavna kao u slučaju referentne mješavine, ili mješavine sa samo 5% cementnog otpada, ali ipak moguća uz dobro vibriranje na vibrirajućem stolu.

### 3.5. Usporedba rezultat ispitivanja konzistencije metodom rasprostiranja

Na slici 20 se jasno uočava razlika u obradivosti mješavina cementnog morta. Tablica 10 prikazuje izmjerene veličine promjera rasprostiranja. Prikazani rezultati ispitivanja ukazuju na trend smanjenja obradivosti povećanjem udjela cementnog otpadnog mulja u odnosu na referentnu mješavinu





Slika 20. Usporedna rezultata ispitivanja konzistencije metodom rasprostiranja svih mješavina

Tablica 10. Promjer rasprostiranja svježeg morta

Promjer rasprostiranja svježeg morta	
Uzorak:	Promjer rasprostiranja [mm]
1. REF	165
2. CM5%	140
3. CM10%	125
4. CM15%?	105
5. CM15%	105

## 4. ISPITIVANJE ČVRSTOĆA CEMENTNIH PRIZMI

Ispitivanje čvrstoće cementnog morta provedeno je na uzorcima prizmi spravljenim od četiri različite mješavine, oznake referentna mješavina REF, CM5%, CM10% i CM15% pri starosti od 3. i 28 dana.

Sva ispitivanja vezana za izradu ovog završnog rada, osim postupka sijanja, provedena su u Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci. Postupak sijanja proveden je u Laboratoriju za Geotehniku Građevinskog fakulteta u Rijeci. Očvrсле prizme ispitivale su se na hidrauličkim strojevima proizvođača Controls (Slika 21) koje se sastoje od više zasebnih manjih komora za ispitivanje. Uzorci su prvo ispitani na vlak savijanjem a potom na tlak.

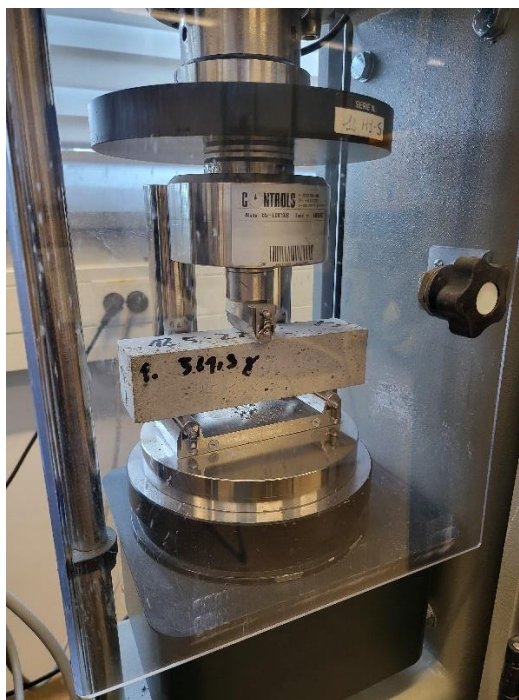


Slika 21. Uređaji za ispitivanje čvrstoće



#### 4.1. Postupak ispitivanja čvrstoće pomoću hidrauličke preše

Postupak i način ispitivanja čvrstoće sastoji se od ispitivanja vlačne čvrstoću savijanjem a potom i tlačne čvrstoće sukladno normi HRN EN 196-1 [9]. Ispitivanje na vlak provodi se nanošenjem vertikalne sile po sredini raspona ispitne prizme, a prizma se postavlja na dva oslonca koja su međusobno udaljena 100 mm. Važno je da se prizma ne postavlja u uređaj u smjeru osi lijevanja mješavine u kalup, nego okomito na smjer lijevanja. Nakon ispravnog postavljanja prizme (Slika 22) slijedi unošenje potrebnih parametara na računalo. Brzina porasta opterećenja sukladno normi iznosi  $50 \pm 10$  N/s. Rezultat dobivenog opterećenja može varirati za  $\pm 1\%$ . Preostali bitni parametri prije samog postupka ispitivanja su srednja vrijednost dimenzija prizme i masa.

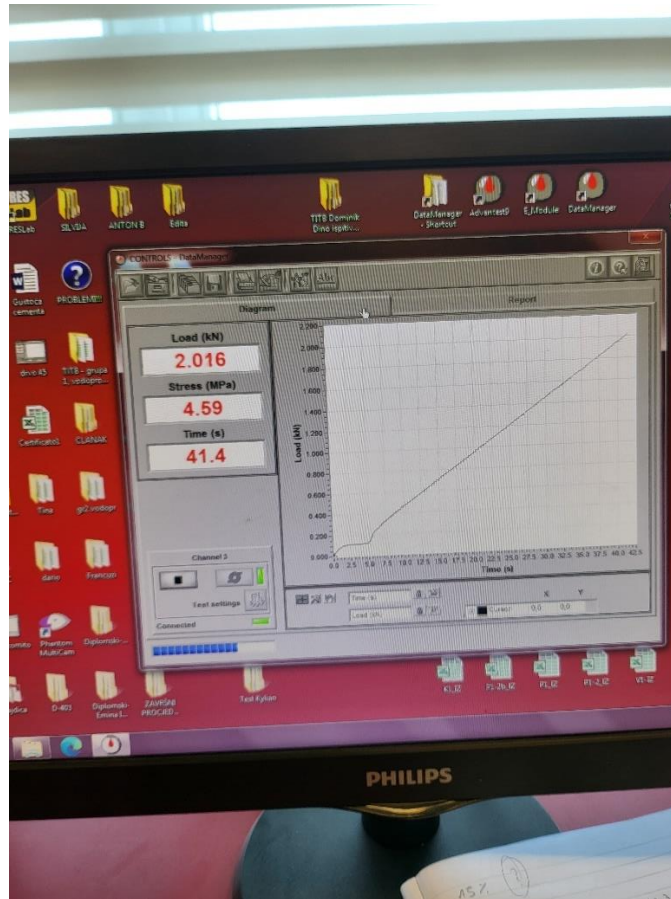


Slika 22. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem

Sila (F) koja djeluje na sredini raspona uzorka, označava maksimalno opterećenje koje uzorak može podnijeti prije sloma. Pomoću izraza 12 izračunava se čvrstoća na savijanje ( $\sigma_s$ ):

$$\sigma_s = \frac{1,5 * l * F}{h^2 * b} \quad (12)$$

Oznake u izrazu (12) h, b označavaju dimenzije uzorka (u mm) a oznaka l razmak između oslonaca u komori za ispitivanje (l=100 mm). Sila sloma se mjeri u N, pa je rezultat ispitivanja, čvrstoća na savijanje, izražen u N/mm<sup>2</sup> odnosno MPa (Slika 23).



Slika 23. Tipični primjer rezultata ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem

Ispitivanje na tlak se provodi dva puta za svaku prizmu jer se prilikom ispitivanja savijanjem prizma lomi otprilike na polovini uzorka, što rezultira nastankom dva ispitna uzorka. Kao i kod ispitivanja na vlak, točnost ispitivanja je  $\pm 1\%$  od vršnog opterećenja. Kao što je poznato za krte materijale, cementne prizme imaju mnogo veću otpornost za tlak, stoga se postiže puno veća tlačna čvrstoća. Radi toga brzina opterećenje kod ispitivanja na tlak je veća nego u slučaju ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem, i iznosi  $2400 \pm 200$  N/s. Dimenzije prizma se ne upisuju u program na računalo prilikom ispitivanja na tlak, nego se uzima u obzir površina kvadratne plohe pomoću koje se nanosi opterećenje na polovicu ispitnog uzorka prizme. Ona iznosi 40 mm x 40 mm, što čini površinu od 1600 mm<sup>2</sup>. Pomoću izraza (13) izračunava se čvrstoća na tlak.

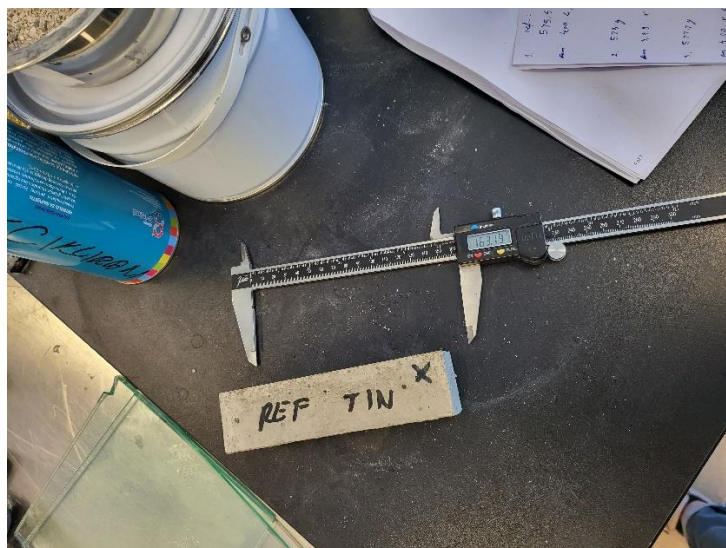
$$\sigma_T = \frac{F_T}{A}$$

$$\sigma_T = \frac{F_T}{1600} \quad (13)$$

Dakle, opterećena površina ispitnog uzorka je uvijek jednaka, samo se sila koja opterećuje uzorak ( $F_T$ ) mijenja s obzirom na trenutak kada nastaje lom u ispitanom uzorku.

#### 4.2. Čvrstoća referente mješavine REF

Prije ispitivanja čvrstoće cementnih prizmi potrebno je bilo izmjeriti dimenzije uzoraka prizmi i izvagati ih. Mjerenje dimenzija uzoraka prizmi se vršilo pomoću pomične mjerke (Slika 24). na više pozicija a kao konačna dimenzija uzima se prosječna vrijednost od izmjerenih. Tablice broj 11 i 12 pokazuju sve dimenzije, mase i gustoće prizmi prije ispitivanja.



Slika 24. Pomična mjerka

Tablica 11. Dimenzije i mase uzoraka starosti od 3 dana

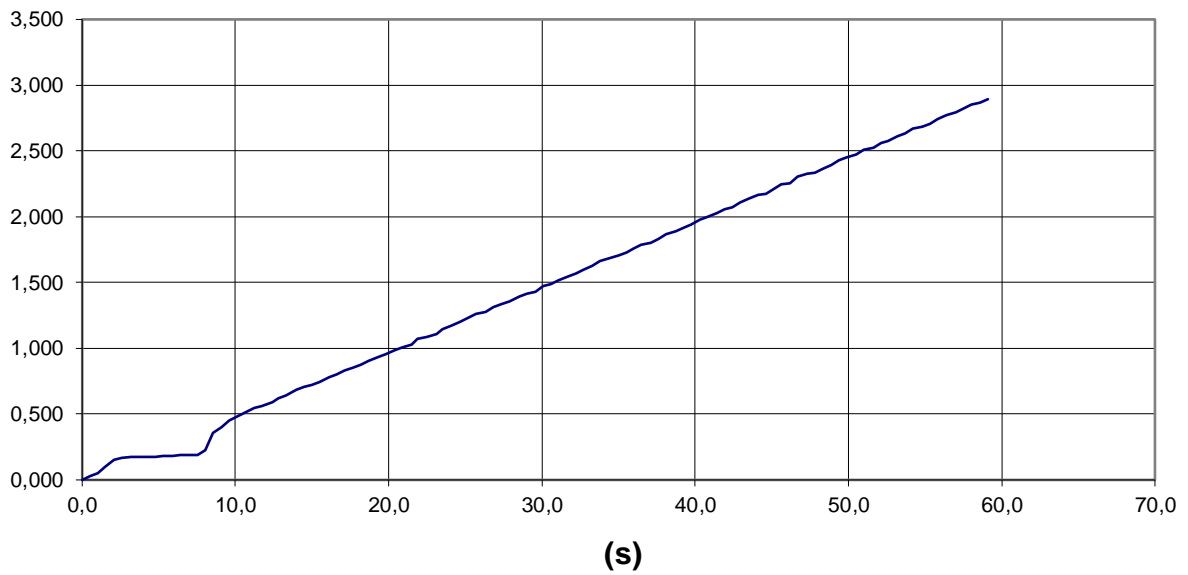
Ispitivanje nakon 3 dana					
Uzorak:	Fizikalni parametri očvrsllog morta				
	dimenzija [mm]	masa [g]	gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	srednja vrijednost gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]	standardna devijacija gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]
1. REF - 1	40,0 * 40,4 * 160,0	575,4	2,23	2,227	0,006
2. REF - 2	39,9 * 40,2 * 160,1	573,0	2,23		
3. REF - 3	40,0 * 40,7 * 160,0	577,7	2,22		

Tablica 12. Dimenzije i mase uzoraka starosti od 28 dana

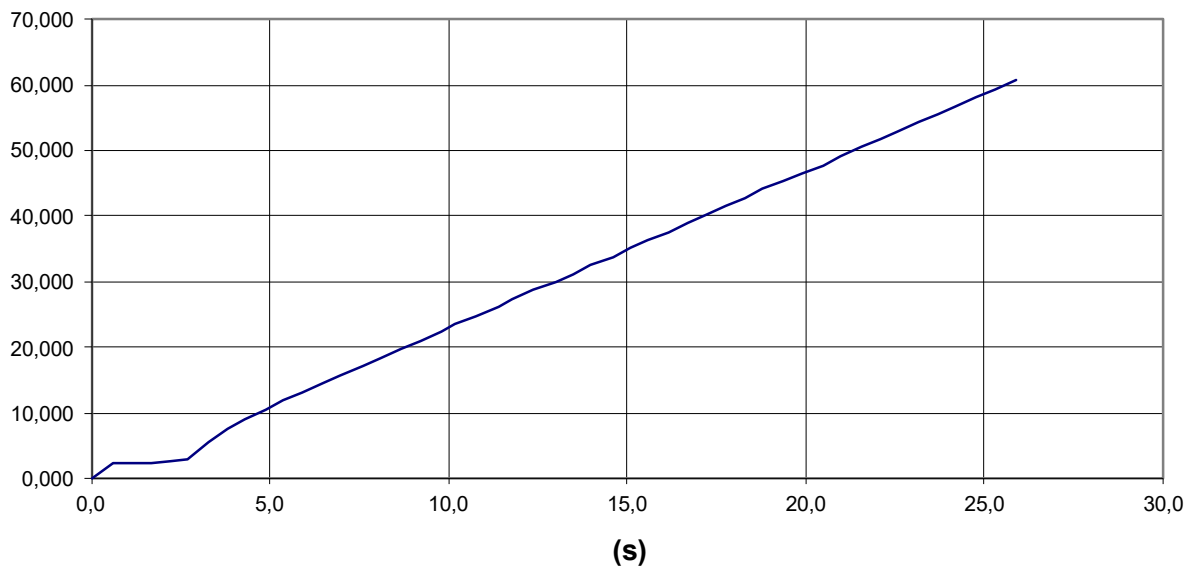
Ispitivanje nakon 28 dana					
Uzorak:	Fizikalni parametri očvrstlog morta				
	dimenzija [mm]	masa [g]	gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	srednja vrijednost gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]	standardna devijacija gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]
1. REF - 1 28D	40,0 * 40,6 * 160,0	585,4	2,25	2,237	0,021
2. REF - 2 28D	40,0 * 41,0 * 160,0	586,8	2,24		
3. REF - 3 28D	40,0 * 41,9 * 160,0	595,7	2,22		

Prvo je na sve 3 prizme referentne mješavine ispitana vlačna čvrstoću savijanjem. Rezultat ispitivanja je graf s maksimalnom silom u vremenu (Slika 23). Lomljenjem prizmi ispitivanjem na savijanje dobiva se 6 novih uzoraka približne veličine od 80 mm (prvobitnih 160 mm prelomljeno na pola) koji se zatim ispituju na tlak, svaka polovica jednom. Rezultat ispitivanja je opet graf s maksimalnom silom u vremenu (Slika 24). Geometrijski parametri koji su uneseni u program na računalu za slomljene polovice prizme su površina poprečnog presjeka opterećene površine 40 mm x 40 mm, te pola iznosa originalne mase prizmi prije ispitivanja čvrstoće savijanjem. Uzorci za ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem nazvani su po originalnom imenu uzorka, konkretno za referentnu mješavinu: REF – 1, REF – 2 i REF – 3. Uzorci za ispitivanja tlačne čvrstoće označeni su kao Tref 1 – 1, Tref 1 – 2, Tref 2 – 1, Tref 2 – 2, Tref 3 – 1 te Tref 3 – 2.

U tablicama broj 13 i 14 su prikazani rezultati ispitivanja čvrstoće cementnih prizmi referentne mješavine pri starosti od 3 dana.



Slika 25. Tipični primjer grafa sila tokom vremenu za uzorak REF – 1 nakon ispitivanja vlačne čvrstoće



Slika 26. Tipični primjer grafa sila tokom vremenu za uzorak Tref 1 – 1 nakon ispitivanja tlačne čvrstoće

Tablica 13. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem mješavine REF pri starosti od 3 i 28 dana

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem mješavine REF pri starosti od 3 i 28 dana				
Uzorak:	Sila sloma [kN]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Srednja vrijednost za ispitani set prizmi [MPa]	Standardna devijacija ispitnog seta prizmi [MPa]
REF - 1	2,912	6,69	5,83	0,76
REF - 2	2,568	5,97		
REF - 3	2,139	4,84		
REF - 1 28D	4,170	9,36	8,56	0,6
REF - 2 28D	3,673	8,40		
REF - 3 28D	3,536	7,91		

Tablica 14. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine REF pri starosti od 3 dana

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine REF pri starosti od 3 dana				
Uzorak:	Sila sloma [kN]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Srednja vrijednost za ispitani set prizmi [MPa]	Standardna devijacija ispitnog seta prizmi [MPa]
Tref 1 - 1	60,83	38,02	36,16	1,05
Tref 1 - 2	57,77	36,10		
Tref 2 - 1	55,60	34,75		
Tref 2 - 2	56,38	35,23		
Tref 3 - 1	58,77	36,73		
Tref 3 - 2	57,82	36,14		

Uzorci za ispitivanje pri starosti od 28 dana naznačeni su sa 28D u nazivu originalnog imena uzorka . U tablici 13 i 14 prikazani su rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem cementnih prizmi oznake REF - 1 28D, REF - 2 28D i REF - 3 28D, te rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće na polovicama prizmi oznake Tref 1 - 1 28D, Tref 1 - 2 28D, Tref 2 - 1 28D, Tref 2 - 2 28D, Tref 3 - 1 28D i Tref 3 - 2 28D.



Tablica 15. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine REF pri starosti od 28 dana

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine REF pri starosti od 28 dana				
Uzorak:	Sila sloma [kN]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Srednja vrijednost za ispitani set prizmi [MPa]	Standardna devijacija ispitnog seta prizmi [MPa]
Tref 1 - 1 28D	85,64	53,53	55,61	1,9
Tref 1 - 2 28D	88,22	55,14		
Tref 2 - 1 28D	87,21	54,51		
Tref 2 - 2 28D	89,83	56,14		
Tref 3 - 1 28D	87,81	54,88		
Tref 3 - 2 28D	95,17	59,48		

Rezultati ispitivanja uzorka nakon 28 dana su očekivano veći od rezultata provedenih na uzorcima starim 3 dana. Porast tlačne čvrstoće iznosi 47%, a tlačne 54%. Na temelju rezultata tlačne čvrstoće vidimo, da referentna mješavina zadovoljava zahtjeve norme HRN EN 197-1 za cement razreda čvrstoće 42,5.

#### 4.3. Čvrstoća mješavine CM5%

Tablice 16 i 17 prikazuju usporedbu fizikalnih parametara referentne mješavine sa mješavinom CM5% za prizme ispitane nakon 3 dana i 28 dana starosti.

*Tablica 16. Dimenzije i mase uzoraka nakon 3 dana njegovanja*

Ispitivanje nakon 3 dana					
Uzorak:	Fizikalni parametri očvrslog morta				
	dimenzija [mm]	masa [g]	gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	srednja vrijednost gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]	standardna devijacija gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]
1. REF - 1	40,0 * 40,4 * 160,0	575,4	2,23	2,227	0,006
2. REF - 2	39,9 * 40,2 * 160,1	573,0	2,23		
3. REF - 3	40,0 * 40,7 * 160,0	577,7	2,22		
4. CM5% - 1	40,0 * 39,9 * 160,2	567,0	2,22	2,237	0,021
5. CM5% - 2	40,0 * 40,3 * 160,0	574,5	2,23		
6. CM5% - 3	40,0 * 40,0 * 160,2	579,5	2,26		

Tablica 17. Dimenzije i mase uzoraka nakon 28 dana njegovanja

Ispitivanje nakon 28 dana					
Uzorak:	Fizikalni parametri očvrsllog morta				
	dimenzija [mm]	masa [g]	gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	srednja vrijednost gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]	standardna devijacija gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]
1. REF - 1 28D	40,0 * 40,6 * 160,0	585,4	2,25	2,237	0,015
2. REF - 2 28D	40,0 * 41,0 * 160,0	586,8	2,24		
3. REF - 3 28D	40,0 * 41,9 * 160,0	595,7	2,22		
4. CM5% - 1 28D	40,0 * 40,0 * 160,2	559,9	2,18	2,193	0,023
5. CM5% - 2 28D	40,0 * 40,2 * 160,0	562,0	2,18		
6. CM5% - 3 28D	39,4 * 40,0 * 160,0	560,0	2,22		

U tablicama 18 i 19 se mogu pronaći vrijednosti ispitane vlačne i tlačne čvrstoće prizmi za 3 i 28 dana njegovanja. Ispitivanja su izvršena na isti način kao i za referentne mješavine te su ispitani uzorci nazvani i označeni po jednakom principu. Rezultati ispitivanja čvrstoće mješavine sa 5% cementnog otpada nisu se znatno razlikovala od referentne mješavine. Prije početka ispitivanja očekivalo se smanjenje čvrstoće na tlak i vlak porastom udjela cementnog otpadnog mulja, to jest smanjenjem količine cementa u mortu. Usporedba rezultata ispitivanja čvrstoće na vlak mješavine CM5% na uzorcima starosti 3 dana pokazali su porast vlačne čvrstoće u usporedbi s referentnom mješavinom, mješavinom s najvišom količinom cementa, što nije bilo u skladu s očekivanim . Srednja vrijednost vlačne čvrstoće izmjerena je 6,86 MPa, što prikazuje porast vlačne čvrstoće od 18% u usporedbi sa referentnim prizmama ispitanim u jednako vrijeme. Tlačna čvrstoća je očekivano niža od uzoraka referentne mješavine. Na temelju rezultata tlačne čvrstoće vidimo, da CM5% mješavina zadovoljava zahtjeve norme HRN EN 197-1 za cement razreda čvrstoće 42,5.

Tablica 18. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem mješavine CM 5% pri starosti od 3 i 28 dana

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem mješavine CM 5% pri starosti od 3 i 28 dana				
Uzorak:	Sila sloma [kN]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Srednja vrijednost za ispitani set prizmi [MPa]	Standardna devijacija ispitnog seta prizmi [MPa]
1. CM5% - 1	3,055	7,20	6,86	0,43
2. CM5% - 2	2,958	7,12		
3. CM5% - 3	2,710	6,26		
4. CM5% - 1 28D	2,544	5,96	5,83	0,2
5. CM5% - 2 28D	2,583	5,99		
6. CM5% - 3 28D	2,331	5,55		

Tablica 19. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine CM 5% pri starosti od 3 i 28 dana

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine CM 5% pri starosti od 3 i 28 dana				
Uzorak:	Sila sloma [kN]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Srednja vrijednost za ispitani set prizmi [MPa]	Standardna devijacija ispitnog seta prizmi [MPa]
T5%CM 1 - 1	49,84	31,15	31,83	2,13
T5%CM 1 - 2	52,58	32,86		
T5%CM 2 - 1	51,62	32,26		
T5%CM 2 - 2	51,85	32,41		
T5%CM 3 - 1	46,14	28,84		
T5%CM 3 - 2	53,52	33,45		
T5%CM 1 - 1 28D	74,70	46,69	46,81	1,02
T5%CM 1 - 2 28D	72,40	45,25		
T5%CM 2 - 1 28D	74,99	46,87		
T5%CM 2 - 2 28D	75,45	47,16		
T5%CM 3 - 1 28D	73,95	46,22		
T5%CM 3 - 2 28D	77,83	48,64		

#### 4.4. Čvrstoća mješavine CM10%

Usporedivši mješavinu CM10% sa prije ispitanim mješavinama, referentnom i CM5%, bilježimo trend smanjenja tlačne čvrstoće. Vlačna čvrstoća je očekivano niža od referentne mješavine na ispitanim uzorcima poslije 3 i 28 dana. Kod mješavine CM10% nije bio zastupljen slučaj porasta vlačne čvrstoće nakon 3 dana od spravljanja nego nakon 28 dana od spravljanja mješavina, kao što je to bio slučaj kod mješavine CM5%. Usporedivši mješavine CM5% i CM10%, ispitivanje tlačne čvrstoće nakon 3 dana zabilježilo je pad od 15%, dok mjerenja nakon 28 dana su se razlikovala za 13%.

Tablice 20 i 21 prikazuju usporedbu fizikalnih parametara referentne mješavine, mješavine CM5% i mješavine CM10% za prizme ispitanane nakon 3 dana i 28 dana.

Tablica 20. Dimenzije i mase uzoraka različitih mješavina nakon 3 dana njegovanja

Ispitivanje nakon 3 dana					
Uzorak:	Fizikalni parametri očvrsllog morta				
	dimenzija [mm]	masa [g]	gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	srednja vrijednost gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]	standardna devijacija gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]
1. REF - 1	40,0 * 40,4 * 160,0	575,4	2,23	2,227	0,006
2. REF - 2	39,9 * 40,2 * 160,1	573,0	2,23		
3. REF - 3	40,0 * 40,7 * 160,0	577,7	2,22		
4. CM5% - 1	40,0 * 39,9 * 160,2	567,0	2,22	2,237	0,021
5. CM5% - 2	40,0 * 40,3 * 160,0	574,5	2,23		
6. CM5% - 3	40,0 * 40,0 * 160,2	579,5	2,26		
7. CM10% - 1	39,8*40,3*160,0	561,3	2,19	2,177	0,023
8. CM10% - 2	39,8*39*8*160,2	554,5	2,19		
9. CM10% - 3	39,9*39*5*160,3	542,2	2,15		

Tablica 21. Dimenzije i mase uzoraka različitih mješavina nakon 28 dana njegovanja

Ispitivanje nakon 28 dana					
Uzorak:	Fizikalni parametri očvrsllog morta				
	dimenzija [mm]	masa [g]	gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	srednja vrijednost gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]	standardna devijacija gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]
1. REF - 1 28D	40,0 * 40,6 * 160,0	585,4	2,25	2,237	0,015
2. REF - 2 28D	40,0 * 41,0 * 160,0	586,8	2,24		
3. REF - 3 28D	40,0 * 41,9 * 160,0	595,7	2,22		
4. CM5% - 1 28D	40,0 * 40,0 * 160,2	559,9	2,18	2,193	0,023
5. CM5% - 2 28D	40,0 * 40,2 * 160,0	562,0	2,18		
6. CM5% - 3 28D	39,4 * 40,0 * 160,0	560,0	2,22		
7. CM10% - 1 28D	40,2 * 40,0 * 160,0	572,0	2,22	2,21	0,046
8. CM10% - 2 28D	40,0 * 40,0 * 160,0	575,5	2,25		
9. CM10% - 3 28D	40,0 * 41,5 * 160,3	574,2	2,16		

Mjerenjem fizikalnih svojstva mješavine cementnog morta CM10% jasno se uočava trend smanjenja gustoća uzoraka povećanjem udjela cementnog otpada. Tu se ističe jedino mješavina CM5% ispitana nakon 28 dana. Pretpostavlja se povećani udio pora u uzorcima pa su mase svih prizmi manje, s time slijedi i manja gustoća.

U tablicama 22 i 23 dana je usporedba rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće i vlačne čvrstoće savijanjem pri starosti od 3 i 28 dana.



Tablica 22. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem mješavine CM 10% pri starosti od 3 i 28 dana

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem mješavine CM 10% pri starosti od 3 i 28 dana				
Uzorak:	Sila sloma [kN]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Srednja vrijednost za ispitani set prizmi [MPa]	Standardna devijacija ispitnog seta prizmi [MPa]
1. CM10% - 1	1,959	4,55	4,79	0,4
2. CM10% - 2	2,247	5,35		
3. CM10% - 3	1,857	4,47		
4. CM10% - 1 28D	2,840	6,62	6,95	0,51
5. CM10% - 2 28D	2,805	6,57		
6. CM10% - 3 28D	3,397	7,67		

Tablica 23. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine CM 10% pri starosti od 3 i 28 dana

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine CM 10% pri starosti od 3 i 28 dana				
Uzorak:	Sila sloma [kN]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Srednja vrijednost za ispitani set prizmi [MPa]	Standardna devijacija ispitnog seta prizmi [MPa]
T10%CM 1 - 1	47,92	29,95	27,74	2,44
T10%CM 1 - 2	48,27	30,17		
T10%CM 2 - 1	44,12	27,57		
T10%CM 2 - 2	41,83	26,15		
T10%CM 3 - 1	41,48	25,93		
T10%CM 3 - 2	42,63	26,64		
T10%CM 1 - 1 28D	67,16	41,97	41,42	1,85
T10%CM 1 - 2 28D	65,60	41,00		
T10%CM 2 - 1 28D	67,53	42,21		
T10%CM 2 - 2 28D	67,58	42,24		
T10%CM 3 - 1 28D	61,62	38,51		
T10%CM 3 - 2 28D	68,14	42,59		

Prilikom ispitivanja uzoraka cementne mješavine CM10% ponovno se uočava pad tlačne čvrstoće i pad tlačne čvrstoće, za slučajeve ispitane nakon 3 dana i nakon 28 dana. Ako se promatra tlačna čvrstoća CM10% u usporedbi sa CM5% i referentnom mješavinom bilježi se pad od 15%, odnosno 30% naspram referentne mješavine za uzorke ispitane nakon 3 dana. Rezultati ispitivanja prizmi CM10% ispitanih nakon 28 dana njegovanja ukazuju na pad čvrstoće od 13% u usporedbi sa CM5% - 28D, te 34% za referentnu mješavinu. Na temelju rezultata tlačne čvrstoće vidimo da CM10% mješavina ne zadovoljava zahtjeve norme HRN EN 197-1 za cement razreda čvrstoće 42,5.

#### 4.5. Čvrstoća mješavine CM15%? i CM15%

Za mješavinu cementnog morta sa 15% cementnog otpadana spravljeno je ukupno 3 seta cementnih prizmi, gdje su uzorci jednog seta ispitivani nakon 3 dana, a uzorci preostala dva seta mješavina, nazvani CM15%? i CM15%, su ispitivani pri starosti od 28 dana. Razlog spravljanja dodatne mješavine jest što je mješavina CM15%? pokazala lošu obradivost. Međutim, nova mješavina, nazvana CM15%, nije pokazivala poboljšane obradivosti što je potvrđeno i ispitivanjem konzistencije mjerenjem rasprostiranja. U tablicama 24 i 25 se mogu pronaći fizikalni parametri očvrstlog morta nakon 3 i 28 dana njegovanja u usporedbi sa rezultatima mjerenja ostalih mješavina.

Tablica 24. Dimenzije i mase uzoraka različitih mješavina nakon 3 dana njegovanja

Ispitivanje nakon 3 dana					
Uzorak:	Fizikalni parametri očvrsllog morta				
	dimenzija [mm]	masa [g]	gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	srednja vrijednost gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]	standardna devijacija gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]
1. REF - 1	40,0 * 40,4 * 160,0	575,4	2,23	2,227	0,006
2. REF - 2	39,9 * 40,2 * 160,1	573,0	2,23		
3. REF - 3	40,0 * 40,7 * 160,0	577,7	2,22		
4. CM5% - 1	40,0 * 39,9 * 160,2	567,0	2,22	2,237	0,021
5. CM5% - 2	40,0 * 40,3 * 160,0	574,5	2,23		
6. CM5% - 3	40,0 * 40,0 * 160,2	579,5	2,26		
7. CM10% - 1	39,8*40,3*160,0	561,3	2,19	2,177	0,023
8. CM10% - 2	39,8*39*8*160,2	554,5	2,19		
9. CM10% - 3	39,9*39*5*160,3	542,2	2,15		
10. CM15% - 1	41,2 * 39,9 * 160,0	577,0	2,19	2,16	0,036
11. CM15% - 2	40,8 * 41,8 * 160,0	578,0	2,12		
12. CM15% - 3	40,0 * 42,0 * 160,0	583,0	2,17		

Tablica 25. Dimenzije i mase uzoraka različitih mješavina nakon 28 dana njegovanja

Ispitivanje nakon 28 dana					
Uzorak:	Fizikalni parametri očvrslog morta				
	dimenzija [mm]	masa [g]	gustoća [g/cm <sup>3</sup> ]	srednja vrijednost gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]	standardna devijacija gustoće [g/cm <sup>3</sup> ]
1. REF - 1 28D	40,0 * 40,6 * 160,0	585,4	2,25	2,237	0,015
2. REF - 2 28D	40,0 * 41,0 * 160,0	586,8	2,24		
3. REF - 3 28D	40,0 * 41,9 * 160,0	595,7	2,22		
4. CM5% - 1 28D	40,0 * 40,0 * 160,2	559,9	2,18	2,193	0,023
5. CM5% - 2 28D	40,0 * 40,2 * 160,0	562,0	2,18		
6. CM5% - 3 28D	39,4 * 40,0 * 160,0	560,0	2,22		
7. CM10% - 1 28D	40,2 * 40,0 * 160,0	572,0	2,22	2,21	0,046
8. CM10% - 2 28D	40,0 * 40,0 * 160,0	575,5	2,25		
9. CM10% - 3 28D	40,0 * 41,5 * 160,3	574,2	2,16		
10. CM15% - 1 28D	40,2 * 38,8 * 160,1	529,5	2,12	2,107	0,042
11. CM15% - 2 28D	40,3 * 39,5 * 160,0	525,0	2,06		
12. CM15% - 3 28D	38,7 * 40,0 * 160,0	531,0	2,14		
13. CM15%? - 1 28D	40,2 * 40,0 * 160,0	572,0	2,22	2,210	0,046
14. CM15%? - 2 28D	40,0 * 40,0 * 160,0	575,5	2,25		
15. CM15%? - 3 28D	40,0 * 41,5 * 160,3	574,2	2,16		

Iz prethodnih tablica se može zaključiti da se porastom udjela cementnog otpada smanjuje masa i gustoća cementnog morta, što se primijeti i u smanjenoj čvrstoći prilikom ispitivanja. Jedini izuzetak je mješavina CM5%, i to samo za prizme ispitane nakon 3 dana njegovanja.

U tablicama 26 i 27 prikazana je usporedba rezultata ispitivanja vlačne i tlačne čvrstoće uzoraka CM15? ispitanih nakon 3 dana te, uzoraka CM15? – 28D i CM15% - 28D ispitanih nakon 28 dana. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće nakon 28 dana za uzorke CM15% su veći za 8% u odnosu na prvu mješavinu CM15%?. S druge strane, tlačna čvrstoća je izmjerena manja kod prizmi CM15% nego kod prvobitne mješavine, CM15%?. Na temelju rezultata tlačne čvrstoće vidimo, da CM15% mješavina ne zadovoljava zahtjeve norme HRN EN 197-1 za cement razreda čvrstoće 42,5.

*Tablica 26. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem mješavine CM15%? i CM 15% pri starosti od 3 i 28 dana*

Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem mješavine CM15%? i CM 15% pri starosti od 3 i 28 dana				
Uzorak:	Sila sloma [kN]	Vlačna čvrstoća [MPa]	Srednja vrijednost za ispitani set prizmi [MPa]	Standardna devijacija ispitnog seta prizmi [MPa]
1. CM15%? - 1	2,191	4,85	5,10	0,250
2. CM15%? - 2	2,361	5,09		
3. CM15%? - 3	2,516	5,35		
4. CM15%? - 1 28D	2,289	5,13	5,22	0,197
5. CM15%? - 2 28D	2,238	5,09		
6. CM15%? - 3 28D	2,359	5,45		
7. CM15% - 1 28D	2,246	5,57	5,64	0,390
8. CM15% - 2 28D	2,218	5,29		
9. CM15% - 3 28D	2,421	6,06		

Tablica 27. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine CM15%? i CM 15% pri starosti od 3 i 28 dana

Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće mješavine CM15%? i CM 15% pri starosti od 3 i 28 dana				
Uzorak:	Sila sloma [kN]	Tlačna čvrstoća [MPa]	Srednja vrijednost za ispitani set prizmi [MPa]	Standardna devijacija ispitnog seta prizmi [MPa]
T15%?CM 1 - 1	41,66	26,04	25,70	1,554
T15%?CM 1 - 2	40,19	25,12		
T15%?CM 2 - 1	38,39	24,00		
T15%?CM 2 - 2	44,33	27,71		
T15%?CM 3 - 1	43,50	27,18		
T15%?CM 3 - 2	38,60	24,12		
T15%?CM 1 - 1 28D	62,47	39,04	37,27	2,614
T15%?CM 1 - 2 28D	60,02	37,51		
T15%?CM 2 - 1 28D	57,02	35,64		
T15%?CM 2 - 2 28D	52,68	32,93		
T15%?CM 3 - 1 28D	64,27	40,17		
T15%?CM 3 - 2 28D	61,27	38,30		
T15%CM 1 - 1 28D	52,72	32,95	32,92	2,825
T15%CM 1 - 2 28D	53,08	33,17		
T15%CM 2 - 1 28D	49,72	31,07		
T15%CM 2 - 2 28D	55,43	34,64		
T15%CM 3 - 1 28D	45,99	28,74		
T15%CM 3 - 2 28D	59,07	36,92		

#### 4.6. Usporedba rezultata ispitivanja čvrstoće

U tablici 28 i na Slikama 27 i 28 dana je usporedba rezultata ispitivanja čvrstoće na vlak uzoraka ispitanih pri starosti od 3 i 28 dana. Isto tako, u tablicama 29 i na Slikama 29 i 30 dana je usporedba rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka ispitanih pri starosti od 3 i 28 dana.

Dobiveni rezultati odgovaraju očekivanjima, dolazi do smanjenja čvrstoće prilikom smanjenja udjela cementa u cementnim mješavinama. Iznimno, rezultat ispitivanja vlačne čvrstoće mješavine CM5% ukazuje na rast vlačne čvrstoće nakon 3 dana u odnosu na REF mješavinu. Također, može se primijetiti pad vlačne čvrstoće savijanjem cementnih prizmi starih 28 dana u usporedbi s onima koje su ispitane nakon 3 dana. Međutim, usporedivši preostale rezultate vlačne i tlačne čvrstoće referentne mješavine vidljiv je trend smanjenja čvrstoće povećanjem udjela cementnog otpadnog materijala.

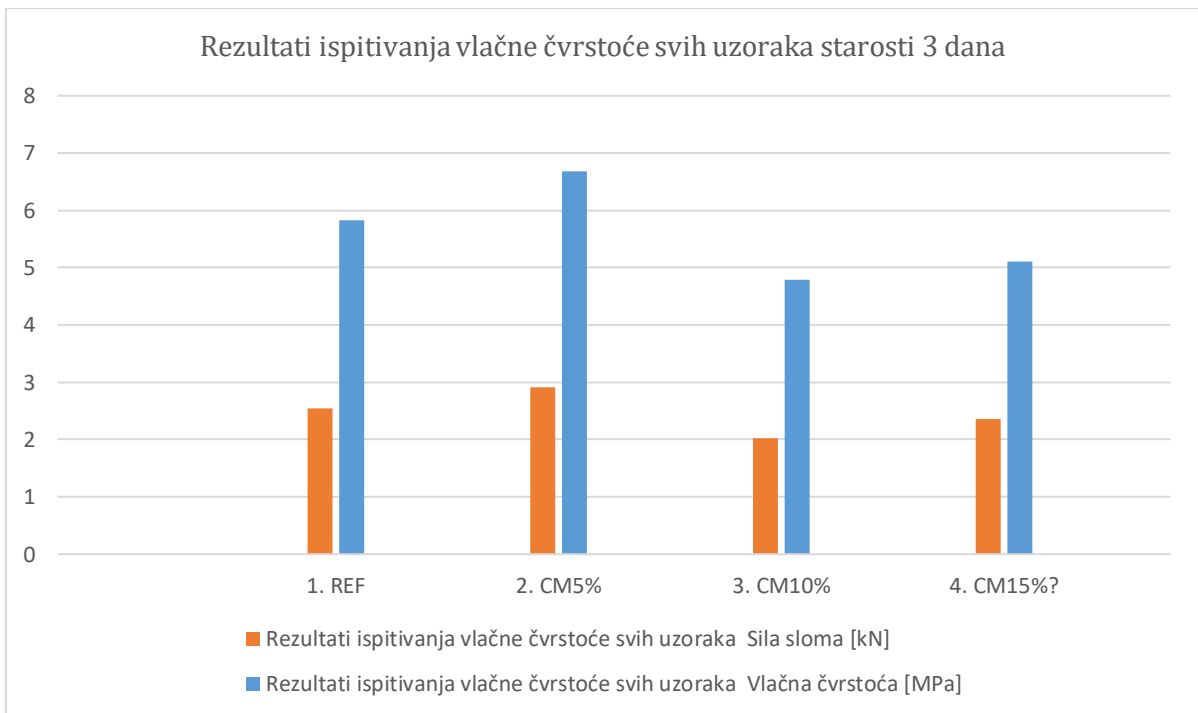


Tablica 28. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće svih uzoraka

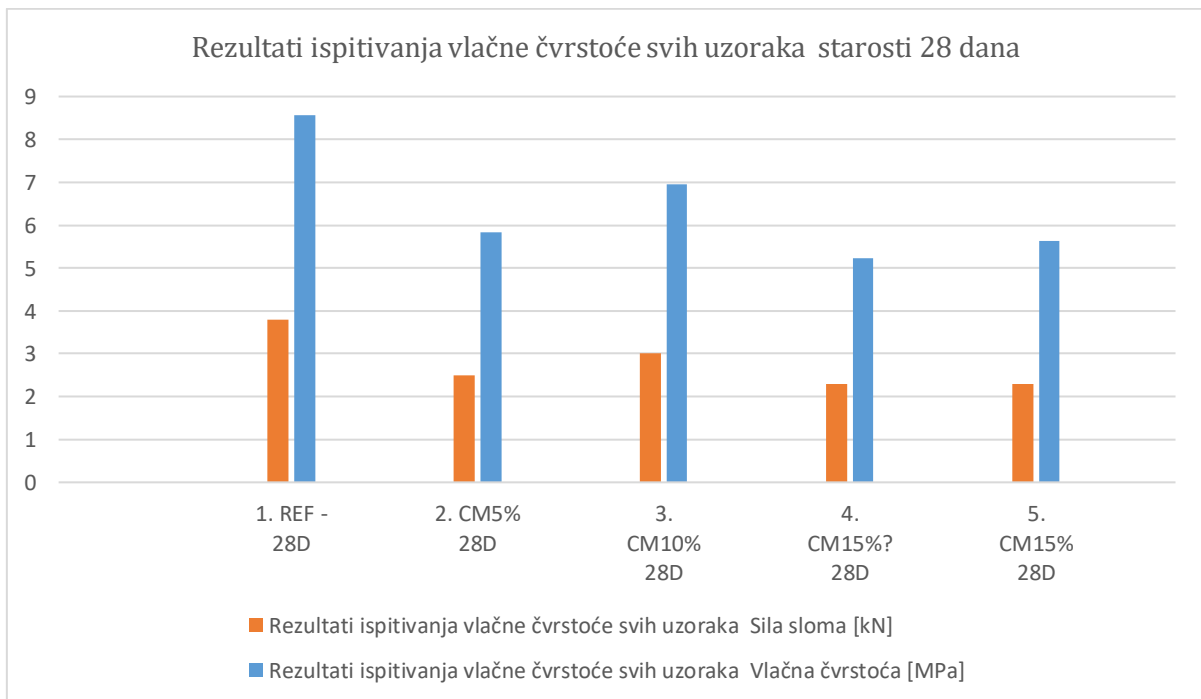
Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće svih uzoraka		
Uzorak:	Sila sloma [kN]	Vlačna čvrstoća [MPa]
1. REF	2,540	5,83
2. REF - 28D	3,793	8,56
3. CM5%	2,908	6,68
4. CM5% 28D	2,486	5,83
5. CM10%	2,021	4,79
6. CM10% 28D	3,014	6,95
7. CM15%?	2,356	5,10
8. CM15%? 28D	2,295	5,22
9. CM15% 28D	2,295	5,64

Tablica 29. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće svih uzoraka

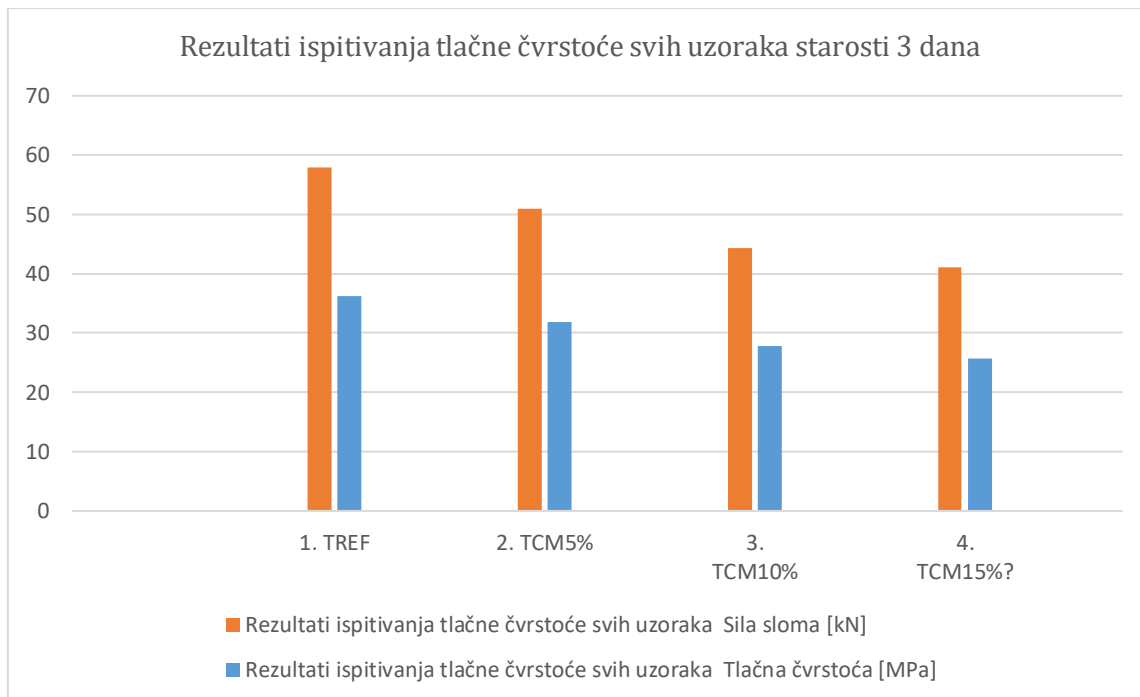
Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće svih uzoraka		
Uzorak:	Sila sloma [kN]	Tlačna čvrstoća [MPa]
1. TREF	57,862	36,16
2. TREF - 28D	88,980	55,61
3. TCM5%	50,925	31,83
4. TCM5% 28D	74,887	46,81
5. TCM10%	44,375	27,74
6. TCM10% 28D	66,272	41,42
7. TCM15%?	41,112	25,70
8. TCM15%? 28D	59,622	37,27
9. TCM15% 28D	52,668	32,92



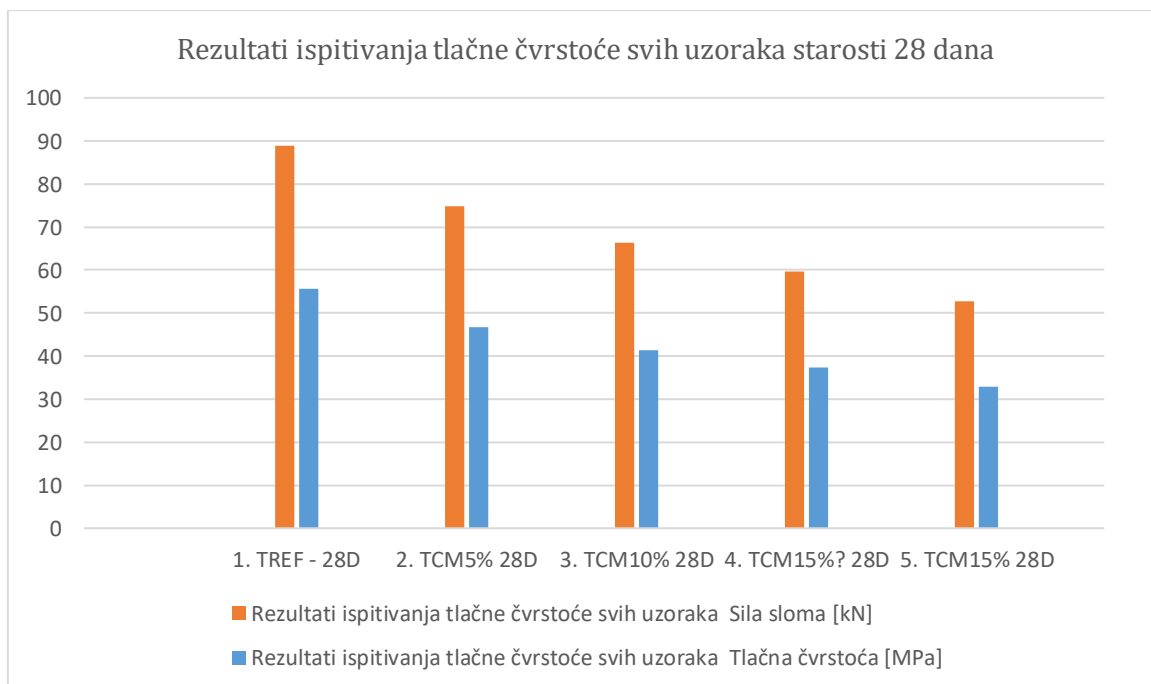
Slika 27. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće svih uzoraka starosti 3 dana



Slika 28. Rezultati ispitivanja vlačne čvrstoće svih uzoraka starosti 28 dana



Slika 29. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće svih uzoraka starosti 3 dana



Slika 30. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće svih uzoraka starosti 28 dana

## 5. USPOREDBA REZULTATA I ZAKLJUČAK

Tema ovog završnog rada bila je istražiti mogućnost primjene cementnog otpadnog mulja kao zamjenskog materijala za udio cementa. Zamjena cementa s cementnim otpadnim muljem, dobivenim kao nusprodukt tijekom proizvodnje cementa ili betona, znatno bi pridonijela ekološki održivoj gradnji koja je sada aktualna tema u svijetu. Najveći doprinos upotrebi cementnog otpadnog mulja bio bi u smanjenju proizvodnje cementa i nezbrinutog otpada.

Sve mješavine su se spravljale s jednakom količinom vode i pijeska kao agregata, dok se udio cementa mijenjao s cementnim otpadnim muljem u količinama od 5%, 10% te 15% ukupne mase cementa (450g). Za sve spravljene mješavine ispitana je konzistencija rasprostiranjem na potresnom stoliću a zatim čvrstoća na tlak i vlak. Dobiveni rezultati ispitivanja mješavina s različitim udjelom cementnog otpada uspoređeni su s rezultatima dobivenim na referentnoj mješavini.

Gustoća cementnog otpada izmjerena je u iznosu od  $2,49 \text{ g/cm}^3$  dok je gustoća cementa  $2,9 \text{ g/cm}^3$  pa sukladno tome s porastom udjela cementnog otpada dolazi do smanjenja mase i gustoće cementnog morta. Ustanovljen je gubitak obradivosti cementne mješavine s povećanjem udjela cementnog otpada. Izmjereni promjer rasprostiranja na potresnom stoliću je manji za 25 mm u slučaju uzorka CM5% (140 mm), 40 mm u slučaju uzorka CM10% (125 mm) te po 60 mm u slučajevima za uzorke CM15% i CM15% (105 mm) u usporedbi s referentnom mješavinom (165 mm). Ispitivanjem spravljanih mješavina cementnog morta primijećen je trend smanjenja tlačne i vlačne čvrstoće povećanjem udjela cementnog otpadnog mulja. Rezultati ispitivanja ukazuju na preveliko smanjenje čvrstoće i obradivosti morta u slučaju povećanja udjela cementnog otpadnog mulja u iznosu od 10% mase cementa i više.

Očekivano, kada su uzorci ispitani nakon 3 dana od trenutka spravljanja, primijećeno je da imaju manju čvrstoću na tlak i vlak u usporedbi s uzorcima koji su bili odležani 28 dana. Ovaj rezultat ukazuje na činjenicu da materijal stječe na čvrstoći kako su stariji Uzorci koji su stariji postižu veću čvrstoću, što sugerira da se unutar tog vremenskog razdoblja odvijaju procesi stvrdnjavanja i stvaranja jačih veza unutar materijala. Razmatranjem navedenih rezultata može se uočiti trend povećanja čvrstoće u ovisnosti s vremenom. Zanimljivo je napomenuti da je u samo jednom specifičnom slučaju zabilježeno da je uzorak ispitivan nakon 3 dana pokazao veću čvrstoću u usporedbi s uzorcima iste mješavine ispitane na 28 dana. Ova pojedinačna situacija ukazuje na to

da postoji složenost u dinamici stvaranja čvrstoće unutar materijala. Moguće je da su specifični čimbenici, kao što su reakcije između komponenata smjese, optimalni uvjeti za stvrdnjavanje ili drugi nepredvidivi faktori, igrali ulogu u ovom neočekivanom rezultatu. Taj podatak nam ukazuje da korištenjem materijala čija svojstva nisu kontrolirana, kao što je cementni otpadni mulj, postoji i mogućnost neočekivanih i nepredvidivih rezultata. Povećanjem količine istraživanih uzoraka pridonijeli bi potvrdi točnosti dobivenih rezultata.

Na kraju, na temelju analize rezultata ispitivanja možemo zaključiti da ovaj otpadni materijal ima potencijala za primjenu u betonskoj industriji naročito za izradu jednostavniji konstruktivnih elemenata koji ne zahtijevaju veliku obradivost i visoku čvrstoću.

## 6. LITERATURA

- [1] Martens H., Goldmann D., Recyclingtechnik Fachbuch für Lehre und Praxis, Springer Vieweg Wiesbaden, Germany, 2016.
- [2] <https://kemolab.hr/proizvod/susionici-un-uf-unplus-ufplus/>, 18.7.2023.
- [3] HRN EN 1015-3:2000, Metode ispitivanja mortova za ziđe – 3. dio: Određivanje konzistencije svježeg morta (stolićem za potresanje), Hrvatski zavod za norme, 2005.
- [4] HRN EN 933-1:2012, Ispitivanje granulometrijskih svojstava agregata – 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava – Metoda sijanja, Hrvatski zavod za norme, 2012.
- [5] Holcim Lumen cement CEM II/A-LL 42,5R, Tehnička uputa, [www.holcim.hr](http://www.holcim.hr), 20.7.2023.
- [6] Betoniranje pri visokim i niskim temperaturama, [www.gfos.unios.hr](http://www.gfos.unios.hr), 20.7.2023.
- [7] HRN EN 932-2:2003, Ispitivanje općih svojstava agregata – 2. dio: Metode smanjivanja laboratorijskih uzoraka, Hrvatski zavod za norme, 2003.
- [8] Oplatol ulje 10l Gazprom, Tehnička informacija, [www.vidam.hr](http://www.vidam.hr), 27.7.2023.
- [9] HRN EN 196-1:2005, Metode ispitivanja cementa – 1. dio: Određivanje čvrstoća, Hrvatski zavod za norme, 2005.