

Mehanička i trajnosna svojstva morta s dodatkom PVC piljevine

Močibob, Alberto

Master's thesis / Diplomski rad

2022

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:157:255927>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-28**



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**

Alberto Močibob

Mehanička i trajnosna svojstva morta s dodatkom PVC piljevine

Diplomski rad

Rijeka, 2022.

**SVEUČILIŠTE U RIJECI
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Diplomski sveučilišni studij
Konstrukcije
Teorija i tehnologija betona**

**Alberto Močibob
JMBAG: 0114029200**

Mehanička i trajnosna svojstva morta s dodatkom PVC piljevine

Diplomski rad

Rijeka, rujan 2022.

IZJAVA

Završni/Diplomski rad izradio/izradila sam samostalno, u suradnji s mentorom/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.

Alberto Močibob

U Rijeci, 19. rujna 2022.

ZAHVALA

Posebno se zahvaljujem mentorici doc. dr. sc. Natalija Bede Odorčić na brojnim stručnim savjetima, pomoći, strpljenju i uloženom vremenu pri izradi ovog diplomskog rada. Također zahvaljujem se laborantima na strpljivoj pomoći i savjetima pri izradi i ispitivanju morta.

Zahvalio bi se i svojoj obitelji, djevojci i prijateljima na razumijevanju, podršci i lijepim trenucima tijekom studiranja.

SAŽETAK

Proizvodnja betona u posljednjih 30-tak godine je u drastičnom porastu što dovodi do prekomjerne upotrebe prirodnih sirovina. Sukladno tome raste potražnja za zamjenskim materijalom. Dok s druge strane, velike količine otpadnog materijala koji nastaje kao nusprodukt različitih grana industrije, čije je zbrinjavanje upitno, uvelike doprinosi u onečišćenju i lošoj održivosti okoliša naročito u današnje vrijeme. Uzimajući sve navedeno u obzir, osnovna ideja ovog rada je reciklaža PVC piljevine, industrijskog nusprodukta prilikom izrade PVC stolarije, u obliku sirovine za proizvodnju morta, odnosno betona. Ovim radom određuje se utjecaj PVC piljevine na osnovna svojstva svježeg i očvrsllog cementnog morta. U eksperimentalnom dijelu rada izrađene su vlastite mješavine cementnog morta pri čemu se određeni postotak volumena pijeska zamijenio s PVC piljevinom u količini od 0%, 5% i 10%. Ispitana su svojstva svježeg morta te mehanička i trajnosna svojstva očvrsllog morta. Dodavanjem aditiva uklanjaju se problemi obradivosti svježeg morta uočeni u prethodnim ispitivanjima. Rezultati ispitivanja očvrsllog morta pokazuju trend smanjenje tlačne čvrstoće i čvrstoće na savijanje povećanjem udjela PVC piljevine u odnosu na referentnu mješavinu. Međutim, ispitivanjem kapilarne vodoupojnosti i otpornosti na habanje postižu se poboljšana svojstva kod mješavina s prisustvom PVC piljevine nego kod referentne mješavine. Provedbom ispitivanja uočeno je da PVC poboljšava i duktilnost uzoraka. Zaključuje se da je mort, s određenim postotkom zamjene volumenom pijeska s PVC piljevinom uz dodatak određene količine aditiva radi postizanja zadovoljavajuće obradivosti, moguće primijeniti u praksi. U slučaju potrebe za poboljšanjem mehaničkih svojstava koja su degradirana dodavanjem PVC piljevine kao i nepropusnosti i trajnosti, preporuča se dodavanje pucolanskog materijala npr. metakaolina što je i dokazano u ovom diplomskom radu.

Ključne riječi: zamjenski materijali, industrijski nusproizvodi, PVC piljevina, metakaolin, cementni mort, , tlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje, otpornost na habanje, kapilarna vodoupojnost, analiza mikrostrukture

ABSTRACT

The production of concrete in the last thirty years show a constant increase which brings to overuse of natural resources. The demand for substitute materials is therefore increasing accordingly. On the other end, great amounts of waste material which is produced as a byproduct of different types of industries, and is by itself hard to dispose, brings greatly to the pollution and lack of sustainability of the environment at the moment. Taking everything mentioned into account, the original idea of this thesis is recycling of PVC sawdust, industrial byproduct of the production of PVC carpentry, in the form of a raw material in the production of mortar and concrete. The main focus of this thesis is to determine the influence of PVC sawdust on the basic properties of fresh and hardened cement mortar. In the experimental part of this thesis several mixtures of cement mortar were made in which different volume percentages of sand were replaced with PVC sawdust from 0%, 5% and 10% respectively. The properties of fresh mortar were tested, as well as the mechanical and durability properties of hardened mortar. The use of additives solved problem with the workability of fresh mortar that was noticed in earlier experimental investigation. The experimental results of hardened cement mortar show a decreasing trend on compressive and flexural strength with the increase of PVC sawdust in comparison to the reference mixture. However, test results from capillary water absorption and wear resistance show improved properties in the mixture with PVC sawdust compared to the reference mixture. With further testing, it was noticed that PVC improves the ductility of the samples as well. It can be concluded that mortar, with the optimal sand replacement with PVC sawdust, and the use additives for better workability, can be applied in practice. In case if it is necessary to improve the mechanical properties, which are decreased by adding PVC sawdust, as well as the impermeability and durability, it is recommended to add pozzolanic material e.g. metakaolin which has been proven in this thesis.

Key words: substitute materials, industrial byproducts, PVC sawdust, metakaolin, cement mortar, compressive strength, flexural strength, wear resistance, capillary water absorption, microstructure analysis

SADRŽAJ

1.	UVOD.....	1
2.	ZAMJENSKI MATERIJALI U BETONSKOJ INDUSTRIJI.....	3
2.1	Proizvodnja konvencionalnog betona.....	4
2.2	Metakaolin kao zamjenski materijali za udio cementa.....	6
2.3	PVC piljevina kao zamjenski materijal za udio pijesaka.....	7
2.4	Problem odlaganja plastike.....	11
3.	MATERIJALI, MJEŠAVINE I METODE ISPITIVANJA.....	14
3.1	Mješavine morta.....	15
3.2	Materijali i metode ispitivanja.....	16
3.2.1	Pijesak.....	16
3.2.2	Cement i voda.....	26
3.2.3	PVC piljevina.....	27
3.2.4	Aditivi.....	35
4.	IZRADA MJEŠAVINA MORTA.....	37
4.1	Cementna mješavina.....	40
4.2	Referentna mješavina, CM-REF.....	42
4.3	Cementna mješavina s 5% PVC piljevine.....	43
4.4	Cementna mješavina s 10% PVC piljevine.....	47
4.5	Cementna mješavina s 5% PVC piljevine i 5% metakaolina.....	51
5.	SVOJSTVA MORTA U SVJEŽEM STANJU.....	53
5.1	Konzistencija rasprostiranjem.....	57
5.2	Nasipna gustoća.....	59
5.3	Udio pora i temperatura.....	60

6.	ISPITIVANJE OČVRSLOG CEMENTNOG MORTA.....	62
6.1	Postupak ispitivanja uzoraka očvrslog morta	63
6.2	Fizikalna svojstva uzoraka očvrslog morta.....	66
6.3	Čvrstoća na savijanje na uzorcima starosti 7 dana	71
6.3	Čvrstoća na savijanje na uzorcima starosti 28 dana.....	73
6.4	Tlačna čvrstoće na uzorcima starosti 7 dana	78
6.5	Tlačna čvrstoća na uzorcima starim 28 dana	80
6.6	Otpornost na habanje	82
6.7	Kapilarna vodoupojnost.....	84
6.8	Struktura morta	88
6.8.1	Snimke pijeska i PVC piljevine.....	90
6.8.2	Snimke uzorka dobivenih ispitivanjem prizme	94
6.8.3	Snimke uzoraka dobivenih piljenjem valjka	95
7.	ZAKLJUČAK.....	97
8.	LITERATURA.....	100

POPIS TABLICA

Tablica 1. Nasipna gustoća pijeska – u rastresitom stanju	17
Tablica 2. Nasipna gustoća pijeska – u zbijenom stanju	18
Tablica 3. Izvagane mase.....	21
Tablica 4. Gustoće pijeska.....	21
Tablica 5. Fizikalna svojstva pijeska.....	22
Tablica 6. Primjer određivanja granulometrijskog satava pijeska.....	25
Tablica 7. Fizikalna i kemijska svojstva cementa [30].....	26
Tablica 8. Nasipna gustoća PVC piljevine – u rastresitom stanju.....	28
Tablica 9. Nasipna gustoća PVC piljevine – u zbijenom stanju.....	28
Tablica 10. Rezultat ispitivanja gustoće PVC piljevine	30
Tablica 11. Primjer određivanja granulometrijskog sastava PVC piljevine.....	33
Tablica 12. Opis brzina miksera za spravljanje mješavina morta	37
Tablica 13. Sastav referentne cementne mješavine CM-REF	43
Tablica 14. Rezultati ispitivanja konzistencije rasprostiranjem probne mješavine CM-PVC5	43
Tablica 15. Sastav cementne mješavine CM-PVC5.....	45
Tablica 16. Rezultati ispitivanja konzistencije rasprostiranjem probne mješavine CM-PVC10	48
Tablica 17. Sastav cementne mješavine CM-PVC10.....	49
Tablica 18. Sastav cementne mješavine CM-PVC5+M.....	51
Tablica 19. Metoda određivanja nasipne gustoće svježeg morta	54
Tablica 20. Rezultati ispitivanja konzistencije metodom rasprostiranja	57
Tablica 21. Rezultati ispitivanja svježeg morta - nasipna gustoća	60
Tablica 22. Rezultati ispitivanja svježeg morta - udio pora i temperatura	61
Tablica 23. Dimenzije, masa i gustoća uzoraka nakon 7 dana njegovanja	67
Tablica 24. Dimenzije, mase i gustoća uzoraka nakon 28 dana njegovanja	68
Tablica 25. Usporedba gustoće cementnih mješavina nakon 7 i 28 dana	68

Tablica 26. Čvrstoća na savijanje za uzorke starosti 7 dana	71
Tablica 27. Čvrstoća na savijanje uzoraka starosti 28 dana	76
Tablica 28. Tlačna čvrstoća cementnih uzorka starosti 7 dana	79
Tablica 29. Tlačna čvrstoća uzoraka starosti 28 dana	81
Tablica 30. Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje.....	83
Tablica 31. Mase uzoraka nakon pojedinih vremenskih intervala	86
Tablica 32. Rezultati ispitivanja kapilarne vodoupojnosti	87

POPIS SLIKA

Slika 1. Sydney Opera House (lijevo) u usporedbi s domovima na području Južne Afrike (desno) [3] [4].....	3
Slika 2. Hooverova brana [5].....	4
Slika 3. Proizvodnja cementa po godinama [7].....	5
Slika 4. Metakaolin [11].....	7
Slika 5. Poli (vinil-klorid) ili PVC [13].....	8
Slika 6. Primjer nakupine plastike (otpada) [16].....	9
Slika 7. Način zbrinjavanja plastike za 2019. godinu [18].....	10
Slika 8. Veliki tihooceanski otok smeća [22].....	12
Slika 9. PVC otpad iz tvornice PVC stolarije.....	13
Slika 10. Pijesak	17
Slika 11. Određivanje nasipne gustoće.....	18
Slika 12. Zasićen i površinski suh pijesak – uzorak je djelomično osipan.....	19
Slika 13. Piknometar ispunjen vodom i agregatom.....	20
Slika 14. Uređaj za prosijavanje i sita – određivanje granulometrijskog sastava.....	23
Slika 15. Sita korištena za prosijavanje	23
Slika 16. Granulometrijska krivulja pijeska	24
Slika 17. Ostaci na sitima frakcije pijeska.....	25
Slika 18. PVC piljevina	27
Slika 19. Određivanje gustoće PVC piljevine pomoću menzure	29
Slika 20. Dokaz različitih gustoća PVC piljevine unutar ispitanog uzorka.....	31
Slika 21. Prekomjerna količina materijala na jednom situ tokom postupka prosijavanja uzorka PVC piljevine	31
Slika 22. Ostaci na sitima PVC piljevine	32
Slika 23. Granulometrijska krivulja PVC piljevine.....	33
Slika 24. Usporedba granulometrijskog sastava nasumično odabranih uzoraka PVC piljevine i pijeska.....	34

Slika 25. Usporedba granulometrijske krivulje PVC piljevine s kriterijem za pijesak određenim normom.....	35
Slika 26. Postupak miješanja - CM-REF mješavine.....	38
Slika 27. Postupak miješanja - CM-PVC mješavine	39
Slika 28. Prikaz korištenih kalup i ispitnih uzoraka cementnog morta	40
Slika 29. Prikaz svih korištenih materijala za izradu ispitnih mješavina	41
Slika 30. Prva probna mješavina - ispitivanje konzistencije rasprostiranjem	44
Slika 31. Probne mješavine s prekomjernom segregacijom	45
Slika 32. Ispitivanje konzistencije metodom rasprostiranja optimalne mješavine CM-PVC5 ..	46
Slika 33. Primjer segregacije dobivene korištenjem samo superplastifikatora	47
Slika 34. Prva probna mješavina – ispitivanje konzistencije	48
Slika 35. Optimalna mješavina CM-PVC10 - ispitivanje konzistencije rasprostiranjem.....	50
Slika 36. Mješavina s dodatkom metakaolina - ispitivanje konzistencije rasprostiranjem	52
Slika 37. Uređaj za ispitivanje konzistencije rasprostiranjem.....	53
Slika 38. Ispitivanje nasipne gustoće svježeg morta	55
Slika 39. Ispitivanje udjela pora svježeg morta prije (lijevo) i nakon (desno) taloženja	56
Slika 40. Usporedba konzistencije rasprostiranjem mješavine CM-PVC5 (lijevo) i CM-PVC10 (desno)	58
Slika 41. Usporedba prosječnih rezultata ispitivanja konzistencije rasprostiranjem za pojedinu mješavinu morta	59
Slika 42. Usporedba rezultata ispitivanja nasipne gustoće pojedine mješavine morta	60
Slika 43. Usporedba rezultata ispitivanja udjela pora pojedine mješavine morta	61
Slika 44. Uređaji za ispitivanje čvrstoće na savijanje (lijevo) i tlačne čvrstoće (desno).....	62
Slika 45. Shema ispitivanja očvrslog morta savijanjem na sredini raspona uzorka [17]	63
Slika 46. Uređaj za ispitivanje otpornosti na habanje	65
Slika 47. Njegovanje uzoraka u vodi.....	66
Slika 48. Usporedba gustoća cementnih uzoraka	69
Slika 49. Presjek prizmi očvrslog morta.....	70
Slika 50. Prikaz uzoraka nakon ispitivanja tlačne čvrstoće (i čvrstoće na savijanje).....	70
Slika 51. Čvrstoća na savijanje uzoraka starosti 7 dana.....	72
Slika 52. Usporedba sloma mješavina bez (lijevo) i sa PVC piljevinom (desno).....	73

Slika 53. Kidalica s kamerama povezanim na programski paket GOM Correlate.....	74
Slika 54. Uzorak spreman za ispitivanje s kidalicom i programom GOM Correlate.....	74
Slika 55. Model u programu GOM Correlate.....	75
Slika 56. Pomaci pojedinih točaka u vremenu	75
Slika 57. Usporedba čvrstoće na savijanje uzoraka starosti 7 i 28 dana	77
Slika 58. Usporedba rezultata čvrstoće na savijanje uzoraka starosti 28 dana.....	78
Slika 59. Uzorak nakon tlačnog ispitivanja	78
Slika 60. Tlačna čvrstoće uzoraka starosti 7 dana	80
Slika 61. Usporedba tlačne čvrstoće uzoraka starosti 7 i 28 dana.....	82
Slika 62. Kocka izložena ispitivanju otpornosti na habanje.....	83
Slika 63. Otpornost na habanje uzoraka starosti 28 dana	84
Slika 64. Ispitivanje kapilarne vodoupojnosti na uzorcima kocke	85
Slika 65. Usporedba kapilarne vodoupojnosti cementnih uzoraka.....	87
Slika 66. Postupak snimanja uzoraka mikroskopom	88
Slika 67. Prikaz uvećanja mikroskopom – a = 10x, b = 20x, c = 30x i d = 45x.....	89
Slika 68. Pijesak uvećan 10x (lijevo) i pijesak uvećan 20x (desno)	90
Slika 69. PVC piljevina korištena za izradu cementne mješavine (uvećanje 10x).....	91
Slika 70. PVC piljevina frakcije 1-2 mm (uvećanje 20x).....	92
Slika 71. PVC piljevina frakcije 0,5-1 mm (uvećanje 20x).....	92
Slika 72. PVC piljevina frakcije 0,25-0,5 mm (uvećanje 20x).....	93
Slika 73. PVC piljevina frakcije 0,063-0,125 mm (uvećanje 30x).....	93
Slika 74. CM-PVC10 s uvećanjem 10x.....	94
Slika 75. Usporedba CM-PVC5 (lijevo) i CM-PVC5 + M (desno) s uvećanjem 20x	95
Slika 76. Usporedba PVC-REF (lijevo) i PVC-CM10 (desno) s uvećanjem 20x	96
Slika 77. Usporedba CM-PVC5 (lijevo) i CM-PVC5 + M (desno) za uvećanje 20x	96

1. UVOD

Trenutno se različite vrste otpadnog materijala i industrijskih nusprodukta kao što je agregat recikliranog betona, staklo, keramika, plastika, u kombinaciji s ili bez prirodnog materijala i uobičajenog portland cementa, koriste ne samo u tradicionalnoj gradnji već i u najmodernijoj digitalnoj gradnji poput 3D ispisa. Dokazalo se da su svojstva ovih materijala pogodna za proizvodnju novog betona ukoliko se koriste u određenom udjelu. Stoga, provedena su mnoga istraživanja s ciljem pronalaska optimalnog sadržaja ovih materijala u betonu, a da se pritom ne utječe negativno na potrebna inženjerska svojstva betona. Otpadni materijali poput plastike, koji predstavlja opasnost za zagađenje okoliša i često se sam odlaže na lokanim odlagalištima, vrlo često se koristi u betonu različite primjene. Globalno gledano, upotreba plastike doživjela je vrtoglavi porast od 1920. godine kada je po prvi puta razvijena za industrijsku upotrebu. Mnoge prednosti plastike uzrokovale su njezin porast proizvodnje. U usporedbi s drugim materijalima poput stakla i metala, plastika ima znatno nižu cijenu, veći omjer čvrstoće i težine, otpornija je na habanje, ima nisku gustoću te je jednostavnija za rad i oblikovanje. Međutim, plastični otpad općenito je prijetnja globalnom okolišu. Trend proizvodnja plastike u raznim oblicima je trenutno u porastu pa recikliranje može biti rješenje za prijetnju plastičnog otpada prema okolišu [1].

Primjerice, zbrinjavanje PVC piljevine koja nastaje proizvodnjom PVC stolarije nije prikladno odrađeno u Republici Hrvatskoj [2]. Ukoliko nastojimo zadovoljiti težnju da se smanjuje količina industrijskog otpada koja je svakim danom sve veća, odnosno u ovom slučaju PVC otpada, s masovnim povećanjem potrošnje betona, dolazimo do ideje da se proizvede beton, odnosno mort s djelomičnom zamjenom pijeska s PVC-om otpadom. Osim ekoloških prednosti, takav mort ima i ekonomsku prednost jer jedini trošak PVC otpada -PVC piljevine je zapravo prijevoz do mjesta proizvodnje betonskih proizvoda.

Osnovni cilj ovog rada jest istražiti mogućnost zamjene optimalnog udjela prirodne frakcije pijeska industrijskim nusproizvodom odnosno tzv. PVC piljevinom - otpadnim materijalom koji se dobiva prilikom izrade PVC stolarije. Osim toga što je upotrebom zamjenskog materijala smanjena potrošnja prirodnih resursa zapravo se pozitivno utječe na smanjenje otpada jednog od najštetnijih materijala današnjice.

Eksperimentalni dio rada obuhvaća postizanje optimalne cementne mješavine te ispitivanje svojstava u svježem i očvrslom stanju. Ukupno su izrađene četiri cemente mješavine, od čega su tri mješavine sa zamjenom od 0%, 5% i 10% volumena pijeska s PVC piljevinom te dodatno mješavina sa zamjenom 5% volumena pijeska s PVC piljevinom i 5% mase cementa metakaolinom. Prethodnim istraživanjima utvrđen je problem gubitka obradivosti mješavina s dodatkom PVC piljevine. Stoga, sve cementne mješavine s određenim udjelom PVC otpada kao zamjena za udio pijeska izrađene su uz dodatak aditiva kako bi obradivost bila zadovoljena. Svi rezultati ispitivanja mješavina uspoređeni su s referentnom mješavinom, odnosno mješavinom s 0% PVC piljevine, na temelju čega je donesen zaključak o mogućnosti primjene takve mješavine u inženjerskoj praksi.

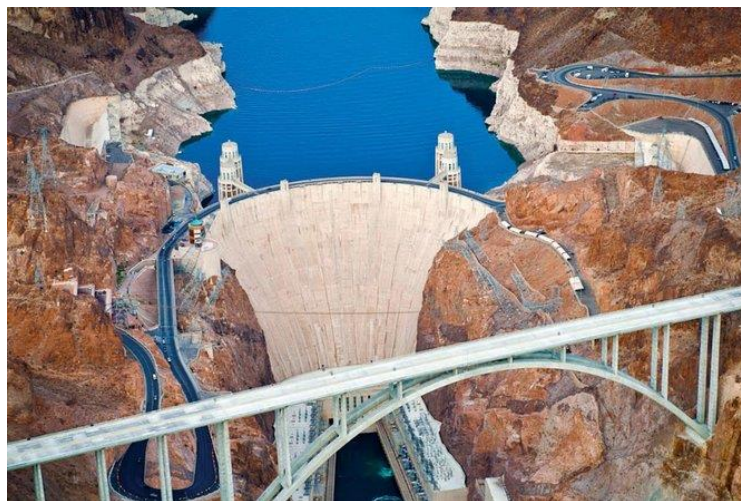
2. ZAMJENSKI MATERIJALI U BETONSKOJ INDUSTRIJI

Tijekom proteklih stotinjak godina beton preuzima odgovornost za unaprjeđenje građevinske industrije i infrastrukture koje se svakodnevno koriste a da im se pritom ne pridodaje prevelika važnost. Diljem svijeta betonske su konstrukcije ključne za osiguravanje smještaja sve većem broju stanovnika. Osim toga, omogućuje, uvelike povećanu, potrebu za prijevoz kopnom, morem, ali i zrakom te omogućuju i proizvodnju prijeko potrebne energije kao i industriju. Beton je jedan od najkorištenijih materijala u svijetu, izuzevši vodu, koji oblikuje moderni svijet. Razlog tome je što beton odlikuje snaga, izdržljivost, izuzetna dugotrajnost, mogućnost izrade betonskih elemenata različitih oblika, sigurnost i vrlo velika pristupačnost potrebnih materijala za njegovu proizvodnju u svim dijelovima svijeta. Uz sve nabrojano, osnovna prednost betona kao materijala koja je vrlo značajna u današnjem svijetu je ekonomičnost, naročito u odnosu na ostale građevinske materijale. Usporedimo li svjetski poznatu Sydney Opera House (Slika 1), kao primjer onoga što se može postići s betonom u smislu dizajna i projektiranja, te s druge strane male građevine u neformalnim naseljima diljem Južne Afrike kojima se pomaže stanovništvu osiguravajući im trajno, sigurno i jeftino stanovanje, najjednostavniji je pokazatelj znatnog korištenja betona u građevinarstvu različite namjene.



Slika 1. Sydney Opera House (lijevo) u usporedbi s domovima na području Južne Afrike (desno) [3]
[4]

Nadalje, koristi se i kao zaštita naselja nizvodno od velikih rijeka, ali i za proizvodnju prirodne energije te osiguravanje skladištenja vode u obliku različitih brana. Primjer jedne zadivljujuće brane izgrađene između 1930. i 1936. godine, koja je još uvijek u funkciji i koja pravi primjer izdržljivosti betona, jest Hooverova brana na rijeci Colorado u SAD-u prikazanoj na Slici 2 [3]. Visina brane je 221,4 m što ju čini najvišom lučnom branom u SAD - u, a duljina 379 metara dok je širina krune brane 14 metara, odnosno nevjerojatnih 200 metara na dnu. Prilikom građenja iskorišteno je 3 360 000 metara kubnih betona [4].

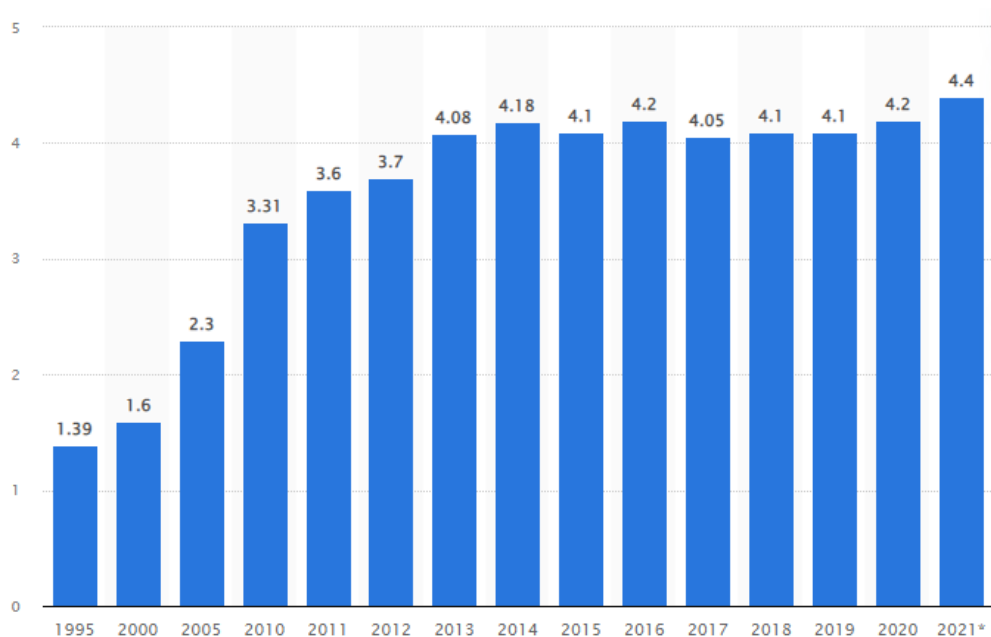


Slika 2. Hooverova brana [5]

2.1 Proizvodnja konvencionalnog betona

Proizvodnja morta i betona jest rekordna u današnje vrijeme te se predviđa da će se u skoroj budućnosti proizvodnja još značajnije povećavati. Samim time potrošnja i upotreba prirodnih sirovina je izrazito porasla što se očitava kao negativan utjecaj na okoliš u obliku gubitka prirodnih resursa, ali i zagađenja okoliša emisijom CO₂ prilikom proizvodnje sirovina i betona [6]. Volumenska količina proizvedenog betona, 2020. godine, iznosila je 14,0 bilijuna metara kubnih od čega je 40% iskorišteno za gradnju stambenih građevina. Nadalje, 2020. godine proizvedeno je 4,2 bilijuna tona cementa te tržišna vrijednost betona i cementa iznosi 4,4 bilijuna dolara, odnosno otprilike 27 bilijuna kuna prema tadašnjim valutama [3]. Usporedimo li to s 2010. godinom proizvodnja cementa povećala se za otprilike 27%, odnosno s 3,3 na 4,2 bilijuna

tona. Proporcionalno tomu proizvedeno je 11 bilijuna metara kubnih betona. Ukoliko navedeno usporedimo s 2000. godinom postoji značajna razlika prilikom proizvodnje cementa što može biti zabrinjavajuće. Količina proizvedenog cementa te godine iznosila je 1,6 bilijuna tona što ukazuje na to da je proizvodnja cementa u samo 20 godina povećana za više od 160%. Na Slici 3. prikazan je porast proizvodnje cementa kroz godine u razdoblju od 1995. do 2021. godine. Najveći porast proizvodnje cementa vidljiv je u razdoblju od 2005. do 2010. godine [7]. Dakle, s približno 5,3 bilijuna metara kubnih betona proizvedenih 2000. godine proizvodnja se povećala na skoro 14,7 u 2021. godini.



Slika 3. Proizvodnja cementa po godinama [7]

Na temelju navedenog može se zaključiti da se proizvodnja betona u samo zadnjih 10 godina znatno povećala te samim time i sastojka betona, a kao posljedica toga i eksploatacija prirodnih sirovina. Prema tome, nužno je pronaći zamjenske materijale, da li umjetne materijale ili pak materijale koji su nusproizvod raznih grana industrije, kako bi se smanjilo štetno djelovanje na prirodu.

2.2 Metakaolin kao zamjenski materijali za udio cementa

Najveći postotak pojedinačnog sastojka betona jest frakcija od 0 do 4 mm, poznatija pod nazivom pijesak. Postotak pijeska koji se nalazi u sastavu standardnog betona je u rasponu od 25 do 30%. Ostali sastojci betona jesu zrak od 2 do 5%, cement od 8 do 16%, krupni agregat od 40 do 45% i voda od 17 do 20%. Postotak krupnog agregata u sastavu betona je veći od postotka pijeska ali treba uzet u obzir da se krupni agregat sastoji od više frakcija (najčešće tri) za razliku od pijeska. Stoga, jedan od najkorištenijih agregata za izradu betona, a naročito i morta jest pijesak [8].

Nadalje, proizvodnjom betona otpušta se približno 8% od ukupne emisije CO₂ u atmosferu od čega prednjači proizvodnja cementa. Zapravo, prema istraživanjima, cementa industrija smatra se jednom od najvećih zagađivača okoline [6]. Stoga se nastoji smanjiti potrošnja odnosno proizvodnja cementa na način da se zamjenjuje prirodnim materijalima koji nisu štetni u tolikoj mjeri. Naravno, uzimajući u obzir da svojstva betona ostaju ista ili čak i bolja upotrebom zamjenskih materijala za cement. Primjer jedne takve vrste materijala jest metakaolin. Metakaolin je dehidroksilirani oblik minerala gline kaolinita, Slika 4. Uobičajeno se koristi za proizvodnju keramike, ali i u novije vrijeme kao zamjena udjela cementa u betonu. Karakterističan je po manjoj veličini čestica od čestica cementa, nešto manjoj gustoći u iznosu od 2,68 g/cm³ u usporedbi s cementom te bržoj hidrataciji i smanjenog koeficijenta difuzije u usporedbi s običnim portland cementom. Metakaolin se obično zamjenjuje s obzirom na određeni postotak mase korištenog cementa u betonskoj mješavini. Točan postotak zamjene nije definiran iz razloga što materijal kao sastojak betona još nije u potpunosti istražen. Najčešće se preporuča zamjena cementa s metakaolinom u iznosu od 5% do 20%, međutim istraženi su i betoni s zamjenom metakaolina s cementom i do 30% [9]. Kada se koristi u rasponima od 5 do 10% zamjene s masom cementa, proizvedeni beton je kohezivniji što olakšava različite procese pumpanja betona te lakšu završnu obradu. Veća količina metakaolina, do 20%, proizvodi cementnu masu koja ima vrlo nisku poroznost i propusnost. Dodatak metakaolina pozitivno utječe na brojna trajnosna svojstva očvrstlog morta i betona, kao što su u bolja otpornost na prodor klorida, sulfata ili ostalih agresivnih tvari, poboljšana otpornost na smrzavanje i odmrzavanje i otpornost na abraziju [10].



Slika 4. Metakaolin [11]

Dodatno, utjecaj metakaolina na mehanička svojstva betona je također povoljan. Utječe na povećanje čvrstoća na savijanje i tlak. Nadalje, pogodan je za korištenje kod različitih vrsta betona kao što su beton visokih čvrstoća, lagani beton, predgotovljeni i lijevani beton pa čak i za mort i žbuku što je i tema ovoga rada. Kako bi se neka od navedenih poboljšanih svojstava metakaolina mogla provjeriti i samostalno ispitati, jedna od mješavina u ovom radu biti će izrađena zamjenom udjela cementa metakaolinom te će se usporediti u odnosu na uobičajeni mort [9].

2.3 PVC piljevina kao zamjenski materijal za udio pijesaka

Plastomerni materijal koji se dobiva polimerizacijom vinil-klorida nazivamo poli (vinil-klorid) ili skraćeno PVC, odnosno poznatiji kao plastika. Zahvaljujući mnogim varijacijama u sastavu PVC-a te samim time i širokoj primjeni potrošnja je konstantno u porastu. Svojstva se mogu mijenjati dodavanjem različitih monomera tijekom polimerizacije kao na primjer vinil-acetata, ali i dodatkom različitih stabilizatora, punila ili plastifikatora. Stoga postoje varijante PVC-a s različitim svojstvima od tvrdog i žilavog pa sve do mekanog i elastomernog materijala. Međutim dvije osnovne vrste jesu kruti i savitljivi PVC. PVC se vrlo često primjenjuje i u građevinarstvu zbog svojih povoljnih karakteristika, kao na primjer za izradu prozorskih okvira, roleta, tapeta,

odvodnih cijevi te u elektroindustriji za primjerice izolaciju električnih kabela (Slika 5). Osim toga, koristi se i za izradu predmeta koje svakodnevno koristimo i najčešće za jednokratnu upotrebu, ambalaže za lijekove i kozmetiku, raznovrsne boce, elektroničke uređaje, vrećice, materijali za omatanje, auto dijelovi, igračke, namještaji te mnoštvo drugih proizvoda [12].



Slika 5. Poli (vinil-klorid) ili PVC [13]

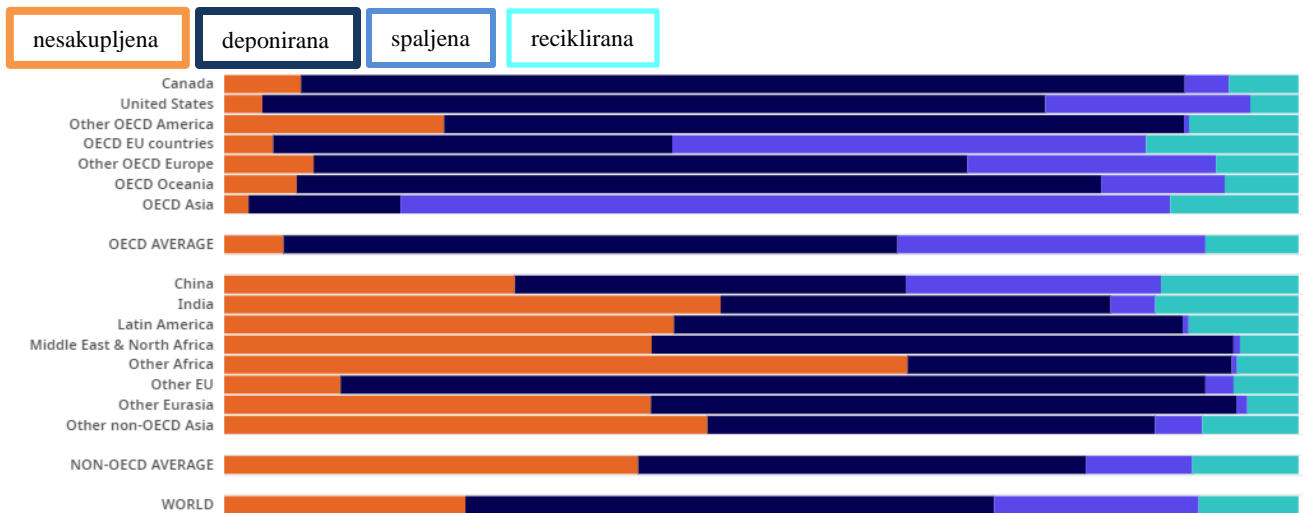
Prekomjerna proizvodnja PVC-a, naročito onih za jednokratnu upotrebu postaje sve veći problem i izazov za prirodu. Općepoznato je da se svijet nalazi usred krize zagađenja plastikom. Od 1950. godine ljudi su proizveli više od 8 milijardi tona plastike od čega je više od polovice otišlo direktno na odlagalište, dok je samo oko 9% reciklirano (Slika 6). Plastika može izazvati polaganu, ali izvjesnu pustoš u okolišu na nekoliko načina, od ispiranjem otrovnih kemikalija u tlo i podzemne vode do izravnog gušenja ili trovanja životinja koje je nesvjesno progutaju [14]. Primjerice, zapanjujući je podatak da više od 80% morskog smeća čini plastika. Osim što se nakuplja na plažama, odnosno u morima i oceanima, ostaci plastike nalaze se i u morskim vrstama poput kornjača, ptica, školjaka, riba te shodno tome i u ljudskom prehrambenom lancu [15]. Dakle, iako je plastični otpad na kopnu nedvojbeno zabrinjavajući, veliki postotak plastike koja se ne reciklira, spali (pritom zagađuje atmosferu) ili odvozi na odlagališta na posljetku završi u oceanima. Primjerice, 2019. godine mladi kljunasti kit nasukao se na obali Filipina i uginuo kako bi se naposljetku obdukcijom utvrdilo da mu je želudac bio začepljen s više od 40

kilograma plastičnog smeća [14]. Međutim, prikaže li se proizvodnja PVC-a u brojkama, 2018. godine svjetska proizvodnja plastike dosegla je gotovo 360 milijuna tona od čega 62 milijuna tona odgovara proizvodnji plastike u Europi.



Slika 6. Primjer nakupine plastike (otpada) [16]

Na kraju svog životnog vijeka plastika je izrazito štetna za okoliš i ljude što dovodi do sumnje o njezinoj sveukupnoj koristi unatoč njezinoj raširenoj upotrebi. Iznimna važnost u budućem korištenju i isplativosti PVC-a je stoga reciklaža. Iako 2018. godine količina reciklirane plastike se udvostručila u odnosu na 2006. godinu, točnije s 4,7 milijuna tona na 9,4 milijuna tona, i ponovna upotreba i obnova je dobro poznati postupak koji se koristi diljem svijeta, količina nakupljenog plastičnog otpada nakon upotrebe i dalje raste. Primjerice, 2018. godine zabilježen je porast do 19% u usporedbi s 2006. godinom, odnosno s 24,5 milijuna tona na gotovo 30 milijuna tona plastičnog otpada zabilježenog 2018. godine [17]. Nadalje, prikazan je grafikon u kojem se uspoređuje postotak plastike koja je loše gospodarena i nesakupljena plastika, deponiran, spaljen i recikliran po različitim zemljama svijeta i ukupno u svijetu za 2019. godine.



Slika 7. Način zbrinjavanja plastike za 2019. godinu [18]

U svijetu je 2019. godine 22% plastike nesakupljeno i odlazi na nekontrolirana odlagališta, spaljuje se na otvorenom ili završava u kopnenom ili vodenom okolišu posebice u siromašnijim zemljama, 49% deponirano, 19% spaljeno i svega 9% reciklirano (15% se prikuplja za recikliranje, ali od toga se 40% odlaže kao ostaci) [18]. Filipini je država s najviše nerekiciranog i nedeponiranog otpada koji je naposljetku završio u oceane i to skoro 360 tona plastike u 2021. godini. Država s najviše neobrađenog (nerekiciranog, nedeponiranog) otpada u 2021. godini je Indija s skoro 13 miliona tona plastike. Najnoviji podaci za 2022. godinu govore da je najveći proizvođač plastičnog otpada Indija te slijede Kina, Filipini i Brazil [14].

Jedan od načina za daljnjim korištenjem plastičnog otpada i izbjegavanje njegova odlaganja je uporaba otpadnog materijala u građevinskom sektoru. Najučinkovitiji i najčešći primjer korištenja otpadne plastike je zamjena s određenim udjelom pijeska ili šljunka u betonu i mortu. Prednost navedenog je u ekonomičnosti, ali i u ekološkom pogledu jer se korištenjem otpadnog materijala smanjuje količina deponiranog plastičnog otpada. Pretraživanjem literature moguće je pronaći mnogo primjera istraživanja u kojima se cement ili agregat zamjenjuje plastičnim nusproduktima što je cilj i ovog istraživanja. Dok mineralni zamjenski materijali uglavnom utječu na neznatni pad ili poboljšanje mehaničkih svojstva betona ili morta, u slučaju zamjene s plastikom mnogi eksperimentalni podaci ukazuju na značajan gubitak mehaničkih svojstva. Veličina smanjenja mehaničkih svojstava ovisi o različitim parametrima kao primjerice koja je

komponenta betonske mješavine zamijenjena (sitni agregat, krupni agregat, oba agregata ili pak cement), količini zamjenskog materijala (postotak volumena ili postotak mase) te veličini i ploštini materijala koji se zamjenjuje i koji je zamijenjen. Primjerice, jedno od brojnih istraživanja u kojem se pijesak zamjenjuje PVC-om ukazuje na smanjenja tlačne čvrstoće s povećanjem postotka PVC-a [17]. Udio zamjene u postocima od 5, 15, 30, 45% rezultiraju smanjenjem od redom 9, 19, 22, 47% tlačne čvrstoće [19]. Nadalje, trend smanjenja tlačne čvrstoće nije linearan već za zamjenu od 30% i više, čvrstoća eksponencijalno pada. Istovremeno, još jedan primjer potvrđuje rezultate istraživanja da se tlačna čvrstoća smanjuje povećanjem udjela PVC-a, i to nelinearno nakon određenog udjela. Senhadji [20] je u svome radu zamijenio pijesak s nešto većim postotkom PVC-a, i to s 10, 30, 50 i 70% te ustvrdio da se tlačna čvrstoća smanjuje za redom 3, 13, 17 i 19%. Osim toga, istraživala se i mogućnost zamjene plastičnog otpada, veličine manje od 5 mm, s pijeskom, u postotku od 5%, 10% i 20% u radu Mahera Al-tayeb Mustafe [21]. Ovim ispitivanjem zaključeno je da se prosječna tlačna čvrstoća smanjuje za 7, 12, 24% za zamjenu od 5, 10 i 20% volumena pijeska [17]. Međutim, na temelju proučavanja literature zaključeno je da postoji potencijal da kombinacijom PVC piljevine i metakaolina se postigne betonska mješavina zadovoljavajućih mehaničkih i trajnosnih svojstava.

2.4 Problem odlaganja plastike

Što ćemo s plastikom i kamo ona ide nakon što ju prestanemo koristiti? Isprva, ovo zvuči kao pitanje postavljeno od strane znatiželjnog djeteta, međutim iz toga se krije odgovor od globalne važnosti u današnjem načinu života. Svaka četkica za zube, slamka, boca vode, kemijska olovka koja je ikad iskorištena u našem životu još uvijek se nalazi na ovoj planeti, bilo to u svom izvornom obliku, recikliranom u drugi proizvod ili polako razgrađeno u sitne komadiće koje nazivamo mikroplastika. Plastika nas okružuje, a po dizajnu je napravljena da traje desetljećima, ako ne i stotinama godina. Nezamislivo koristan materijal, ali istovremeno i štetan u smislu stvorenog otpada. Počinje se koristiti tek 1907. godine i procjenjuje se da traje stotinama godina prije nego što se konačno raspadne. Nagomilava se na mnogo neshvatljivih načina poput

Velikog tihooceanskog otoka smeća veličine jednake površini tri Francuske koji jednostavno pluta u središtu oceana (Slika 8).



Slika 8. Veliki tihooceanski otok smeća [22]

Brzina koja je potrebna plastici da se razgradi ovisi o njezinom sastavu i strukturi, ali i o izloženosti sunčevoj svjetlosti. Stoga se često na odlagalištima plastični otpad izlaže suncu kako bi se ubrzao proces razgradnje. Na primjer, plastičnim vrećicama za jednokratnu upotrebu potrebno je otprilike 20 godina da se razgrade. Nasuprot tome, plastičnim bocama za vodu izrađenim od polietilen tereftalata (PET), uobičajene vrste plastike, procjenjuje se da treba otprilike 450 godina da se potpuno razgrade ili na prvu ruku beznačajne četkice za zube kojima je potrebno 500 godina za razgradnju. Ustanovilo se da je plastika i blagoslov i prokletstvo današnjice, ali postavlja se pitanje što je moguće ispraviti kako bi izvukli samo ono dobro iz tog materijala [22]. Izuzevši odlaganje, koji predstavlja dugotrajan proces razgradnje plastike, spaljivanje je najčešći način zbrinjavanja plastičnog otpada. Međutim, to je skupocjeni proces i uzrokuje štetne emisije plinova iz spalionice. Ostali industrijski procesi iziskuju energetski intenzivne procese glikolize, pirolize i metanolize. Nasuprot tome, jednostavniji i brži proces iskorištavanja plastičnog otpada jest reciklaža. Reciklažom se dolazi do ekonomske uštede, ali i do spašavanja planeta od ekološke katastrofe. Danas se reciklaža pokušava što više popularizirati, ali i pronalaze se različite metode kojima se reciklaža ubrzava i smanjuju štetna djelovanja nastala razgradnjom plastičnog otpada. Znanstvenici i inženjeri sa Sveučilišta Texas

u Austinu, 2022. godine, objavili su članak koji opisuje korištenje nove varijante enzima s ciljem smanjenja vremena potrebnog za razgradnju plastičnog otpada [23]. Tim istraživanjem opisuje se mogućnost povećanja količine recikliranja otpada čime bi industrije mogle smanjiti štetan utjecaj na okoliš ponovnom upotrebom plastike na molekularnoj razini. Stvoreni enzim fokusiran je na razgradnju PET plastike, koja je već spomenuta, i pretpostavlja se da čini ukupno 12% svjetskog otpada. Omogućuje kružni proces razgradnje plastike na manje dijelove, što se naziva depolimerizacija te zatim ih kemijski ponovno povezati, repolimerizacija. PET plastika se u određenim uvjetima, pomoću spomenutih enzima, može u potpunosti razgraditi za samo 24 sata.

Ovim radom istražuje se potencijal direktne upotrebe PVC otpada (Slika 9) koja je nusprodukt tvornice za izradu PVC stolarije kao zamjenskog materijala za sitni agregat u proizvodnji morta i betona s ciljem utvrđivanja utjecaja PVC-a na mehanička i trajnosna svojstva. Oblik i veličina otpada je odgovarajućih dimenzija te se, bez dodatne obrade ili nekakvih mljevenja, može koristiti kao materijal za izradu betona, odnosno cementnog morta. Pozitivni rezultati istraživanja mogli bi poslužiti kao dobra osnova o mogućnostima upotrebe PVC otpada u betonu jer se na taj način plastika reciklira bez ikakvih troškova obrade i u vrlo kratkom vremenu.



Slika 9. PVC otpad iz tvornice PVC stolarije

3. MATERIJALI, MJEŠAVINE I METODE ISPITIVANJA

Kako bi se ostvario osnovni cilj istraživanja bilo je potrebno izraditi cementne mješavine s određenim udjelom PVC otpada kao zamjena za udio pijeska. Da bi se cementni mort mogao pravilno ugraditi u kalupe postavljen je osnovni uvjet da pripremljene mješavine moraju biti zadovoljavajuće obradivosti. Obradivost morta u svježem stanju ispitana je standardnim postupkom sukladno normi HRN EN 1015-3, Određivanje konzistencije svježeg betona (pomoću potresnog stolića) [24] mjereći promjer rasprostiranja morta na potresnom stoliću. Izmjereni promjer rasprostiranja predstavlja osnovnu mjeru obradivosti cementne mješavine pomoću koje potvrđujemo mogućnost izrade uzoraka za ispitivanje očvrslih svojstava

Prethodnim provedenim ispitivanjima [2] uočen je problem gubitka obradivosti uslijed nedostatka vode i/ili aditiva što je onemogućilo pravilnu ugradnju u kalupe za ispitivanje očvrslih svojstava. Za referentnu mješavinu promjer rasprostiranja morta iznosio je 18,5 i 19,4 cm što će se uzeti kao okvirna vrijednost za dobivanje zadovoljavajuće obradivosti. Udio PVC otpada u istraživanju [2] iznosio je 15% i 30%. Promjer rasprostiranjem za cementne mješavine s udjelom PVC otpada od 15% volumena pijeska, CM-PVC 15, kretao se u rasponu od 12 do 15,8 cm dok je za mješavinu CM-PVC 30 bio u rasponu od 11,5 do 12,4 cm. Dakle, potvrđeno je da se povećanjem udjela PVC otpada dolazi do smanjenja obradivosti mješavine [2].

U sklopu ovog diplomskog rada ukupno su izrađene četiri mješavine cementnog morta. Za izradu mješavina korišten je uobičajeni materijal za pripravljanje smjese cementnog morta, odnosno cement, pijesak, voda u omjeru 1:3:0,5 uz dodatak aditiva.

3.1 Mješavine morta

Prva cementna mješavina pripremljena je sa standardnim sastojcima morta bez udjela PVC otpada, oznake CM-REF, i ona će služiti kao referentna mješavina odnosno za usporedbu rezultata ispitivanja. Druga mješavina je cementa mješavina s dodatkom PVC piljevine a izrađena je na način da se 5% volumena pijeska zamjenjuje s volumenom PVC piljevine. Dakle, ova mješavina, označena s CM-PVC5, se sastoji od istih sastojaka poput referentne mješavine uz dodatak PVC-piljevine i aditiva za poboljšanje obradivosti. Sljedeća cementna mješavina sadrži dvostruko veću količinu PVC piljevine te standardne sastojke i aditive. Opisana mješavina označava se s CM-PVC10 u nastavku teksta. Naposljetku, izrađena je, mješavina s potpuno jednakim sastojcima poput mješavine CM-PVC5 uz dodatnu zamjenu od 5% mase cementa s metakaolinom, oznake CM-PVC5 + M.

Uzimajući u obzir sve navedeno, a za postizanje zadovoljavajuće obradivosti cementnoj mješavini dodani su aditivi: superplastifikator proizvođača Mapei, Dynamon SF 16S i stabilizator proizvođača MasterMatrix SDC 150. Pomoću aditiva te smanjenja udjela PVC otpada s 15% i 30% na 5% i 10% u odnosu na volumen pijeska eliminiran je problem gubitka obradivosti. Za izradu referentne mješavine nije korišten aditiv. Postupak izrade probne mješavine započinjemo s cementnom mješavinom s 5% volumena PVC otpada s obzirom na količinu pijeska, CM-PVC5, i s 1% superplastifikatora u odnosu na ukupnu masu cementa. Nakon dobivenih rezultata rasprostiranja na potresnom stoliću, prema normi HRN EN 1015-3, povećavamo, odnosno smanjujemo, postotak superplastifikatora za isti udio PVC otpada sve dok se ne rezultati promjera rasprostiranja približno ne podudaraju s rezultatima dobivenim za referentu mješavinu. Minimalno rasprostiranje usvojene mješavine, odnosno izmjereni promjer na potresnom stoliću ne smije biti manje od 140 mm kako bi mort imao zadovoljavajuću tečnost [6]. Prethodnim ispitivanjima, bez korištenja aditiva, promjeri su na granici ili čak manji od granice koja je dopuštena za cementni mort. Razlika dobivenih promjera između CM-REF i CM-PVC5 mora biti znatno manja od 5 cm [2]. Dobivanjem optimalnog postotka plastifikatora u odnosu na masu cementa, nastavljamo s sljedećom cementnom mješavinom s 10% PVC otpada i ponavljamo postupak. Optimalan omjer postotka PVC otpada i postotka korištenih

aditiva dobivamo pomoću zadovoljavajućih rezultata konzistencije rasprostiranjem te ako ograničenja dopuštaju udio PVC otpada se povećava.

Nakon izrade optimalnih cementnih mješavina ispitana su svojstva svježeg morta u skladu s normama za mort. Ispituje se konzistencija rasprostiranjem sukladno normi HRN EN 1015-3 [24], gustoća i temperature sukladno normi HRN EN 1015-6 [25] te udio pora svježeg morta sukladno normi HRN EN 1015-7 [26]. Za svaku mješavinu izrađene su 2 grupe uzoraka, uzorci za ispitivanje nakon 7 i nakon 28 dana starosti. Uzorci korišteni za ispitivanje nakon 7 dana starosti su 3 prizme dok su za potrebe ispitivanja očvrslog morta nakon 28 dana izrađene 3 prizme, 3 kocke te 1 valjak. Na prethodno navedenim uzorcima, ispitana su mehanička i trajnosna svojstva očvrslog morta. U skladu s normom za mort EN 1015-11 [27], ispitana je tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća savijanjem. Ispitivanje kapilarnog upijanja (vodoupojnost) provodi se sukladno normi za mort HRN EN 1015-18 [28] a ispitivanje otpornosti na habanje, odnosno abraziju pomoću norme za beton EN 13892-3 [29]. .

3.2 Materijali i metode ispitivanja

Neposredno prije spravljanja mješavina morta, vlastitim laboratorijskim ispitivanjima ispitane su osnovne karakteristike materijala koje su potrebne za izradu recepture cementnog morta a u skladu s normama za cement, mort i pijesak.

3.2.1 Pijesak

Za izradu cementnog morta korišten je pijesak (Slika 10) dopremljen iz kamenoloma u Šumberu koji je u vlasništvu tvrtke Holcim d.o.o. (Hrvatska) [30]. Volumni udio pijesak će se tijekom ispitivanja zamijeniti s određenim postotkom volumena PVC piljevine.



Slika 10. Pijesak

Ispitivanje nasipne gustoće pijeska u rastresitom stanju određuje se klasičnom metodom pomoću omjera mase i volumena preko sljedeće formule:

$$\rho = \frac{m [kg]}{V [cm^3]} \quad (1)$$

gdje je ρ gustoća pijeska (kg/cm^3), m masa (kg) i V volumen (cm^3). Ispitivanje se provodi na način da pijesak ubacujemo u posudu poznatog volumena (1L) i odredimo njegovu masu (Tablica 1). Srednja vrijednost nasipne gustoća pijeska u rastresitom stanju iznosi $1,513 g/cm^3$.

Tablica 1. Nasipna gustoća pijeska – u rastresitom stanju

Pijesak - nasipna gustoća - rastresita			
	Volumen posude	Masa PVC otpada	Gustoća
Oznaka	V_p	m_{pvc}	ρ_0
Mjerna jedinica	cm^3	g	g/cm^3
1. ispitivanje	1000	1512	1,512
2. ispitivanje	1000	1516	1,516
3. ispitivanje	1000	1510	1,51
Sr. vrijednost	1000	1512,667	1,513

Za određivanje nasipne gustoće pijeska u zbijenom stanju koristi se ista posuda volumena od 1l, ali se pijesak puni postepeno u 3 sloja te se svaki sloj zbija ravnomjerno s 25 udaraca tako da prodre u prethodni sloj materijala, odnosno do dna kod prvog sloja. Korištena oprema prikazana je na Slici 11.



Slika 11. Određivanje nasipne gustoće

Nakon vaganja mase posude sa zbijenim agregatom korištenjem izraza (1) određuje se nasipna gustoća zbijenog pijeska. Provedena su tri ispitivanja te je iz srednje vrijednosti izračunata gustoća u iznosu od $1,706 \text{ g/cm}^3$ (Tablica 2).

Tablica 2. Nasipna gustoća pijeska – u zbijenom stanju

Pijesak - nasipna gustoća - zbijena			
	Volumen posude	Masa PVC otpada	Gustoća
Oznaka	V_p	m_{pvc}	ρ_0
Mjerna jedinica	cm^3	g	g/cm^3
1. ispitivanje	1000	1706,4	1,7064
2. ispitivanje	1000	1698,2	1,6982
3. ispitivanje	1000	1712,1	1,7121
Sr. vrijednost	1000	1705,567	1,706

Gustoća pijeska određena je sukladno zahtjevu norme HRN EN 1097-6, Određivanje gustoće i upijanja vode [31]. Pijesak se potapa u vodi minimalno 24 sata i tada se smatra agregat zasićen vodom. Vlažan pijesak se izvaže na način da se višak vode odlije iz posude za vaganje (m_{wv}).

Zatim, uzorak se suši na plinu uz konstantno miješanje kako bi se dobio zasićen površinski suh uzorak. Provjera dobivenog zasićenog, ali površinski suhog uzorka obavlja se pomoću kalupa oblika krnjeg stošca koji se polaže na ravnu podlogu širom bazom. Stožac se napuni pijeskom i sabije s 25 udaraca vlastite težine šipke. Nakon podizanja kalupa, ako pijesak ima površinsku vlažnost, uzorak će zadržati oblik stošca. Sušenje se nastavlja te ispitivanje provjere ponavlja sve dok se zbijeni uzorak ne osipa nakon podizanja kalupa poput primjera na Slici 12. Agregat, pijesak, tada smatramo zasićenim površinski suhim i izvažemo ga na zraku (m_z).



Slika 12. Zasićen i površinski suh pijesak – uzorak je djelomično osipan

Za nastavak ispitivanja koristit se piknometar. Pripremljeni ispitni uzorak se uranja u vodu u piknometar te se uklanja zarobljeni zrak laganim kotrljanjem i potresanjem piknometra u nagnutom položaju. Piknometar se postavlja u posudu ispunjenom vodom da se pritom zadržava temperatura uzorka na $22 \pm 3^\circ\text{C}$ u razdoblju od $24 \pm 0,5h$. Prilikom dovršetka razdoblja namakanja, piknometar se izvadi iz vode i ponovno ukloni sav zarobljeni zrak laganim kotrljanjem i potresanjem. Nakon toga, piknometar se nadopunjuje vodom do označenog nivoa na gornjem dijelu, piknometar se posuši te se određuje njegova masa (m) (Slika 13). Potrebno

je izmjeriti temperaturu vode. Zatim, agregat se uklanja, a piknometar se ponovno ispunjava vodom do označenog nivoa, posuši se vanjski dio i odredi se masa (m_{BW}).



Slika 13. Piknometar ispunjen vodom i agregatom

Temperatura vode se ponovno očitava te razlika između prethodna dva mjerenja ne smije biti veća od 2°C. Osim svih nabrojanih masa potrebna nam je i masa suhog agregata koju dobivamo isušivanjem na temperaturi od $110 \pm 5^\circ\text{C}$ sve dok ne postigne konstantnu masu. Nakon što se agregat ohladi na sobnoj temperaturi mjeri se njegova masa (m_d). Određivanje gustoće, volumenske mase suhog agregata i volumenske mase zasićenog agregata vrši se preko sljedećih izraza:

$$\rho_0 = \rho_w \frac{m_d}{m_d - (m - m_{BW})} \quad (2)$$

$$\rho_{z(d)} = \rho_w \frac{m_d}{m_z - (m - m_{BW})} \quad (3)$$

$$\rho_{z(ZPS)} = \rho_w \frac{m_z}{m_z - (m - m_{BW})} \quad (4)$$

gdje je m_z masa zasićenog i površinski suhog agregata, m masa piknometra koji sadrži uzorak zasićenog agregata i vode, m_{Bw} masa piknometra ispunjenog samo vodom te m_d masa potpuno suhog agregata (agregat sušen na temperaturi od 100 do 110°C do konstantne mase). Mase su izražene u gramima (g), a gustoća vode izražena je u gramima po centimetru kubnom (g/cm^3) i označena s ρ_w . Gustoća se označava s ρ_0 , volumenska masa suhog agregata s $\rho_{z(d)}$ te volumenska masa zasićenog agregata s $\rho_{z(ZPS)}$. Rezultati gustoće izraženi su u gramima po centimetru kubnom (g/cm^3).

Izvagane mase, korištenjem spomenutog postupka prikazane su u Tablici 3.

Tablica 3. Izvagane mase

Svojstvo	Oznaka	Mjerna jedinica	Materijal
			Pijesak
masa vlažnog materijala	m_{wv}	g	600,23
masa zasićenog površinski suhog materijala	m_z	g	539,09
masa suhog materijala	m_d	g	518,71
masa piknometra ispunjenog vodom	m_{Bw}	g	962,47
masa materijala + piknometra + vode	m	g	1297,94

Uvrštavanjem dobivenih masa u prethodno spomenute izraze (2), (3) i (4) dobivaju se potrebne gustoće (Tablica 4).

Tablica 4. Gustoće pijeska

Svojstvo	Oznaka	Mjerna jedinica	Materijal
			Pijesak
gustoća	ρ_0	g/cm^3	2,83
volumenska masa suhog materijala	$\rho_{z(d)}$	g/cm^3	2,55
volumenska masa zasićenog materijala	$\rho_{z(ZPS)}$	g/cm^3	2,65

Vodoupojnost pijeska, oznake A_w , potopljenog u vodi minimalno 24 sata, određuje se pomoću norme HRN EN 1097-6 preko formule:

$$A_w = \frac{100 * (m_z - m_d)}{m_d} \quad (5)$$

Nadalje, površinska vlažnost, vlažnost i poroznost dobiva se preko sljedećih izraza:

$$A_s = \frac{100 * (m_{wv} - m_z)}{m_d} \quad (6)$$

$$W = \frac{100 * (m_{wv} - m_d)}{m_d} \quad (7)$$

$$p = \frac{100 * (\rho_0 - \rho_{z(d)})}{\rho_0} \quad (8)$$

gdje je A_s površinska vlažnost, W vlažnost i p poroznost izraženi u postotku mase.

Uzimajući u obzir izraze (6), (7) i (8) i prethodno dobivene rezultate masa i gustoća dobivamo potrebna fizikalna svojstva prikazane u Tablici 5. Za apsorpciju, površinsku vlažnost i vlažnost, osim rezultata izraženih u postotku mase, dani su i rezultati u postotku volumena dobiveni na način da se prethodno spomenute izraze (6-8) pomnoži s $\frac{\rho_0}{\rho_w}$.

Tablica 5. Fizikalna svojstva pijeska

Svojstvo	Oznaka	Mjerna jedinica	Materijal
			Pijesak
apsorpcija	A_w	% m	3,93
		% vol	11,12
površinska vlažnost	A_s	% m	11,79
		% vol	33,37
vlažnost	W	% m	15,72
		% vol	44,49
poroznost	p	%	10,01

Naposljetku, određen je granulometrijski sastav agregata pomoću metode sijanja prema normi HRN EN 933-1 [32]. Određivanje granulometrijskog sastava (Slika 14) provodi se korištenjem potpuno suhog uzorka materijala. Veličina otvora sita određuje se na način da se uzme sito većeg otvora od maksimalnog zrna frakcije koja se sije kao najgornje sito te se zatim postavljaju sita manjih otvora do dna.



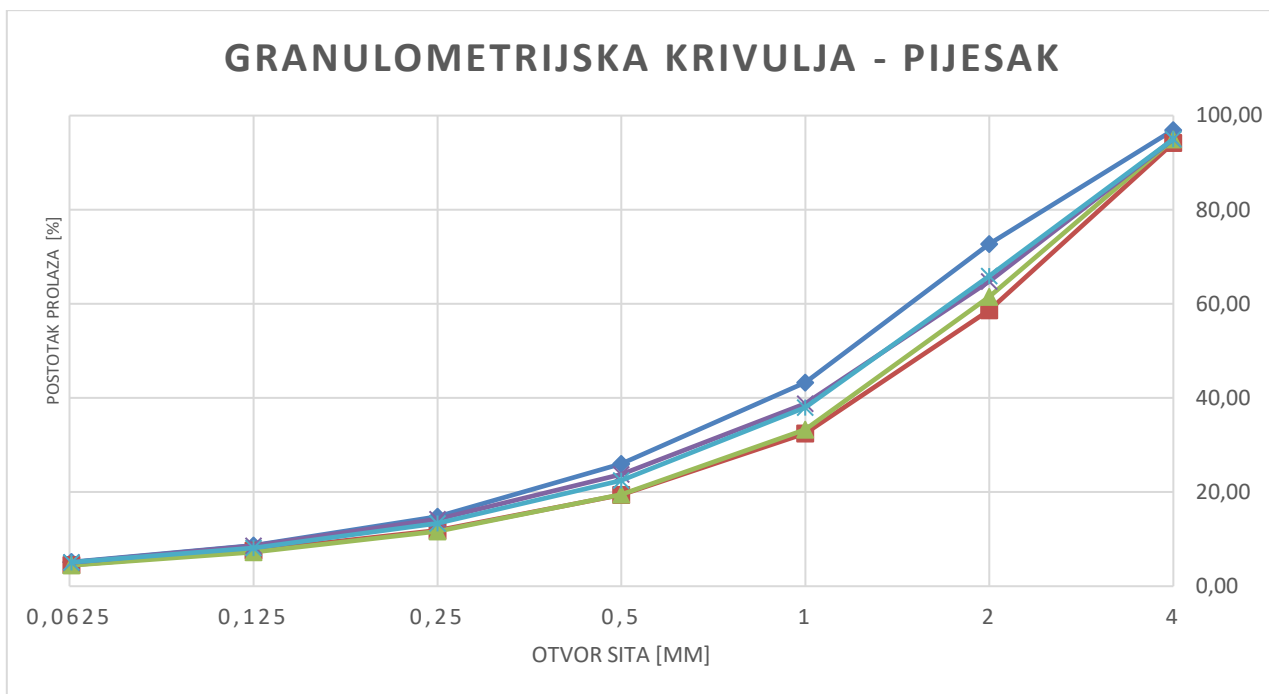
Slika 14. Uređaj za prosijavanje i sita – određivanje granulometrijskog sastava

Vrijeme sisanja uređaja određeno je na način da se broj sita koji je korišten pomnoži s 2 minute. Prije samog prosijavanja, masa reprezentativnog ispitnog uzorka smanjuje se četvrtanjem ili razdjelnikom, prema normi HRN EN 932-2 [33]. Minimalna masa ispitnog uzorka ovisi o veličini maksimalnog zrna agregata u mm. Nakon prosijavanja određuje se masa agregata na svakom situ te se zatim izračunava postotak prolaza na pojedinom situ. Rezultat prosijavanja prikazuje se grafički u koordinatnom sustavu na način da apscisa predstavlja otvor sita u mm (u log mjerilu) dok ordinata predstavlja postotak prolaza prosijanog agregata. Prilikom ispitivanja korišteno je 8 sita i to sita promjera: 4, 2, 1, 0,5, , 0,250, 0,125, 0,063 mm i dno (Slika 15).



Slika 15. Sita korištena za prosijavanje

Vrijeme prosijavanja svakog uzorka pijeska bilo je 16 minuta. Provedeno je ukupno 5 ispitivanja prosijavanjem koja su prikazana pomoću krivulja označenih različitim bojama na Slici 16. Masa pijeska koja je korištena za ispitivanje za sve uzorke iznosila je 200 grama.



Slika 16. Granulometrijska krivulja pijeska

U Tablici 6 prikazan je jedan primjer postupka proračuna postotka prolaza prosijanog agregata a na Slici 17 ostaci po pojedinom situ.

Tablica 6. Primjer određivanja granulometrijskog sastava pijeska

Materijal	Pijesak		
Masa [g]	200		
Ispitivanje br.	1		
Otvor sita mm	Ostatak na situ R _i g	Ostatak na situ (% ukupne mase) 100*R _i /M ₁	Kumulativni postotak prolaza (% ukupne mase) 100 - Σ(100*R _i /M ₁)
	4,0	6,1	3,1
2,0	48,4	24,2	72,8
1,0	59,0	29,5	43,3
0,5	34,5	17,3	26,0
0,3	22,4	11,2	14,8
0,1	12,3	6,2	8,7
0,1	7,0	3,5	5,2
0,0	8,8	4,4	0,8
Σ	198,5	99,3	



Slika 17. Ostaci na sitima frakcije pijeska

3.2.2 Cement i voda

Za pripremu morat korišten je cement Holcim Lumen cement, CEM II/A-LL 42,5 R; portlandski cement s dodatkom vapnenca prema HRN EN 197-1, također proizveden u tvrtki Holcim (Hrvatska) d.o.o., Koromačno. Prema tehničkim uputama, Holcim Lumen cement sastoji se 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. Preporuka za primjenu ove vrste cementa jako je opširna. Posebno je prilagođen za predgotovljene betonske elemente, dekorativne proizvode, prednapete betonske konstrukcije, proizvodnja tradicionalnih vrsta mortova, žbuka i građevinsko-kemijskih proizvoda. Svojstvo cementa, koje je posebno važno za vlastita ispitivanje, je mali zahtjev za vodom i veća sposobnost zadržavanja vode iz razloga što je u prethodnim ispitivanjima zamijećen problem smanjenja obradivosti uslijed nedostatka vode čime je otežana ugradnja svježeg morta u kalupe. Ostala svojstva ovog tipa cementa jesu poboljšana nepropusnost, ubrzan razvoj čvrstoće, povećan razvoj topline hidratacije. Tlačna čvrstoća nakon 2 dana vezivanja iznosi 28 MPa a nakon 28 dana vezivanja 51 MPa. Ostala osnovna fizikalna i kemijska svojstva cementa CEM II/A-LL 42,5 R te zahtjevi norme HRN EN 197-1 prikazana su u Tablici 7. Voda koja se koristi za izradi cementnog morta je voda iz slavine približne temperature 24 °C [30].

Tablica 7. Fizikalna i kemijska svojstva cementa [30]

Fizikalna svojstva	JM	Holcim Lumen [®] cement CEM II/A-LL 42,5 R	Uvjet norme
Postojanost volumena (Le Chatelier)	mm	0	≤ 10
Početak vezivanja	min	165	≥ 60
Tlačna čvrstoća na 2 dana	MPa	28,0	≥ 20
Tlačna čvrstoća na 28 dana	MPa	51,0	≥ 42,5 ≤ 62,5
Specifična težina cementa	g/cm ³	3,048	-
Kemijska svojstva			
SO ₃	%	3,0	≤ 4,0
Cl	%	0,0123	≤ 0,10

3.2.3 PVC piljevina

Usljed težnje za smanjenjem potrošnje prirodnih materijala, odnosno recikliranjem PVC otpada, pri izradi cementnog morta dio sitnog agregata zamijenjen je otpadnim materijalom iz lokalne tvornice PVC stolarije. Kao što je vidljivo na Slici 18 sam oblik PVC otpada podsjeća na piljevinu te se stoga koristi naziv PVC piljevina.



Slika 18. PVC piljevina

Zbog neuobičajenog i neistraženog materijala neka ispitivanja su se morala prilagoditi pa su osmišljena alternativna rješenja. Kada god je bilo moguće ispitivanja PVC piljevine provedena su prema poznatim normama za sitni agregat ili cement. Nasipna gustoća, u rastresitom i zbijenom stanju, odrađena je istom metodom kao i kod sitnog agregata. Nasipna gustoća u rastresitom stanju, zbog velikog volumena materijala u odnosu na masu, uvelike je ovisila o ispitaniku i načinu ubacivanja materijala u posudu te je stoga proveden nešto veći broj ispitivanja. Rezultati ispitivanja nasipne gustoće PVC-a kao i srednja vrijednost prikazani su u Tablici 8 i 9.

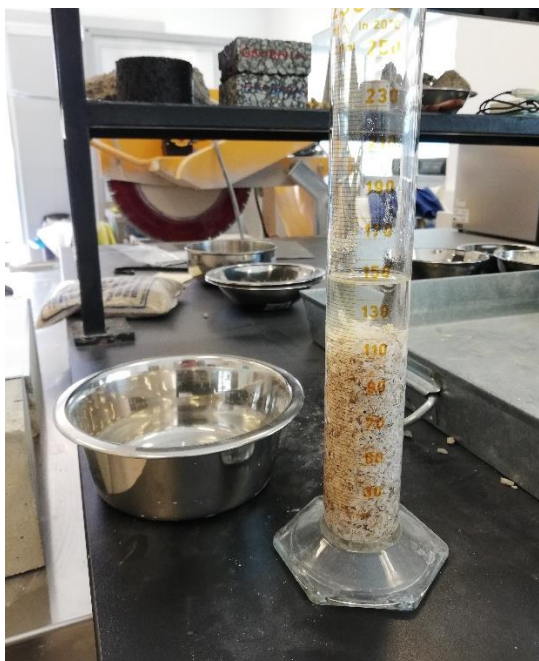
Tablica 8. Nasipna gustoća PVC piljevine – u rastresitom stanju

PVC otpad - nasipna gustoća - rastresita			
	Volumen posude	Masa PVC otpada	Gustoća
Oznaka	V_p	m_{pvc}	ρ_0
Mjerna jedinica	cm^3	g	g/cm^3
1. ispitivanje	1000	91,8	0,0918
2. ispitivanje	1000	91	0,091
3. ispitivanje	1000	88,1	0,0881
4. ispitivanje	1000	95	0,095
5. ispitivanje	1000	96,9	0,0969
Sr. vrijednost		90,3	0,093

Tablica 9. Nasipna gustoća PVC piljevine – u zbijenom stanju

PVC otpad - nasipna gustoća - zbijena			
	Volumen posude	Masa PVC otpada	Gustoća
Oznaka	V_p	m_{pvc}	ρ_0
Mjerna jedinica	cm^3	g	g/cm^3
1. ispitivanje	1000	139,6	0,1396
2. ispitivanje	1000	140,8	0,1408
3. ispitivanje	1000	138,6	0,1386
Sr. vrijednost		139,67	0,140

Gustoća PVC-a određena je po uzoru na postupak ispitivanja gustoće cementa pomoću menzure poznatog volumena (Slika 19). Ispitivanjem je izmjereno da je gustoća PVC-a otprilike negdje u rasponu od 0,9 do 1,3 g/cm^3 pa se za postupak ispitivanja koristio petrolej čija je gustoća 0,81 g/cm^3 .



Slika 19. Određivanje gustoće PVC piljevine pomoću menzure

Za ispitivanje cementa standardno se koristi Le Chatelierova tikvica međutim grlo tikvice je nedovoljno široko za ispitivanu PVC piljevinu jer je većih i nepravilnijih dimenzija od cementa što bi uzrokovalo zastaj u grlu tikvice i pritom ne bi bilo moguće izvesti ispitivanje. Stoga se koristi menzura, šireg otvora, u koju se isprva napuni petrolej i zabilježi se nivo očitani na menzuri. Nakon toga u bocu ubacujemo 10 grama PVC-a, (zbog velikog volumena PVC-a nije moguće koristiti 65 grama kako je zahtijevano za normu za cement), boca se rotira kako bi izašli mjehurići zraka i pritom tekućina ispunila sav prostor među česticama. Naposljetku očitava se nova razina petroleja i PVC-a te se pomoću dobivenih rezultata određuje gustoća (Tablica 10) preko izraza (9):

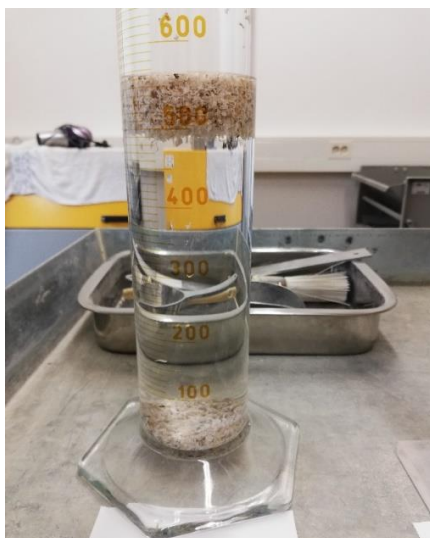
$$\rho_{PVC} = \frac{m_{PVC}}{\Delta V} \quad (9)$$

gdje je ρ_{PVC} gustoća PVC piljevine (g/cm^3), m_{PVC} masa PVC piljevine (g) i ΔV promjena volumena nakon dodavanja PVC piljevine (cm^3).

Tablica 10. Rezultat ispitivanja gustoće PVC piljevine

PVC otpad - gustoća					
	Volumen petroleja	Volumen petroleja + PVC	Masa PVC-a	Promijena V	Gustoća
Oznaka	V_p	V_{p+PVC}	m_{pvc}	ΔV	ρ_0
Mjerna jedinica	ml = cm ³	ml = cm ³	g	ml = cm ³	g/cm ³
1. ispitivanje	140	149	10	9	1,111
2. ispitivanje	140	148,5	10	8,5	1,176
3. ispitivanje	140	149	10	9	1,111
Sr. vrijednost					1,133

Određeno je prosječna gustoća od 1,13 g/cm³, ali tokom ispitivanja ustanovljeno je da gustoća može znatno varirati ovisno o uzroku PVC-a iz razloga što je to otpadni materijal i pritom imamo različite oblike, dimenzije i karakteristika PVC-a. Jednostavnim ispitivanjem se to i dokazalo. U menzuru je ubačena PVC piljevina i voda, čije je gustoća poznata i iznosi otprilike 1 g/cm³, te se promatralo hoće li uzorak potonuti ili ostati na površini. Općepoznato je da će materijal veće gustoće potonuti, a materijal manje ostati na površini vode. Na Slici 20 vidljivo je da najveći udio PVC-a pluta na vodi a manji dio djelomično i tone što nam dokazuje tezu o različitim gustoćama PVC piljevine.



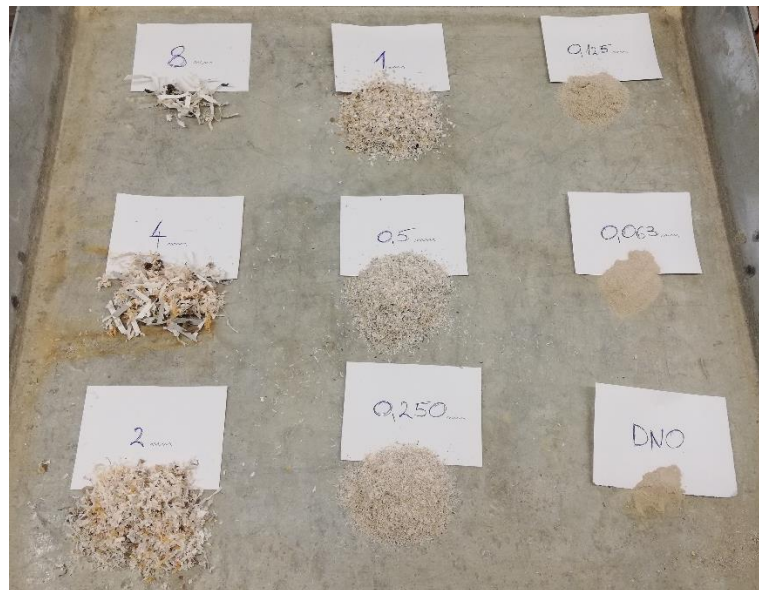
Slika 20. Dokaz različitih gustoća PVC piljevine unutar ispitanog uzorka

Postupak određivanja granulometrijskog sastava PVC piljevine potpuno je jednak kao i kod pijeska, osim što se dodaje još jedno sito promjera 8 mm na vrh. Prema normi, s obzirom na veličinu zrna, kao početna masa PVC-a je uzeto 300 grama. Međutim, nakon prvog prosijavanja uočeno je da veliki broj uzorka ostaje na situ od 1 mm te da je zbog prevelike količine uzorka i zbijenosti nemoguće je kvalitetno prosijati uzorak, vidljivo na Slici 21. Stoga, početna količina uzorka za prosijavanje je smanjena na 150 grama čime je uočen točniji rezultat.

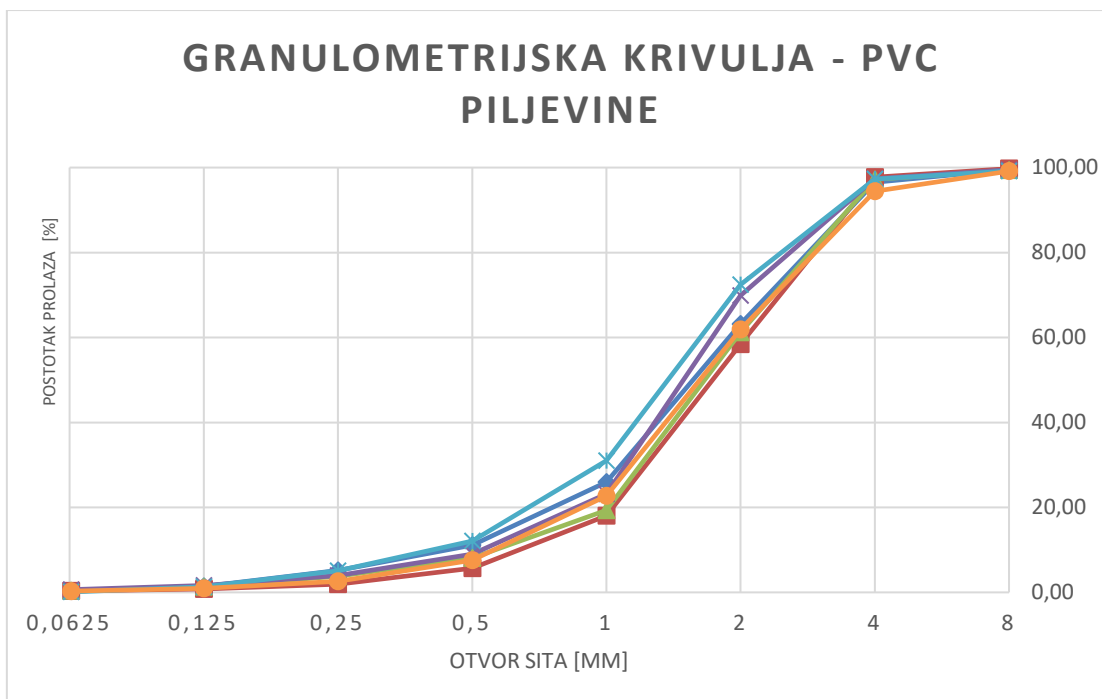


Slika 21. Prekomjerna količina materijala na jednom situ tokom postupka prosijavanja uzorka PVC piljevine

Prosijavanje je nastavljeno s masom od 200 grama i provedeno je prosijavanja 6 uzoraka . Slika 22 prikazuje ostatke na sitima dobivene nakon jednog od postupka prosijavanja. Dobivene granulometrijske krivulje prikazane su na Slici 23 i primjer jednog od prosijavanja u Tablici 11, nasumice odabranog, kako bi se moglo jednostavnije usporediti s granulometrijskim sastavom pijeska. Dva početna prosijavanja nisu uzeta u obzir pri konačnom određivanju rezultata.



Slika 22. Ostaci na sitima PVC piljevine

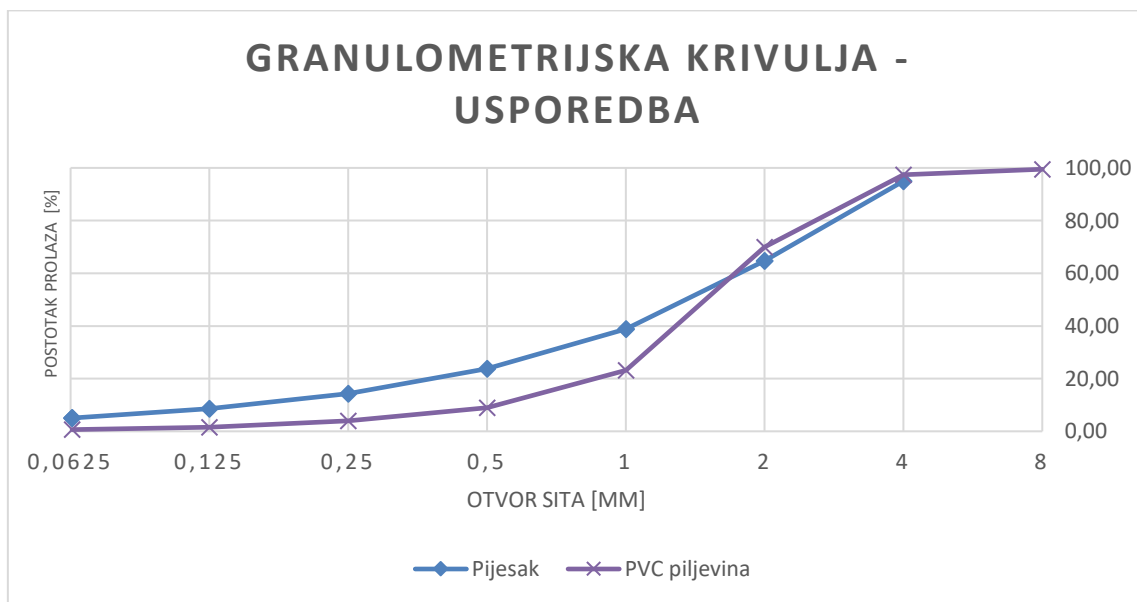


Slika 23. Granulometrijska krivulja PVC piljevine

Tablica 11. Primjer određivanja granulometrijskog sastava PVC piljevine

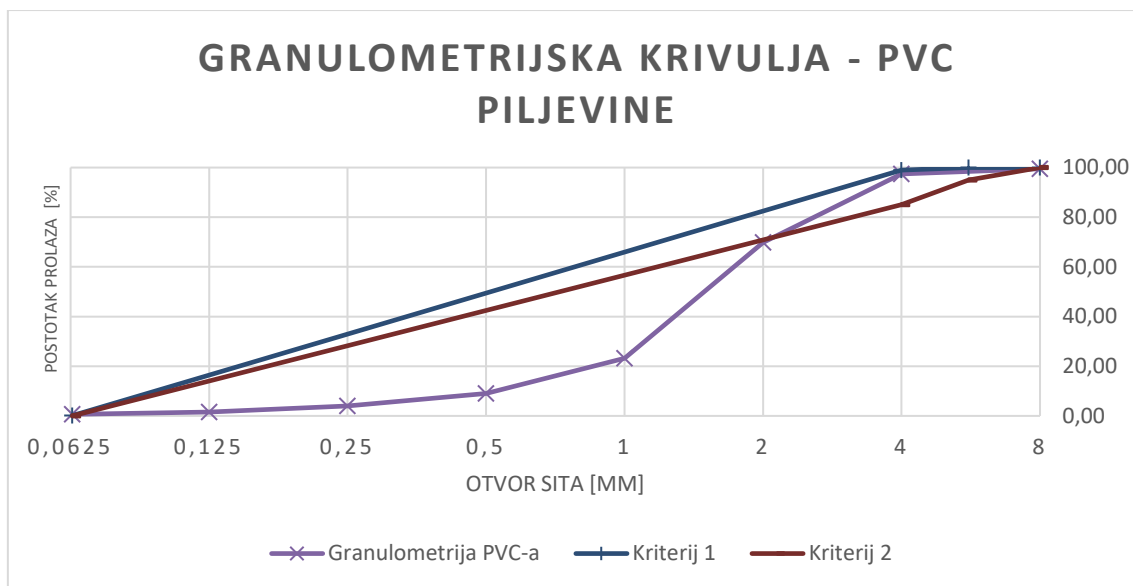
Materijal	PVC piljevina		
Masa [g]	200		
Ispitivanje br.	6		
Otvor sita	Ostatak na situ	Ostatak na situ	Kumulativni postotak prolaza
	R _i	(% ukupne mase)	(% ukupne mase)
mm	g	100*R _i /M ₁	100 - ∑(100*R _i /M ₁)
8	1	0,5	99,5
4	4,2	2,1	97,4
2	55	27,5	69,9
1	93,5	46,8	23,2
0,5	28,3	14,2	9,0
0,25	10,1	5,05	4,0
0,125	4,7	2,35	1,6
0,063	1,9	1,0	0,7
DNO	1,1	0,6	0,1
∑	199,8	99,9	

Usporedbom granulometrijskog sastava pijeska i PVC piljevine (Slika 24) može se zaključiti da je raspored veličine zrna pijeska mnogo ujednačeniji, odnosno imamo nešto manjih razlika između najbrojnijih frakcija (frakcije 0,5-1, 1-2, 2-4) u odnosu na PVC piljevinu. Kod PVC piljevine također su najbrojnije spomenute tri frakcije, ali u frakciji 1-2 imamo najveću količinu materijala u odnosu na ostatak. Prolazak kroz sito je malo manji kod PVC-a za frakciju 2-4, u odnosu na pijesak dok je za frakciju 1-2 prolazak mnogo veći u odnosu na pijesak. Međutim, sve u svemu može se reći da je PVC po granulometrijskom sastavu dostatno sličan pijesku i može koristiti kao njegova zamjena.



Slika 24. Usporedba granulometrijskog sastava nasumično odabranih uzoraka PVC piljevine i pijeska

Normom HRN EN 12620, Agregat za beton [34] određen je kriterij za granulometrijski sastav po pojedinim frakcijama agregata za spravljanje betona. Usporedimo li granulometriju PVC piljevine s kriterijem za frakciju 0-4 mm dobivamo rezultat kako je prikazano na Slici 25.



Slika 25. Usporedba granulometrijske krivulje PVC piljevine s kriterijem za pijesak određenim normom

Postoci prolaza u području omeđenom sitima 4 mm i 8 mm te 2 mm i 4 mm nalaze se unutar područja definiranog normom dok na sitima manjih otvora PVC piljevina ne zadovoljava kriterije prolaska prema normi. Međutim, granulometrijska krivulja pijeska također izlazi izvan granica određenim dvama kriterijima te stoga zaključujemo da su prikazane granične krivulje kriterije preporuka za dobivanje optimalne mješavine betona .

3.2.4 Aditivi

Na temelju prethodno provedenih ispitivanja [2] ustvrđeno je da bi se pripremila cementna mješavina s određenim udjelom PVC piljevine zadovoljavajuće obradivosti potrebno je koristiti aditive. Za pripremu morat koristi se superplastifikator, dodatak koji izrazito smanjuje potrebu za vodom, naziva Dynamon SF 16S, proizvođača MAPEI Austria GmbH. Dynamon SF 16S karakterističan je za univerzalnu primjenu izrađen na temelju polikarboksilatnog etera, izvrnog rasprostiranja s izrazito malom ljepljivošću svježeg betona. Prema tehničkim karakteristikama proizvođača superplastifikator je izrađen za značajno smanjenje vode ne mijenjajući obradivost betona, u našem slučaju cementnog morta. Osim toga, postiže se povećanja čvrstoća, manja propusnost te povećana izdrživost očvrstlog betona. Količina koja se koristi za izradu mješavine

ovisi o željenoj tečnosti i željenom smanjenju potrebe za vodom a točna količina određuje se eksperimentalno. Preporučena količina je 0,2% do 2,0% ukupne mase cementa dok je maksimalno preporučeno 2,5%. Superplastifikator se dodaje nakon dodavanja svih ostalih sastojaka, cement, pijesak i minimalno 80% količine vode, u mješavinu. Prema tehničkim podacima danim od strane proizvođača MAPEI, gustoća Dynamon SF 16S je u rasponu od 1,06 do 1,1 g/cm³ [35]. Osim superplastifikatora, ispitivanjem se utvrdilo da je potrebno koristiti i aditiv koji ima funkciju smanjenja izdvajanja vode i segregacije agregata, stabilizator, MasterMatrix SDC 150. Vodena otopina sintetskog kopolimera visoke molekularne težine za modifikaciju viskoznosti, naročito tekućih betona. Zahvaljujući prilagođenom načinu djelovanja u betonu omogućava viskoznost mješavine pomoći koje se dobiva ravnomjerni omjer fluidnosti, protočnost i otpornost na segregaciju (naizgled potpuno suprotna svojstva). Spomenuta svojstva se ne mogu postići istovremeno jednostavnim dodavanjem vode. Prednosti korištenja stabilizatora jesu smanjenje korištenja sitnih čestica (manjih od 0,125 mm), povećanje produktivnosti i brzine ugradnje te ugradnja bez buke i vibracija uz nisku ljepljivost betonske smjese. S ekološkog pogleda, ušteda na sitnim česticama predstavlja smanjenje emisije CO₂ i veću trajnost betona. Stabilizator se može koristiti u kombinaciji sa svim vrstama cementa i nema utjecaja na vrijeme stvrdnjavanja betona. Dakle, osnovno svojstvo koje je od interesa za provedeno ispitivanje je otpornost na segregaciju nakon ugradnje betona uz održavanje unutarnje kohezije [36].

4. IZRADA MJEŠAVINA MORTA

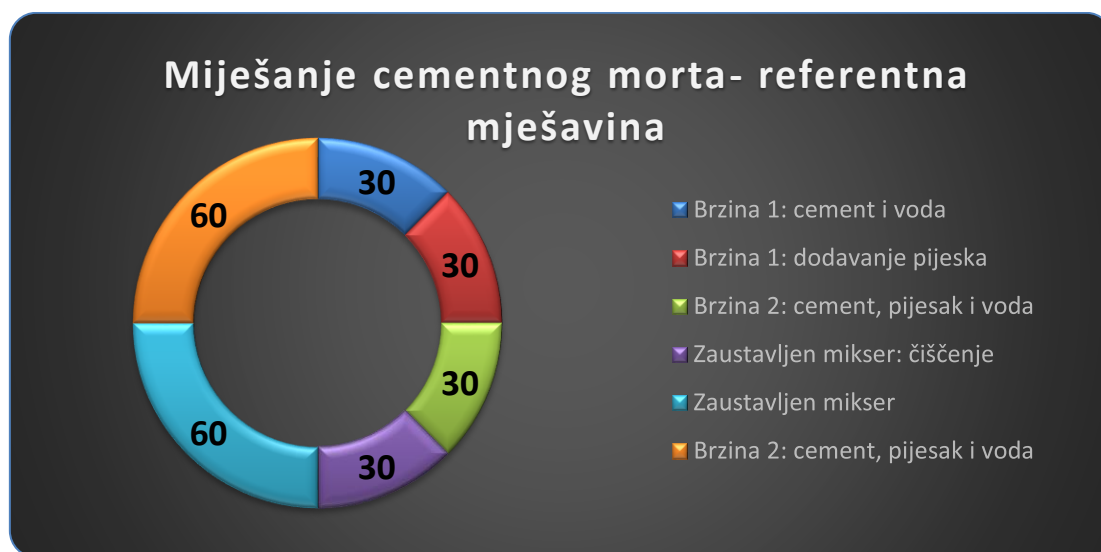
Za pripremu standardnog cementnog morta mješavina se izrađuje u omjeru od 1:3:0,5 cementa, pijeska i vode s obzirom na masu istih u skladu s normom HRN EN 196-1 [33]. Dakle, svaki set uzorka koji se sastoji od tri ispitna tijela oblika prizme, sadrži 450 ± 2 grama cementa, 1350 ± 5 grama standardnog pijeska i 225 ± 1 grama vode. Za izradu referente mješavine u ovom istraživanju poštivala se količina sastojaka propisana normom HRN EN 196-1 uz iznimku da se nije koristio standardni pijesak nego drobljenac frakcije 0-4 mm (detaljnije opisano u poglavlju 3.2.1.). Za izradu mješavina CM-PVC5 i CM-PVC10 5% odnosno 10% volumnog udjela pijeska zamijenjeno je sa PVC piljevinom. Dodatno, za mješavinu CM-PVC5 i CM-PVC5+M osim što se 5% volumnog udjela pijeska zamijenilo s PVC-om, 5% mase cementa zamijenjeno je metakaolinom.

Sve mješavine se izrađuje normiranim postupkom prema HRN EN 196-1. Postupak započinjemo dodavanjem 450 g cementa i 225 g vode u posudu miksera te odmah započinjemo s miješanjem brzinom jedan u trajanju od 30 sekundi. Mikser posjeduje dvije osnovne brzine, mala i velika brzina koje u nastavku nazivamo brzina jedan i brzina dva čiju su specifikacije dane u Tablici 12.

Tablica 12. Opis brzina miksera za spravljanje mješavina morta

	Okretaji [min ⁻¹]	Planetarno kretanje [min ⁻¹]
Niska brzina/Brzina jedan	140 ± 5	62 ± 5
Visoka brzina/Brzina dva	285 ± 10	125 ± 10

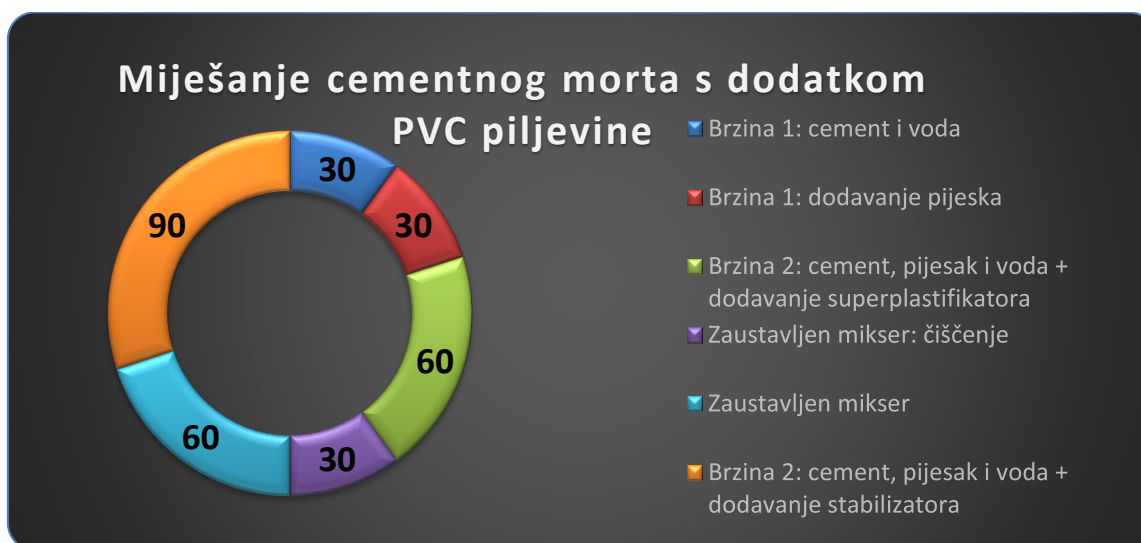
Zatim sljedećih 30 sekundi dodaje se pijesak te neposredno nakon dovršetka dodavanja pijeska brzina miksera povećava se na brzinu dva dodatnih 30 sekundi. Mikser se zaustavlja 90 sekundi, a tijekom prvih 30 sekundi mort se uklanja sa stjenki i dna posude i lopatice te se postavlja na središte. Nakon isteka 90 sekundi ponovno se pokreće mikser brzinom broj dva dodatnih 60 sekundi te time se dovršava proces miješanja svježeg morta opisanog prikazanog na grafu (Slika 26).



Slika 26. Postupak miješanja - CM-REF mješavine

Opisana procedura miješanja, određena normom, koristi se za izradu referentne mješavine, a za mješavine s dodatkom PVC piljevine proces je nešto izmijenjen i samo trajanje miješanja je produljeno. Kod mješavina s 5 i 10% zamjene PVC-a s pijeskom, osim nabrojanih sastojaka, dodaje se i superplastifikator i stabilizator. Aditivi se dodaju na način da se oni, prije dodavanja u cementnu smjesu, pomiješaju s vodom i to svaki s 10% od ukupne količine vode koja se koristi u recepturi morta. Podijelimo li postupak miješanja na 6 faza, superplastifikator dodajemo netom prije provođenja treće faze te tu istu fazu produljujemo za 30 sekundi. Dakle, nakon dovršetka dodavanja pijeska, u trećoj fazi u kojoj se nalazi 80% vode, 100% cementa i 100% pijeska, dodajemo 10% vode i superplastifikator te mikser namještamo na brzinu 2 i duljina trajanja miješanja je sada jednu minutu. Zatim, na početku posljednje faze dodajemo preostalih

10% vode i stabilizator te duljinu miješanja brzinom 2 povećavamo s minute na minutu i trideset sekundi (Slika 27). Opisane preinake postupka izrade morta nisu navede normom već su odabrane pomoću proučavanja tehničkih listova aditiva i iskustveno izradom probnih mješavina, odnosno optimalnog procesa miješanja.



Slika 27. Postupak miješanja - CM-PVC mješavine

Uzorci morta za ispitivanje čvrstoće na savijanje i tlak pripremljeni su kao prizme dimenzija 40 mm × 40 mm × 160 mm koje su navedene normom HRN EN 196-1, i to tri uzorka po mješavini. Dodatno, po svakoj mješavini izrađen je uzorak valjka dimenzije 100 mm × 200 mm za ispitivanje otpornosti na prodor klorida, međutim zbog kvara uređaja ispitivanje nije provedeno, i tri kockice brida 71 mm za ispitivanje otpornosti na habanje i kapilarne vodoupojnosti (Slika 28)



Slika 28. Prikaz korištenih kalup i ispitnih uzoraka cementnog morta

4.1 Cementna mješavina

Cementne mješavine s određenim udjelom PVC otpada izrađuju se kao zamjena za udio pijeska i s određenim dodatkom superplastifikatora i stabilizatora (Slika 29) s ciljem poboljšanja obradivosti. Zbog toga, svaka izrađena cementna mješavina posjeduje jedinstveni naziv koji sadrži podatke o korištenom volumnom udjelu PVC-a u mješavini izraženog preko postotka i količini superplastifikatora u odnosu na ukupnu masu cementa također izraženog preko postotka.



Slika 29. Prikaz svih korištenih materijala za izradu ispitnih mješavina

Primjerice, mješavina naziva CM-PVC10/1/1,5 sastoji se od 10% volumena PVC piljevine zamijenjene s 10% volumena pijeska, 1% superplastifikatora i 1,5% stabilizatora. Potrebna količina PVC piljevine, u ovom primjeru, dobivena je tako što se masa od 1350 grama izražava preko volumena kojeg zauzima u mortu pomoću gustoće. Zatim se određuje 10% od dobivenog volumena što predstavlja volumen PVC piljevine koji je potreban za navedeni cementni mort. Korištenjem gustoće, u konačnici izračunavamo potrebnu masu PVC piljevine. Dok se za izračunavanje količine superplastifikatora i stabilizatora jednostavno od ukupne mase cementa, koja je konstantna za svaku cementu mješavinu i iznosi 450 grama, odredi 1%, odnosno 1,5% što predstavlja masu superplastifikatora i stabilizatora kojeg je potrebno iskoristiti.

$$\rho = 2,65 \text{ g/cm}^3 \text{ pijesak}$$

$$\rho = 1,1 \text{ g/cm}^3 \text{ PVC piljevina}$$

$$\rho = \frac{m}{V} \rightarrow V_{\text{pijeska}} = \frac{m_{\text{pijeska}}}{\rho_{\text{pijeska}}} = \frac{1350 \text{ g}}{2,65 \text{ g/cm}^3} = 509,434 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{PVC}} = V_{\text{pijeska}} * \%_{\text{PVC}} = 509,434 \text{ cm}^3 * 0,1 = 50,943 \text{ cm}^3$$

$$m_{PVC} = V_{PVC} * \rho_{PVC} = 50,943 \text{ cm}^3 * 1,1 \text{ g/cm}^3 = 56,55 \text{ g}$$

$$m_{Dynamon} = m_{cementa} * \%_{Dy} = 450 \text{ g} * 0,01 = 4,5 \text{ g}$$

$$m_{stabilizator} = m_{cementa} * \%_{St} = 450 \text{ g} * 0,015 = 6,75 \text{ g}$$

Pomoću prethodnih formula izračunato je da 50,9 cm³ volumena pijeska zamjenjujemo s PVC piljevinom, odnosno 135 g pijeska zamjenjujemo s 56,04 g PVC piljevine. Dakle, mase sastojaka koje koristimo za cementnu mješavinu CM-PVC 10 iznose: 450 g cementa, 1215 g pijeska, 56,55 g PVC piljevine, 225 g vode, 4,5 g superplastifikatora i 6,75 g stabilizatora.

4.2 Referentna mješavina, CM-REF

Referentna mješavina izrađena je pomoću tri osnovna sastojka za izradu cementnog morta koja smo već spominjali, odnosno cement, pijesak i voda sukladno normi HRN EN 196-1. Referentna mješavina služi kao osnova s kojom ćemo uspoređivati svojstva cementnih mješavina s dodatkom PVC piljevine. Unaprijed očekivani promjer dobiven metodom ispitivanja rasprostiranja na potresnom stoliću na temelju prethodnih ispitivanja iznosi otprilike 190 mm [2]. Ciljani promjer, referentne, ali i ostalih mješavina, je od 140 – 200 mm, odnosno skupina plastičnog morta. Postupak miješanja opisan je u prethodnom poglavlju te se kao takav i provodio. Izrađena je jedna mješavina kojom su dobiveni povoljni rezultati te nije bilo potrebno mijenjati početne sastojke morta. Promjer dobiven ispitivanjem konzistencije rasprostiranjem na potresnom stoliću iznosio je 197,5 mm što je u okviru onog što smo i očekivali. U Tablici 13 prikazana je receptura kojom je dobivena referentna mješavina, CM-REF.

Tablica 13. Sastav referentne cementne mješavine CM-REF

Komponenta	Masa	Korigirana masa	Gustoća	Volumen
	g	g	g/cm ³	cm ³
Cement	450	450	3,08	146,10
Voda	225	278,06	1	225,00
v/c	0,5			
Pijesak	1350	1296,95	2,65	509,43
PVC	0	0	0	0
Superplastifikator	0	0	0	0
UKUPNO	2025	2025	6,73	880,54

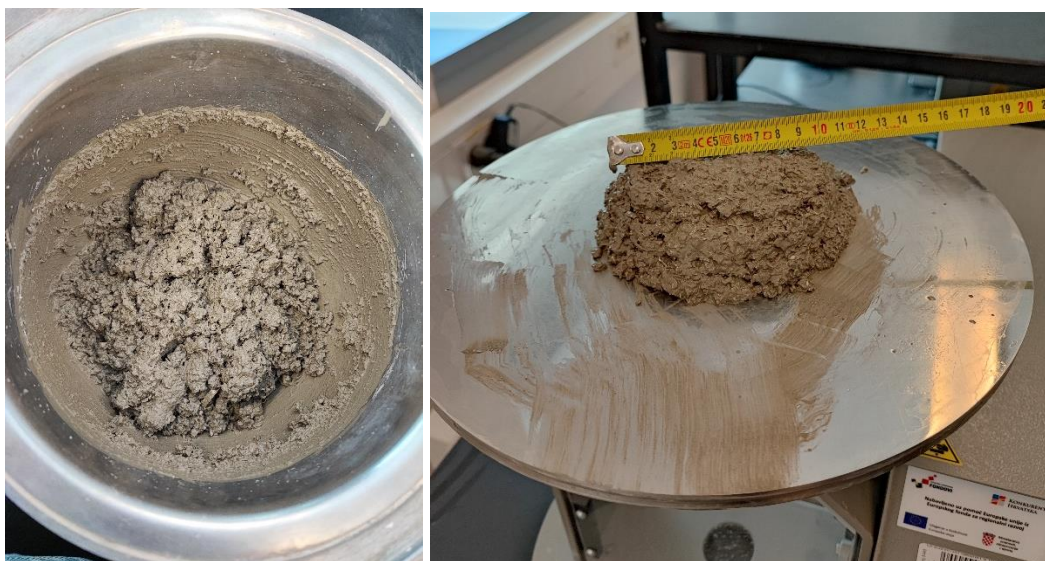
4.3 Cementna mješavina s 5% PVC piljevine

Cementna mješavina, kojoj se 5% volumena pijeska zamjenjuje s PVC piljevinom, sastoji se od 450 g cementa, 1269,8 g pijeska, 28,3 g PVC piljevine i 225 g vode (uz korekciju zbog vlažnosti i apsorpcije pijeska). Količine navedenih sastojaka se ne mijenjaju dok se količina aditiva izmjenjuje s ciljem postizanja dobrih rezultata. Sve mješavine koje su izrađene i svi korišteni sastojci s izmjerenim rezultatom dobivenim ispitivanjem konzistencije rasprostiranjem prikazani su u Tablici 14 (mase cementa, vode, pijeska i PVC-a nisu iskazane jer su kroz sve probne mješavine nepromijenjene i spomenute u početku poglavlja).

Tablica 14. Rezultati ispitivanja konzistencije rasprostiranjem probne mješavine CM-PVC5

Cementni mort s 5% PVC piljevine					
Redni broj mješavine	Naziv mješavine	Superplastifikator	Stabilizator	Promjer metodom rasprostiranja	
		[g]	[g]	r ₁ [mm]	r ₂ [mm]
1.	CM-PVC5	0	0	112	107
2.	CM-PVC5/1	4,5	0	/	/
3.	CM-PVC5/0,5	2,25	0	165	170
4.	CM-PVC5/0,4	1,8	0	165	170
5.	CM-PVC5/0,4/0,35	1,8	1,58	192	197
6.	CM-PVC5/0,4/0,4	1,8	1,8	180	180
7.	CM-PVC5/0,8/0,8	3,6	3,6	13	14,2
8.	CM-PVC5/1,2/0,8	5,4	3,6	14	15,5
9.	CM-PVC5/2/0,8	9	3,6	/	/
10.	CM-PVC5/1,6	7,2	0	/	/

Postupak postizanja optimalne mješavine s 5% PVC-a sastoji se od izrade ukupno 10 probnih mješavina. Započinjemo s prvom mješavinom, bez aditiva, te uočavamo, suhu mješavinu, loše obradivosti i nezadovoljavajuće konzistencije (Slika 30). Mješavina, na prvi pogled izgleda kao da joj nedostaje vlažnosti što bi nadalje uzrokovalo velike probleme kod ugradnje morta.



Slika 30. Prva probna mješavina - ispitivanje konzistencije rasprostiranjem

Kako bi poboljšali svojstva morta, dodajemo plastifikator i započinjemo s 1% plastifikatora u odnosu na masu cementa što je sredina preporučene vrijednosti za korištenje superplastifikatora Dynamon SF 16S. Međutim, sada se javlja problem segregacije vode (Slika 31) što nikako nije poželjno prilikom izrade morta te ispitivanjem konzistencije rasprostiranjem nije moguće očitati rezultate.



Slika 31. Probne mješavine s prekomjernom segregacijom

Zatim smanjujemo količinu superplastifikatora na 0,5 pa na 0,4% i dobivamo bolji rezultat konzistencije slijeganjem, ali segregacija vode je i dalje prevelika te ugradnja u kalupe je nemoguća. Rezultat sveg ovoga je da se mora dodati još jedan aditiv koji služi za skupljanje vode s cementnom smjesom i agregatom i čini ga vlažnijim i omogućava bolju ugradivost i obradivost. Sljedeća mješavina s 0,4% superplastifikatora i 0,35% stabilizatora dala je odlične rezultate te mješavina je bila izgledom poput referentne. Konzistencijom rasprostiranjem dobiveni su granični promjeri. Sljedeća ideja je da se poveća, odnosno izjednači količina plastifikatora i stabilizatora (0,4 g) te time je dobivena receptura za optimalnu mješavinu s zamjenom 5% PVC piljevine s pijeskom (Tablica 15).

Tablica 15. Sastav cementne mješavine CM-PVC5

Komponenta		Masa	Korigirana masa	Gustoća	Volumen
	%	g	g	g/cm ³	cm ³
Cement		450,00	450,00	3,08	146,10
Voda		225,00	276,94	1,00	225,00
v/c		0,50			
Pijesak		1321,73	1269,78	2,65	498,76
PVC	5,00%	28,27	28,27	1,11	25,47
Superplastifikator	0,40%	1,80	1,80	1,10	1,64
Stabilizator	0,40%	1,80	1,80	1,00	1,80
UKUPNO		2026,80	2026,80	8,94	898,78

Metodom rasprostiranja na potresnom stoliću dobivena je cementna mješavina pravilnog (kružnog) oblika bez segregacije vode s oba promjera u iznosu od 180 mm što je dovoljno blizu s rezultatima dobivenih referentnom mješavinom. Obradivost je zadovoljavajuća te ugradnja u kalupe je provedena bez ikakvih problema (Slika 32).



Slika 32. Ispitivanje konzistencije metodom rasprostiranja optimalne mješavine CM-PVC5

Izrađene je naknadno još nekoliko probnih mješavina na način da se povećavala količina aditiva međutim rezultat je nezadovoljavajući, pretjerana segregacija i loša obradivost. Pokušaj bez stabilizatora s mnogo superplastifikatora, posljednja probna mješavina, rezultira prevelikoj segregaciji vode, gotovo nikakva obradivost i nikakvo rasprostiranje, vidljivo na Slici 33.



Slika 33. Primjer segregacije dobivene korištenjem samo superplastifikatora

Naposljetku, određeno je da je mješavina, pod rednim brojem 6, CM-PVC5/0,4/0,4 zadovoljavajućih karakteristika koja se sastoji od sastojaka navedenih na početku poglavlja i dodatno 1,8 g sperplastifikatora i 1,8 g stabilizatora. Ova receptura koristi se za izradu ispitnih uzoraka i provedbu ispitivanja te se u nastavku teksta označava s CM-PVC5.

4.4 Cementna mješavina s 10% PVC piljevine

Cementna mješavina kod koje je 10% volumena pijeska zamijenjeno s PVC piljevinom izrađena je pomoću 450 g cementa, 1242,62 g pijeska, 56,55 g PVC piljevine i 225 g vode (uz korekciju zbog vlažnosti i apsorpcije pijeska). Količina vode i cementa je podjednaka kao i kod mješavine s 5% PVC-a iz jednostavnog razloga što su tada mješavine usporedive. U protivnom ne bi bilo moguće uspoređivati rezultate svježeg i očvrsllog morta različitih mješavina. Količina PVC iznosi 56,6 grama dok količinu aditiva ćemo u nastavku odrediti istim postupkom kao i do sada, probnim mješavinama. Za dobivanje optimalne recepture odrađeno je 9 probnih mješavina koje su opisane u Tablici 16.

Tablica 16. Rezultati ispitivanja konzistencije rasprostiranjem probne mješavine CM-PVC10

Cementni mort s 10% PVC piljevine					
Redni broj mješavine	Naziv mješavine	Superplastifikator	Stabilizator	Promjer metodom rasprostiranja	
		[g]	[g]	r ₁ [mm]	r ₂ [mm]
1.	CM-PVC10/2/0,8	9	3,6	/	/
2.	CM-PVC10/2/1,6	9	7,2	/	/
3.	CM-PVC10/2/2	9	9	140	145
4.	CM-PVC10/2/2,4	9	10,8	155	140
5.	CM-PVC10/2/2,8	9	12,6	130	135
6.	CM-PVC10/0,4/1,2	1,8	5,4	140	170
7.	CM-PVC10/0,8/1,2	3,6	5,4	130	142
8.	CM-PVC10/0,8/1,4	3,6	6,3	150	140
9.	CM-PVC10/1/1,4	4,5	6,3	155	160

Prvotna ideja je da se povećanjem količine PVC piljevine mora drastično povećati i količina aditiva te stoga u prvoj mješavini imamo 2% superplastifikatora i 0,8% stabilizatora. Započeli smo odmah s oba aditiva iz iskustvo dobivenih za prethodnu skupinu mješavina. Međutim, konzistencija rasprostiranjem je nezadovoljavajuća, uz nepravilno rasprostiranje i lošu obradivost, ali problem segregacije vode je znatno smanjen (Slika 34).



Slika 34. Prva probna mješavina – ispitivanje konzistencije

Na sljedećim mješavinama postepeno se povećavao postotak stabilizatora i uočeno je da se, uz to što se segregacija vode smanjuje, poboljšava kompaktnost smjese, odnosno da je bolja obradivost. Povećanjem stabilizatora, odvojena voda se skuplja i smjesa postaje vlažnija, bolje obradiva, ali rezultati promjera rasprostiranja nisu zadovoljavajući. Smatralo se da će povećanjem postotka superplastifikatora smjesa imati veću obradivost i veći promjer međutim s manjim postotkom superplastifikatora i većim postotkom stabilizatora dobivamo povoljnije rezultate. Male količine superplastifikatora uvelike poboljšavaju svojstva cementne mješavine, ali samo uz prisustva stabilizatora koji se dodaje u većem postotku. Spomenuta dva aditiva odlično djeluju, u kombinaciji, za poboljšanje svojstava svježeg morta dok zasebno bi imali suprotan učinak. Probnom mješavinom 6 stoga smanjujemo količinu superplastifikatora i dobivamo mnogo bolje rezultate. Nema izdvajanja cimente paste, ali smjesa nije dovoljno vlažna te time i obradivost nije najbolja. Nadalje, povećanjem količine superplastifikatora dobivamo optimalnu mješavinu (Tablica 17) u kojoj nema segregacije vode te je obradivost zadovoljavajuća (Slika 35). Iako su izmjereni promjeri manji od onih kod referentne mješavine, nalaze se unutar zahtijevanog raspona od 140 – 200 mm.

Tablica 17. Sastav cementne mješavine CM-PVC10

Komponenta		Masa	Korigirana masa	Gustoća	Volumen
	%	g	g	g/cm ³	cm ³
Cement		450,00	450,00	3,08	146,10
Voda		225,00	275,83	1,00	225,00
v/c		0,50			
Pijesak		1293,45	1242,62	2,65	488,10
PVC	10	56,55	56,55	1,11	50,94
Superplastifikator	0,80%	3,60	3,60	1,10	3,27
Stabilizator	1,40%	6,30	6,30	1,00	6,30
UKUPNO		2028,60	2028,60	8,94	919,72



Slika 35. Optimalna mješavina CM-PVC10 - ispitivanje konzistencije rasprostiranjem

Zadnjom probnom mješavinom uočeno je da malim pretjerivanjem sa količinom superplastifikatora dolazi ponovno do izdvajanja vode i mješavina nije zadovoljavajuća. Optimalna mješavina sastoji se od osnovnih materijala, kojima se količina ne mijenja, te 0,8 g superplastifikatora i 1,4 g stabilizatora što je povećanje od 100%, odnosno 250%, za 100% povećanja PVC piljevine.

Na kraju možemo zaključiti da se PVC piljevina, kao materijal koji nije porozan, teško može bez aditiva ukomponirati u mort odnosno beton. Zamjenom svega 12,23 g PVC piljevine uz korištenja osnovnih sastojaka (cement, pijesak, voda) bez aditiva dobiva se metodom ispitivanja konzistencije rasprostiranjem promjeri od prosječno 140 mm [14]. Nasuprot tome, za zamjenu od 56,6 g PVC piljevine s aditivima, uz osnovne sastojke cementnog morta, postižu se isti, ako ne i veći promjeri rasprostiranja.

4.5 Cementna mješavina s 5% PVC piljevine i 5% metakaolina

Ispitivanjima očvrsllog morta, o kojima će biti riječ u nastavku, utvrđeno je da PVC piljevina poboljšava duktilnost, ali zbog slabog trenja i ispunjenosti cementne paste između materijala PVC-a uočava se degradacija mehaničkih svojstava. Iz tog razloga, određeni postotak cementa zamjenjujemo s metakaolinom, točnije 5%. Samo izrađivanje mješavine nije zahtijevalo izvođenje probnih mješavina već se koristila receptura identična kao i za CM-PVC5 uz iznimku što se umjesto 450 g cementa koristilo 427,5 g cementa i 22,5 g metakaolina (Tablica 18).

Tablica 18. Sastav cementne mješavine CM-PVC5+M

Komponenta		Masa	Korigirana masa	Gustoća	Volumen
	%	g	g	g/cm ³	cm ³
Cement		427,50	427,50	3,08	138,80
Voda		225,00	276,94	1,00	225,00
v/c		0,50			
Pijesak		1321,73	1269,78	2,65	498,76
PVC	0,05	28,27	28,27	1,11	25,47
Superplastifikator	0,40%	1,80	1,80	1,10	1,64
Metakaolin	5% cementa	22,50		2,68	8,40
Stabilizator	0,004	1,80	1,80	1,00	1,80
UKUPNO		2026,80	2026,80	8,94	899,87

Metodom ispitivanja konzistencije rasprostiranjem na potresnom stoliću dobivena je gotovo jednaka konzistencija poput konzistencije dobivene za mješavinu CM-PVC5, pravilnog oblika, pri čemu dva okomita promjera iznose 180 i 190 mm (Slika 36). U nastavku teksta dobivena mješavina označavati će se s CM-PVC5+M.



Slika 36. Mješavina s dodatkom metakaolina - ispitivanje konzistencije rasprostiranjem

5. SVOJSTVA MORTA U SVJEŽEM STANJU

U ovom poglavlju opisana su ispitivanja konzistencije metodom rasprostiranja, gustoća i temperatura te udio pora za sve mješavine svježeg morta. Ispitivanja se provode u skladu s normama za mort za zide, odnosno seta normi HRN EN 1015.

Osnovno ispitivanje pomoću kojeg se preliminarno određuje uspješnost odabrane recepture te samim time i obradivost morta je konzistencija rasprostiranjem, prema normi HRN EN 1015-3 [24]. Ispitivanje se provodi pomoću stola za rasprostiranje, krnjeg konusnog kalupa visine od 60 mm te unutarnjeg promjera od 100 mm na dnu i 70 mm na vrhu, čelične šipke, lopatice i noža odnosno ravnjače, Slika 37.



Slika 37. Uređaj za ispitivanje konzistencije rasprostiranjem

Isprva se kalup namaže uljem radi lakšeg odstranjivanja mješavine. Kalup se postavlja na sredinu stola za rasprostiranje. Kalup se puni u dva sloja. Prvi sloj se puni do polovice visine kalupa te se šipkom normirane težine sabija mješavina s 10 udaraca vlastitom težinom šipke kako bi se osigurala podjednaka popunjenost. Zatim, kalup se prepuni i ponovi se proces

sabijanja čeličnom šipkom. Nadopunjuje se mješavina preko ruba kalupa i odstranjuje se višak pomoću ravnjače. Potrebno je obratiti pažnju da prazno područje stola za rasprostiranje bude čisto i suho. Nakon približno 15 sekundi kalup se pažljivo vertikalno podiže i pokreće se uređaj za rasprostiranje koji se namješta na 15 udaraca s otprilike 1 frekvencijom po sekundi. Te se nakon dovršetka procesa izmjeri promjer u dva okomita smjera i izrazi u milimetrima.

Zatim, nasipnu gustoću i temperaturu svježeg morta odrađujemo pomoću norme HRN EN 1015-6 [25]. Osnovno načelo određivanja gustoće temelji se na omjeru mase i volumena morta koji je ubačen ili ubačen i zbijen na propisan način u mjernu posudu zadanog volumena. Provodi se pomoću mjerne posude cilindričnog oblika s unutarnjim promjerom od 125 mm i volumena od otprilike 1l, ravnjače, lopatice i vibrostola. Postoje tri različite metode određivanja nasipne gustoće koje ovise o promjeru iz ispitivanja konzistencije rasprostiranjem prikazane u Tablici 19.

Tablica 19. Metoda određivanja nasipne gustoće svježeg morta

Vrsta morta s obzirom na obradivost	Vrijednost rasprostiranja [mm]	Metoda
Kruti mort	$< 140 \text{ mm}$	Metoda 1. - punjenje i zbijanje metodom vibriranja
Plastični mort	$140 \text{ mm} < d < 200 \text{ mm}$	Metoda 2. – punjenje i zbijanje „šok“ metodom
Mekani mort	$> 200 \text{ mm}$	Metoda 3. – metoda punjenjem

Osnovni cilj određivanja recepture morta u ispitivanju je da promjer kod referentnog ispitivanja konzistencije rasprostiranjem bude veći od 140 mm, kao što je prethodno spomenuto, stoga metoda 2. – punjenje i zbijanje „šok“ metodom je odgovarajuća metoda za ispitivanje (Slika 38). Metodu 2. započinjemo na način da se mjerna posuda ispuni mortom do polovice visine. Posuda se naginje na jednu stranu za 30 mm i otpušta, ukupno 10 puta, kako bi slobodno pala na krutu podlogu mase ne manje od 25 kg. Zatim se mjerna posuda nadopunjuje do gornjeg ruba

i ponavlja se identičan postupak zbijanja. Naposljetku, mort se dodaje dok ne nadvisuje gornji rub te se ravnjačom uklanja višak morta i obriše rub mjerne posude vlažnom krpom.



Slika 38. Ispitivanje nasipne gustoće svježeg morta

U slučaju da promjer bude veći od 200 mm koristi se metoda 3. – metoda punjenjem. Mjerna posuda se napuni mortom pomoću lopatice na način da se mort rasprostire od središta posude prema vanjskim stjenkama. Mort se dodaje dok se ne nadvisuje u odnosu na gornji rub posude te se poravna ravnjačom. Međutim, ukoliko se dobije mješavine male obradivosti, odnosno ako je promjer manji od 140 mm nasipna gustoća morta može se dobiti pomoću metode 1. odnosno punjenje i zbijanje metodom vibriranja. Mjerna posuda se prepuni mortom te se postavlja na vibrirajući stol i vibrira sve dok se primijeti prestanak dodatnog slijeganja. Tijekom vibriranja se ponovno dodaje mort na način da nadvisuje gornji rub. Ravnjačom se uklanja višak morta i poravnava ga se s gornjim rubom posude te se rubovi brišu s vlažnom krpom. Nakon jedne od triju opisanih metoda, odredi se ukupna masa (m_2) posude ispunjene mortom. Izračunavanje nasipne gustoće mješavine svježeg morta ρ_m određuje se putem sljedeće formule:

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v} \quad (10)$$

gdje je m_1 masa prazne posude (g), m_2 masa posude s mortom (g) i V_v volumen posude za mjerenje (l).

Konačna gustoća dobiva se pomoću srednje vrijednosti dvaju mjerenja, na najbližih 10 kg/m^3 , pod uvjetom da pojedinačne vrijednosti rezultata dvaju ispitivanja odstupaju od srednje vrijednosti za manje od 10%. U suprotnom, potrebno je ponoviti ispitivanje [25].

Posljednje provedeno ispitivanje je određivanje udjela pora u svježem mortu prema normi HRN EN 1015-7 [27]. Propisane su dvije metode pomoću kojih se dobiva udio pora u svježem mortu, tlačna i alkoholna metoda. Tlačna metoda primjenjiva je za mortove s udjelom pora manjim od 20%, dok je alkoholna metoda za udio pora veći od 20%. U daljnjim ispitivanjima koristiti će se alkoholna metoda, Slika 39, koja se provodi pomoću mjerne posude i tekućini sastavljenoj od 60% etilnog alkohola i 40% vode. Mjerna posuda se ispuni svježim mortom do otprilike 200 ml te se očita točna vrijednost morta u posudi (V_{ml}), u slučaju da količina morta nije točno 200 ml. Prije spomenuta tekućina dodaje se u mjernu posudu dok se ne dostigne vrijednost od 500 ml. Zatim, posuda se zatvori gumenim poklopcem i okreće se 20 puta. Dobivena mješavina se taloži u vremenu od 5 minuta.



Slika 39. Ispitivanje udjela pora svježeg morta prije (lijevo) i nakon (desno) taloženja

Nakon taloženja očita se razina mješavine (V_{mf}). Udio pora svježeg morta se izračunava preko formule:

$$L = \frac{(500 - V_{mf})}{V_{ml}} \quad (11)$$

gdje je L udio pora (%), V_{mf} razina mješavine nakon taloženja (ml) i V_{ml} razina morta (ml) te se rezultat očitava na najbližih 0,1%. [26]

5.1 Konzistencija rasprostiranjem

Nakon izrade svake cementne mješavine, a netom prije popunjavanja kalupa, provodi se ispitivanje konzistencije rasprostiranjem. Ukupno su provedena tri mjerenja za svaku mješavinu, izuzevši mješavinu s dodatkom metakaolina iz razloga što smo nju naknadno izvodili. Jedno ispitivanje je izvršeno za mješavinu korištenu za izradu uzoraka koji se ispituju nakon 7 dana, a preostale dvije mješavine korištene su za izradu uzoraka koji se ispituju nakon 28 dana. Za uzorke koji se ispituju nakon 28 dana bila je potrebna veća količina morta te se stoga miješanje izvodilo dva puta zbog malog volumena miješalice kao i ispitivanje konzistencije rasprostiranjem na potresnom stoliću. Rezultati su prikazani u Tablici 20 te je izračunata srednja vrijednost svih rezultata po mješavini.

Tablica 20. Rezultati ispitivanja konzistencije metodom rasprostiranja

Naziv mješavine	1. ispitivanje		2. ispitivanje		3. ispitivanje		Srednja vrijednost promjera rasprostiranja mm
	r_1 mm	r_2 mm	r_1 mm	r_2 mm	r_1 mm	r_2 mm	
1. CM-REF	186	190	190	190	190	197	190,50
2. CM-PVC5	180	180	193	193	185	187	186,33
3. CM-PVC5+M	182	185	186	190	/	/	185,75
4. CM-PVC10	144	150	150	155	152	157	151,33

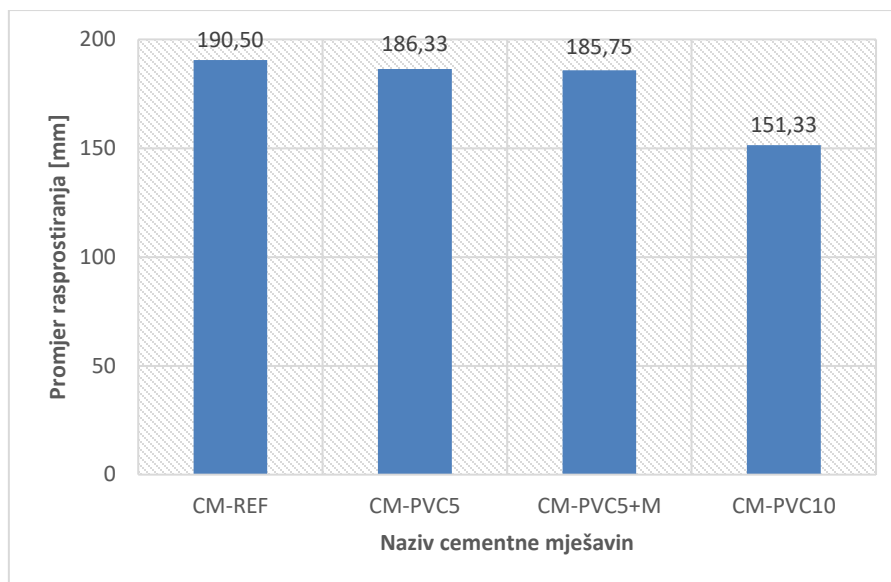
r_1, r_2 – izmjerene vrijednosti dva okomita promjera rasprostiranja

Usporedimo li dobivene rezultate uočavamo kako cementna mješavina s zamjenom od 5% PVC-a s pijeskom gotovo da ima iste vrijednosti poput cementne mješavine s metakaolinom, razlika promjera je gotovo pa i neznatna jer se radi o manje od 1 mm. Dakle, PVC piljevina dobro djeluje i s metakaolinom kao i s cementom. Razlika ovih dviju mješavina u odnosu na referentnu mješavinu je vrlo malena uzmemo li u obzir da se radi o nešto manje od 5 mm i da očitavanje dimenzija dosta ovisi o ispitaniku. Ovaj podatak je vrlo pozitivan jer govori da dodatkom PVC piljevine, uz dodatak aditiva, nema negativan učinak na svojstva svježeg morta, konzistenciju. Dok je kod morta s 10% PVC-a značajnije smanjenje promjera, gledajući srednju vrijednost i do 40 mm (Slika 40), ali naposljetku ulazi u granice koje su određene Tablicom 20.



Slika 40. Usporedba konzistencije rasprostiranjem mješavine CM-PVC5 (lijevo) i CM-PVC10 (desno)

Na temelju Slike 41 možemo zaključiti da se povećanjem udjela PVC piljevine obradivost svježeg morta smanjuje te da metakolin u kombinaciji s PVC piljevinom nema negativan utjecaj na obradivost svježeg morta.



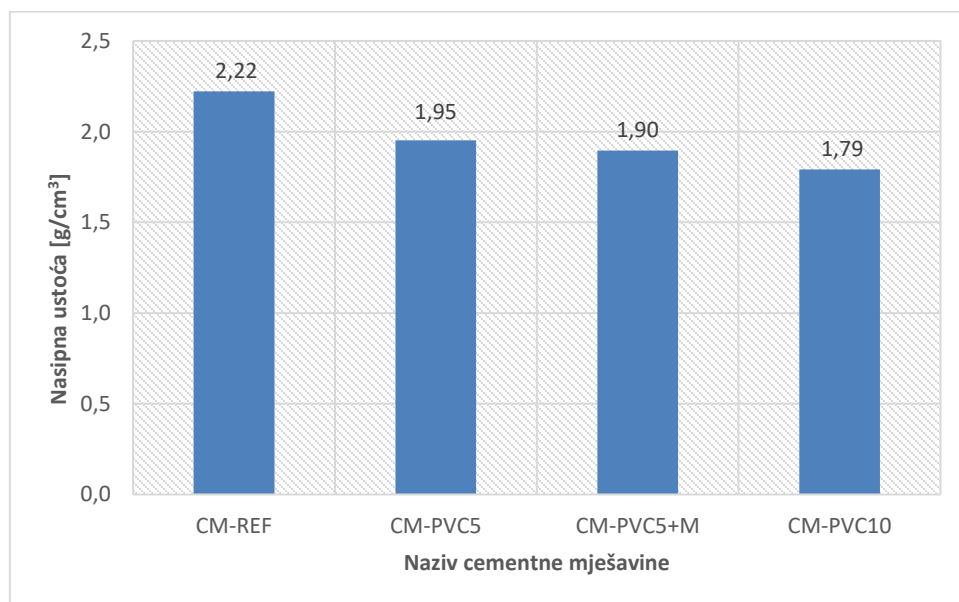
Slika 41. Usporedba prosječnih rezultata ispitivanja konzistencije rasprostiranjem za pojedinu mješavinu morta

5.2 Nasipna gustoća

Nasipna gustoća određuje se pomoću postupka, odnosno formule (10), koji je prethodno opisan. U tablici 21 prikazane su mase morta, s time da je posuda prije vaganja tarirana te nije bilo potrebno određivati masu posude sa i bez morta i iste oduzimati. Razlog da su u Tablici 21 navedena dva volumena je što kod izrade uzoraka za ispitivanje nakon 7 dana starosti nije bilo volumenski dovoljno morta za popuniti posudu od 1l pa se koristila posuda manjeg volumena, ali je postupak ispitivanja podjednak i rezultati pojedinačnih ispitivanje ne odstupaju više od 10% od srednje vrijednosti. Rezultati svih mješavina su očekivani, odnosno povećanjem količine PVC piljevine smanjuje se i masa morta zbog male vlastite težine i velikog volumena PVC-a. Smanjenje mase morta uzrokuje i smanjenje gustoće što je grafički prikazano na dijagramu (Slika 42).

Tablica 21. Rezultati ispitivanja svježeg morta - nasipna gustoća

Naziv mješavine		m_1	V_1	m_2	m_3	V	Gustoća - srednja vrijednost
		[g]	[cm ³]	[g]	[g]	[cm ³]	[g/cm ³]
1.	CM-REF	2016,9	870,7	2158,3	2192,4	1000	2,22
2.	CM-PVC5	1747,1	870,7	1945,3	1904,9	1000	1,95
3.	CM-PVC5+M	/	/	1925	1866	1000	1,90
4.	CM-PVC10	1600,9	870,7	1784,4	1754,2	1000	1,79



Slika 42. Usporedba rezultata ispitivanja nasipne gustoće pojedine mješavine morta

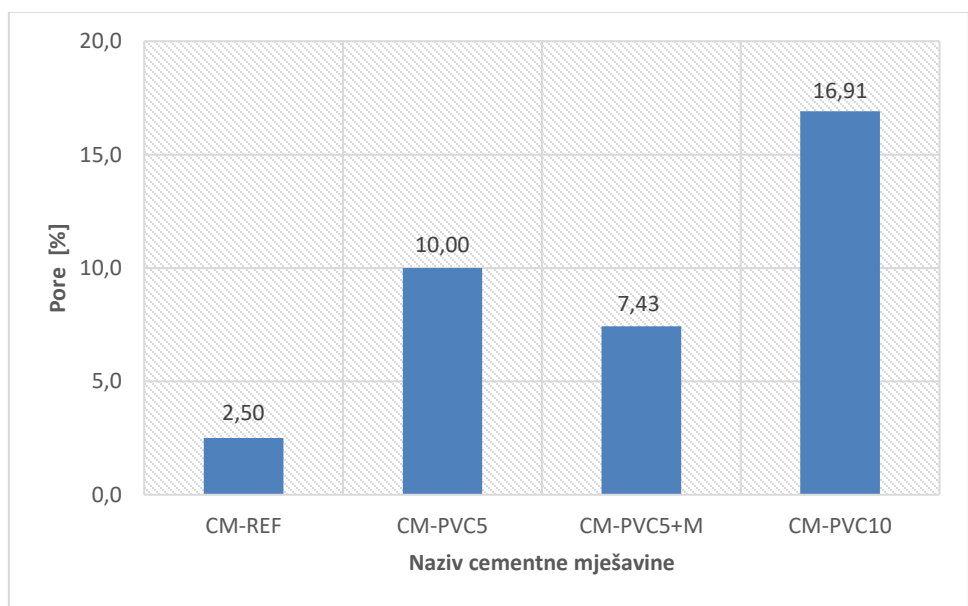
5.3 Udio pora i temperatura

Udio pora dobiven je alkoholnom metodom već opisanim postupkom. Proračunavanjem udjela pora dobivaju se smisleni rezultati, odnosno povećanjem udjela PVC piljevine povećava se i udio pora zbog karakteristika dodanog materijala. Ispitivanje zahtjeva iznimnu preciznost i strpljenje kako se višak morta ne bi zalijepio za stjenke posude, ali i kod očitavanja jer zahtjeva iznimnu preciznost te promjene između dva očitavanja su iznimno male. Odnos pora po pojedinim mješavinama prikazani su u Tablici 22 uz očitane volumene i temperaturu. Nadalje, grafički su uspoređene dobiveni postoci po pojedinim mješavinama i prikazani na Slici 43.

Temperatura uvelike ovisi o sobnoj temperaturi na kojoj se nalaze materijali i na kojoj se izvodi proces miješanja, ali i vrijeme kada se očitava mješavina nakon dovršetka izrade. Prikazane su temperature za pojedinu mješavinu, ali s obzirom da nisu izrađene u isto vrijeme i s istim izvorom materijala teško je dobivene rezultate i uspoređivati. Na temelju Slike 43 možemo zaključiti da se povećanjem udjela PVC piljevine povećava udio pora u svježem mortu za približno 300 % za mješavinu s 5% PVC-a i čak 576 % za mješavinu s 10% PVC-a u odnosu na referentnu mješavinu. Nasuprot tome, metakolin u kombinaciji s PVC piljevinom ima pozitivan utjecaj na smanjenje udjela pora svježeg morta, odnosno povećanje udjela pora u odnosu na referentnu mješavinu iznosilo je 197% .

Tablica 22. Rezultati ispitivanja svježeg morta - udio pora i temperatura

Naziv mješavine		Svježeg morta	Svježi mort + alkohol	Udio pora	Temperatura
		V _{ml} [ml]	V _{mf} [ml]	L [%]	[°C]
1.	CM-REF	200	495	2,50	25,40
2.	CM-PVC5	200	480	10,00	26,10
3.	CM-PVC5+M	202	485	7,43	26,90
4.	CM-PVC10	207	465	16,91	27,90



Slika 43. Usporedba rezultata ispitivanja udjela pora pojedine mješavine morta

6. ISPITIVANJE OČVRSLOG CEMENTNOG MORTA

Ispitivanja su provedena u Laboratoriju za materijale Građevinskog fakulteta u Rijeci. Mehanička svojstva morta- tlačna čvrstoća i vlačna čvrstoća savijanjem, ispitana su u skladu s u skladu s normom za mort EN 196-1 nakon 7 i 28 dana starosti betona. Ispitivanja su provedena na hidrauličkim prešama s mjernim dozama od 15 kN i 600 kN, proizvođača Controls, prikazanim na Slici 44.



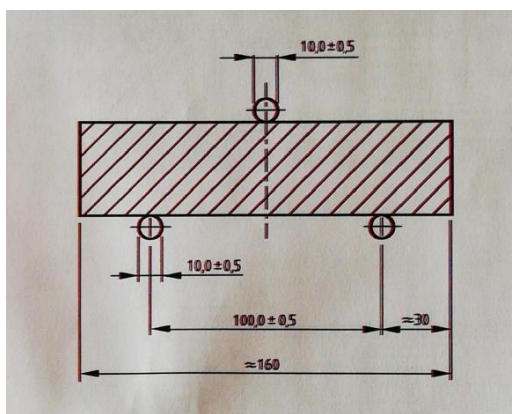
Slika 44. Uređaji za ispitivanje čvrstoće na savijanje (lijevo) i tlačne čvrstoće (desno)

Trajnosna svojstva betona ispitana su za uzorke betona starosti 28 dana. Ispitano je kapilarno upijanje svake mješavine morta prema normi za mort EN 1015-18 [28] te habanje na Böhme uređaju u skladu s normom EN 13892-3[29] na uzorcima oblika kocke brida 71 mm. Osim navedenog, na uzorcima približno 20 dana starosti provedeno je i snimanje elektronskim

mikroskopom kako bi se proučila struktura i povezanost PVC piljevine s mortom, odnosno kompaktnost samog uzorka s obzirom da se u beton dodaje nepoznati materijal.

6.1 Postupak ispitivanja uzoraka očvrstlog morta

Čvrstoća morta na savijanje određuje se opterećenjem na tri točke očvrstlog uzorka prizme morta do sloma. Uzorak se postavlja u uređaj na način da se gornji valjak nalazi na sredini prizme, 80 mm od ruba, te da su donja dva valjka odmaknuti jedan od drugog za 100 mm, odnosno valjci su 30 mm od ruba prizme. Strana prizme koja je izložena pritisku ne smije biti strana lijevanja mješavine u kalup. Uređaj za određivanje čvrstoće na savijanje mora biti sposoban primijeniti opterećenje do 10 kN s točnošću od $\pm 1\%$ zabilježenog opterećenja u gornjim četiri petinama korištenog raspona pri upotrebi brzine opterećenja 50 ± 10 N/s. Osim toga, uređaj mora imati pokretne zglobove, odnosno dva čelična potporna valjka promjera $10 \pm 0,5$ mm međusobno razmaknuta $100 \pm 0,5$ mm i treći valjak istog promjera koji je postavljen u središte između dva spomenuta preko kojeg se prenosi opterećenje. Točan raspored valjaka i dimenzije prikazane su na Slici 45. Jedan od podupirućih, donjih valjaka i valjak preko kojeg se prenosi opterećenje moraju biti u mogućnosti da se blago naginju kako bi omogućili jednoliku raspodjelu opterećenja po širini uzorka bez podvrgavanja uzorka ikakvoj torziji.



Slika 45. Shema ispitivanja očvrstlog morta savijanjem na sredini raspona uzorka [17]

Nakon provedenog ispitivanja, zabilježi se maksimalno primijenjeno opterećenje, u N. Otpornost na savijanje, F_f , u N/mm^2 se zatim izračunava pomoću sljedeće jednadžbe:

$$F_f = \frac{1,5 * F_f * l}{b^3} \quad (12)$$

gdje je b širina uzorka (mm), l razmak između donjih oslonaca uređaja (100 mm) te F_f granična sila sloma (N). Prema normi, čvrstoća na savijanje svakog uzorka se zabilježi do najbližih 0,05 N/mm^2 , a zatim se određuje srednja vrijednost do najbližih 0,1 N/mm^2 . Važan podatak jest starost uzorka i starost pri vađenju iz kalupa koju je potrebno zabilježiti i uzeti u obzir [17].

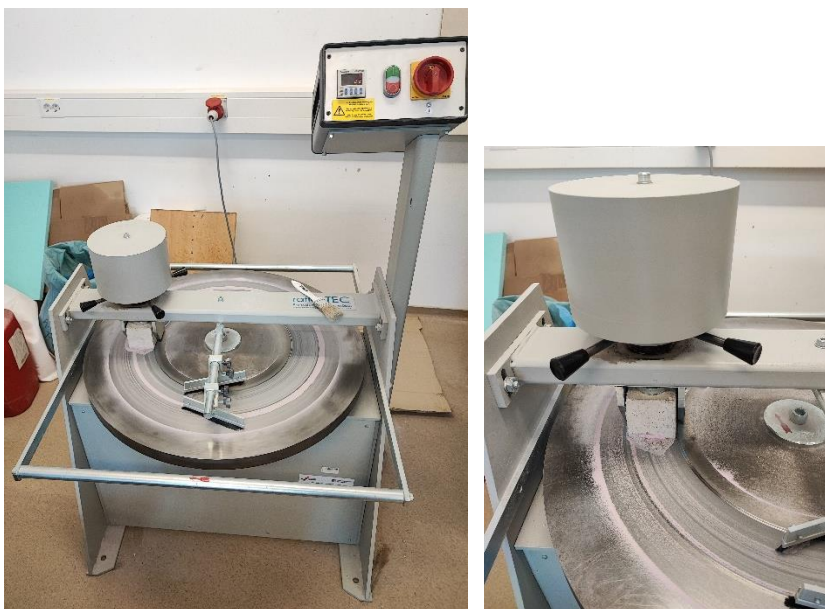
Tlačna čvrstoća određuje se pomoću dva dobivena uzorka nakon ispitivanja čvrstoće na savijanje. Uzorak se postavlja u uređaj za ispitivanje, ponovno pazeći da ploha na kojoj se provodi ispitivanje ne bude ona s koje se mort lijevao u kalup. Uređaj za ispitivanje mora imati točnost od ± 1 % zabilježenog opterećenja u gornjim četiri petinama korištenog raspona. Treba omogućiti povećanja opterećenja do 2400 ± 200 N/s. Mora biti opremljena s uređajem za očitavanje koji očitava vrijednost prilikom nastanka sloma uzorka, ali i neposredno nakon kada je uređaj za ispitivanje neopterećen. Ponovno se očitava maksimalno primijenjeno opterećenje, u N, prilikom ispitivanja. Tlačna čvrstoća se određuje na način da se najveće moguće opterećenje koji može prihvatiti uzorak podijeljen s površinom njegovog poprečnog presjeka.

$$R_c = \frac{F_c}{1600} \quad (13)$$

Gdje je R_c tlačna čvrstoća (MPa), F_c granična vrijednost sile prije sloma (N) i 1600 predstavlja površinu na kojoj djeluje sila F_c (mm^2) (40x40 mm). Ponovno se bilježi čvrstoća svakog uzorka i srednja vrijednost kako je već i opisano [17].

Za određivanje otpornosti na habanje (Bohme) morta potrebni je 3 uzoraka morta, kvarcni pijesak, masa uzorka, uređaj za određivanje abrazije prema Bohme metodi (Slika 46.) te poznata gustoća materijala uzorka. Uzorak je potrebno prije ispitivanja izvagati. Kvarcni pijesak se raspodijeli po kružnom pojasu, 20 grama, koji će prolaziti ispod uzorka. Ispitivanje jednog

uzorka smatra se gotovim nakon 16 ciklusa od 22 okreta. Prema normi jedan ciklus predstavlja 22 puna okreta sa svježim nanosom habajućeg materijala. Prije svakog novog ciklusa uzorak se uklanja iz instrumenta, uklanja sav pijesak i nanese novi sloj. Zatim se uzorak ponovno vraća tako da je uvijek ista strana kocke izložena habanju, ali se zarotira za 90 stupnjeva.



Slika 46. Uređaj za ispitivanje otpornosti na habanje

Nakon svaka 4 ciklusa mjeri se masa uzorka čime dobivamo podatak o brzini trošenja materija. Ispitivanje za jedan od uzoraka je dovršeno kada je isti bio izložen svim potrebnim ciklusima, odnosno 4 priprema i 16 normiranih i naposljetku se uzorak ponovno važe. Otpornost na habanje određuje se pomoću sljedeće formule izražene u cm^3 po 50 cm^2 [18].

$$A = \Delta V = \frac{\Delta m}{\rho_r} = \Delta l * 5 \quad (14)$$

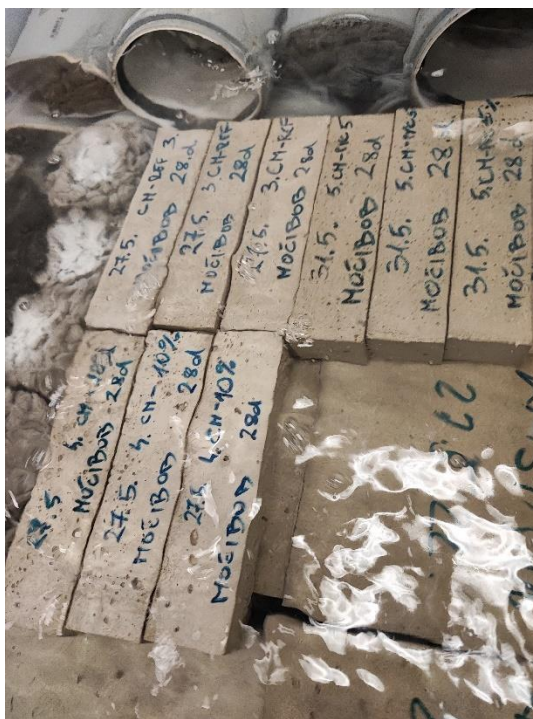
Gdje je A otpornost na habanje (cm^3), ΔV promjena volumena (cm^3), Δm promjena mase nakon ispitivanja (g), ρ_r gustoća ispitanog uzorka te Δl promjena duljine (cm).

Nakon ispitivanja na habanje slijedi ispitivanje vodoupojnosti koje zahtjeva da uzorci budu potpuno suhi, odnosno suše se u sušioniku na $50 \text{ }^\circ\text{C}$ do stalne mase. Uzorak je spreman za korištenje kada između dva uzastopna vaganja u rasponu od 24 sata variraju mase manje od

0,2% od ukupne mase. Odabire se ploha koja se uranja u vodi (bilo koja osim one koja je smjer ugradnje) te se preostale 4 susjedne plohe oblažu silikonom kako bi vodu upijali samo površinski. Zatim se izmjere dimenzije plohe koja se uranja i masa te se ona uranja u približno 5-10 mm vode. Uzorak se uranja na oslonce na način da imamo što manju kontaktnu površinu, odnosno da je ploha uzorka što više izložena vodi. Uzorcima se određuje masa prije izlaganja vodi. Nakon određenih intervala uranjana uzorka u vodu, on se izvadi i posuši te mu se izmjeri masa. Razlika između prvog i zadnjeg mjerenja određuje ukupnu količinu vode koju je uzorak upio a dijeljenjem količine upijene vode s upojnom površinom dobivamo kapilarnu vodoupojnost.

6.2 Fizikalna svojstva uzoraka očvrslog morta

Neposredno prije provedbe ispitivanja, prizme su izvađene iz vode u kojoj su njegovane (Slika 47), i odstranjena im je površinska voda.



Slika 47. Njegovanje uzoraka u vodi

Za potrebe daljnjih ispitivanja uzorci su izvagani i izmjerene su im dimenzije. U Tablici 23 i 24 prikazani su dobiveni podatci po pojedinim cementnim mješavinama za 7 i 28 dana starosti.

Tablica 23. Dimenzije, masa i gustoća uzoraka nakon 7 dana negovanja

7 dana	Svojstva očvrslog morta		
	dimenzije	masa	gustoća
Uzorak:	[mm]	[g]	[g/cm ³]
1. CM - REF/1	160,1*40*40,6	568,3	2,19
2. CM - REF/2	160*40,3*40	563,5	2,18
3. CM - REF/3	160,2*40,15*41,4	575,9	2,16
1. CM - PVC 5/1	159,86*39,93*39,94	520,9	2,05
2. CM - PVC 5/2	159,94*39,46*39,9	526,8	2,09
3. CM - PVC 5/3	160,01*39,89*40,0	527,9	2,07
1. CM - PVC 5/1 + M	160*40,6*39,9	531,4	2,05
2. CM - PVC 5/2 + M	159,8*39,5*39,5	519,4	2,08
3. CM - PVC 5/3 + M	160*40*40,5	526,9	2,03
1. CM - PVC 10/1	160,1*39,9*39,93	500,3	1,96
2. CM - PVC 10/2	160,2*40,4*40	504,9	1,95
3. CM - PVC 10/3	160,05*41,1*39,9	502,1	1,91

Dobiveni rezultati masa, odnosno gustoća su u skladu s očekivanima. Povećanjem postotka PVC piljevine u mješavini morta smanjuje se gustoću uzorka zbog fizikalnih svojstava PVC-a. Stoga, najveću gustoću ima referentni uzorak, a najmanju uzorak s zamjenom pijeska s 10% PVC piljevine dok uzorci s 5% zamjene sa i bez metakaolina imaju gotovo jednaku gustoću. Razlika gustoća mješavine sa i bez metakaolina povećavala se s povećanjem starosti cementnih prizmi što je vidljivo u Tablici 24.

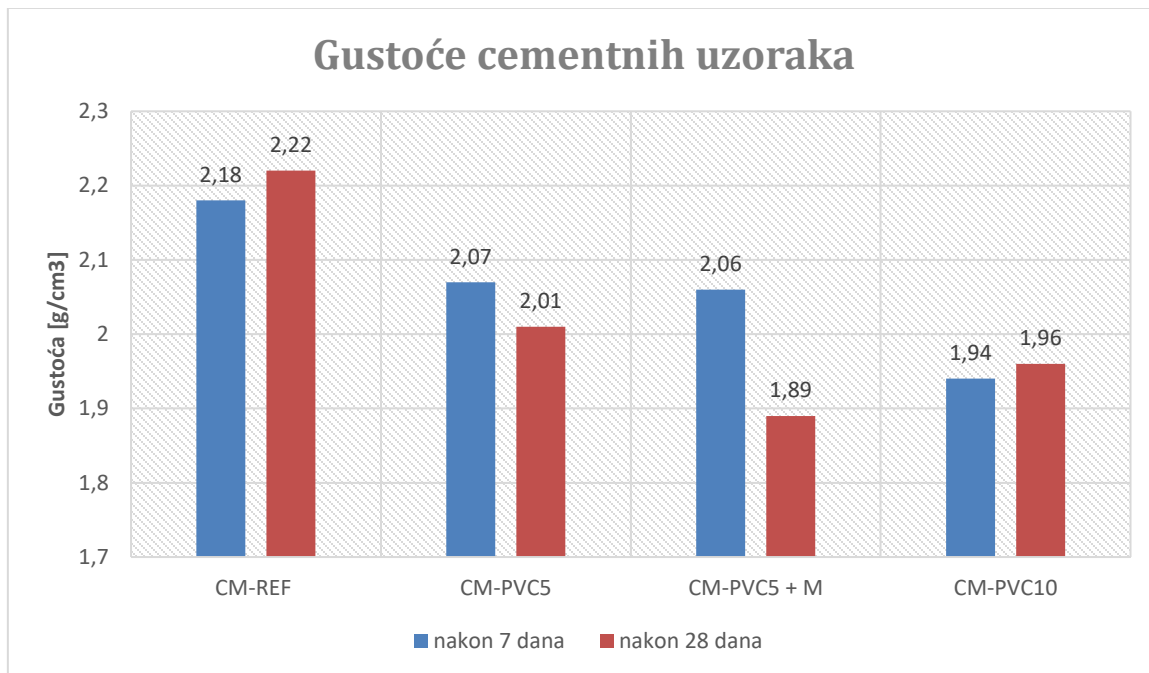
Tablica 24. Dimenzije, mase i gustoća uzoraka nakon 28 dana njegovanja

28 dana	Svojstva očvrslog morta		
	dimenzije	masa	gustoća
Uzorak:	[mm]	[g]	[g/cm ³]
1. CM - REF/1	160,5*40*39,5	571,4	2,25
2. CM - REF/2	160,1*40*40,2	571,5	2,22
3. CM - REF/3	161,1*41,1*40,5	585,7	2,18
1. CM - PVC 5/1	160,9*39,9*40	518,1	2,02
2. CM - PVC 5/2	160,3*39,9*40,1	518,3	2,02
3. CM - PVC 5/3	160,6*40,5*39,9	514,2	1,98
1. CM - PVC 5/1 + M	159,6*40,3*39,9	484,7	1,89
2. CM - PVC 5/2 + M	159,7*40*40,4	488,1	1,89
3. CM - PVC 5/3 + M	159,7*39,7*40,6	485,5	1,89
1. CM - PVC 10/1	160,5*39,1*39,7	499,8	2,01
2. CM - PVC 10/2	160,4*39,9*40	488,5	1,91
3. CM - PVC 10/3	160,1*39,2*39,9	495,4	1,98

Uzorak morta kod CM-REF i CM-PVC10 starosti 28 dana ima gotovo podjednaku gustoću kao i kod starosti 7 dana s tendencijom povećanja gustoće, Tablica 25. Međutim, mješavine morta CM-PVC5, a pogotovo CM-PVC5 + M, imaju manju gustoću s porastom starosti morta. Smanjenje gustoće je izraženije kod mješavine CM-PVC5 + M do te mjere da je gustoća uzoraka manja i od gustoće mješavine CM-PVC10. Usporedba srednjih vrijednosti gustoća za sve mješavine prikazana je na Slici 48, gdje je jasno vidljivo da mješavina CM-PVC5 + M ima najmanju gustoću što upućuje na utjecaj metakaolina.

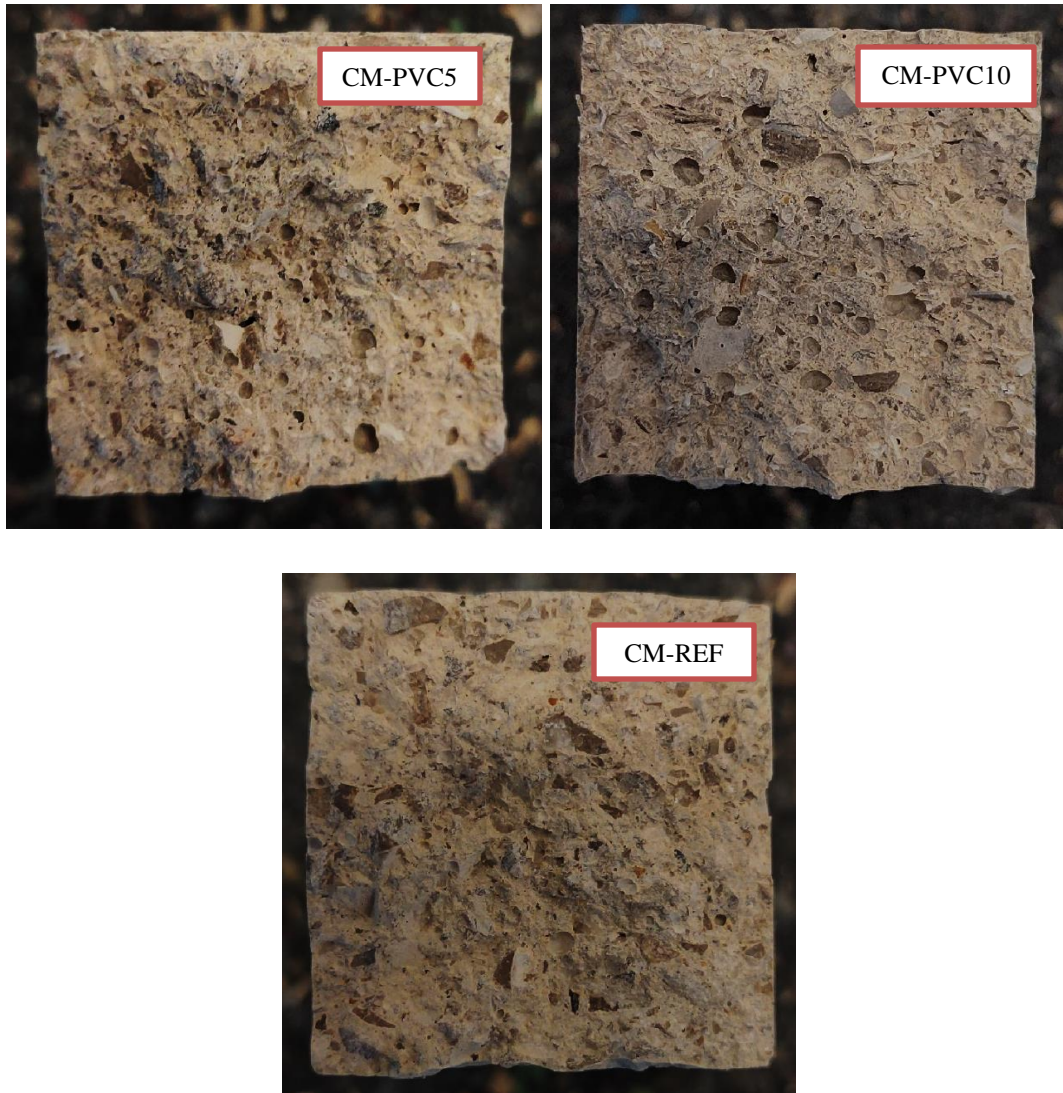
Tablica 25. Usporedba gustoće cementnih mješavina nakon 7 i 28 dana

Cementne mješavine	gustoća [g/cm³]	
	nakon 7 dana	nakon 28 dana
CM-REF	2,18	2,22
CM-PVC5	2,07	2,01
CM-PVC5 + M	2,06	1,89
CM-PVC10	1,94	1,96



Slika 48. Usporedba gustoća cementnih uzoraka

Usporedimo li presjek prizme očvrsllog morta svih izrađenih uzoraka primjećuje se da povećanjem postotka PVC piljevine povećava se i udio šupljina, odnosno smanjuje gustoća. Na Slici 49 prikazani su uzorci CM-PVC5 i CM-PVC10 te CM-REF. Povećanje udjela šupljina utječe na tlačnu čvrstoću očvrsllog uzorka. Smanjenjem gustoće uzorka smanjuje se i tlačna čvrstoća. Iznimka je uzorak s metakaolinom u starosti od 28 dana (utjecaj metakaolina dolazi do izražaja tek pri većoj starosti uzorka) koji ima najmanju gustoću dok je tlačna čvrstoća puno veća od čvrstoće dobivene kod referentnog uzorka. Prilikom ispitivanja tlačne čvrstoće slom uzorka pojedinih mješavina je različit. Slika 50 prikazuje izgled uzorka nakon ispitivanja. Tokom ispitivanja referentne mješavine uočen je vrlo krhki slom dok je kod uzorka CM-PVC5 linija sloma vidljiva ali uzorak ostaje u jednom komadu. Nasuprot tome, uzorak CM-PVC10 gotovo da i nema vizualne naznake da je provedeno ispitivanje tlačne čvrstoće.



Slika 49. Presjek prizmi očvrstlog morta



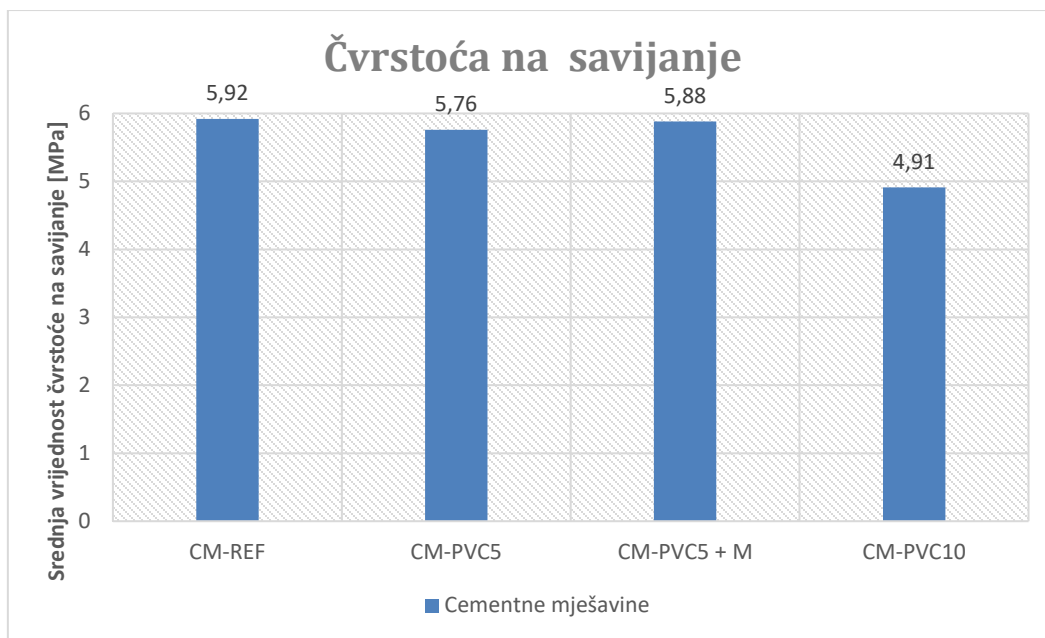
Slika 50. Prikaz uzoraka nakon ispitivanja tlačne čvrstoće (i čvrstoće na savijanje)

6.3 Čvrstoća na savijanje na uzorcima starosti 7 dana

Za svaki uzorak od prethodno spomenute 4 vrste mješavina provedena su tri ispitivanja (tri prizme po svakoj mješavini) i time su dobivene tri sile sloma. Pomoću formule (12) i aritmetičke sredine dobivena je naposljetku konačna čvrstoća savijanja za pojedinu mješavinu. U Tablici 26 prikazani su rezultati čvrstoće na savijanje za svaki pojedini ispitani cementni uzorak te srednja vrijednost tri ispitana uzorak. Usporedba srednjih vrijednosti vlačne čvrstoće po mješavini prikazana je grafički na Slici 51.

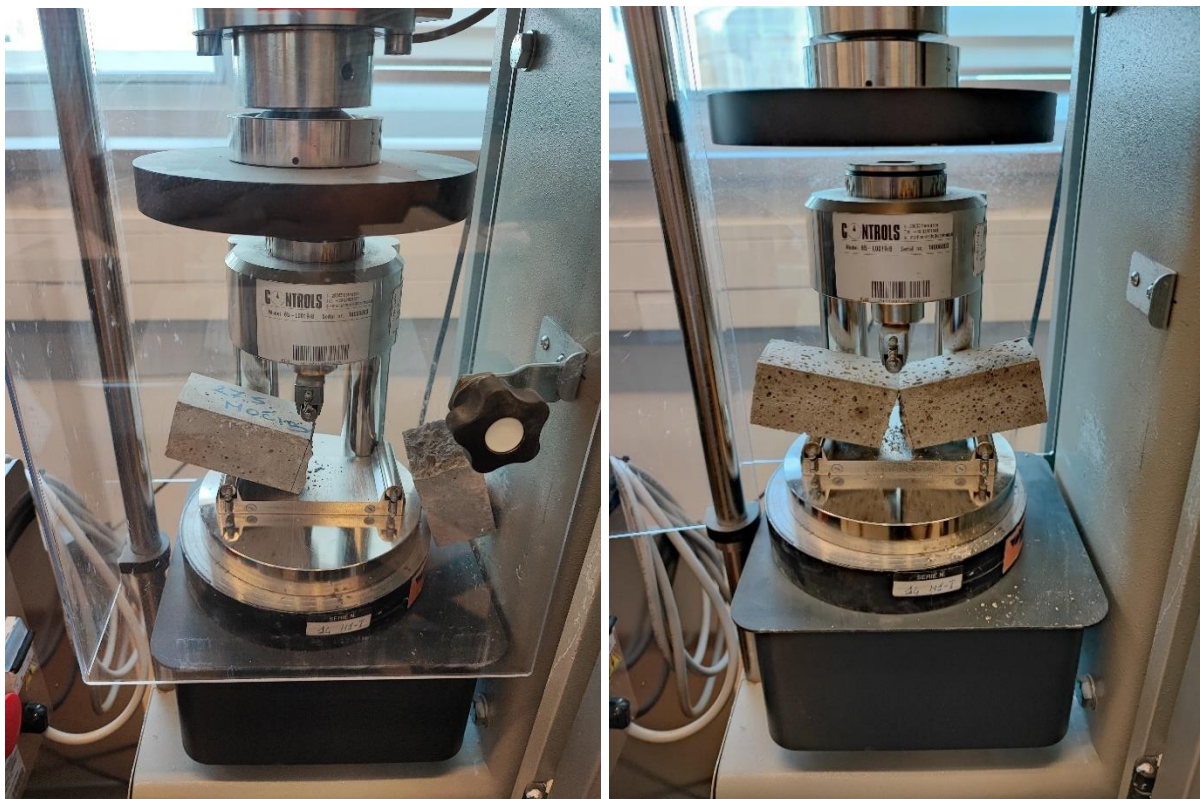
Tablica 26. Čvrstoća na savijanje za uzorke starosti 7 dana

7 dana	Čvrstoća na savijanje		
	silna sloma	pojedini rezultat ispitnog uzorka	srednja vrijednost
Uzorak:	[N]	[MPa]	[MPa]
1. CM - REF/1	2530	5,93	5,92
2. CM - REF/2	2403	5,63	
3. CM - REF/3	2650	6,21	
1. CM - PVC 5/1	2445	5,73	5,76
2. CM - PVC 5/2	2490	5,84	
3. CM - PVC 5/3	2439	5,72	
1. CM - PVC 5/1 + M	2571	6,03	5,88
2. CM - PVC 5/2 + M	2450	5,74	
3. CM - PVC 5/3 + M	2506	5,87	
1. CM - PVC 10/1	2123	4,98	4,91
2. CM - PVC 10/2	2138	5,01	
3. CM - PVC 10/3	2024	4,74	



Slika 51. Čvrstoća na savijanje uzoraka starosti 7 dana

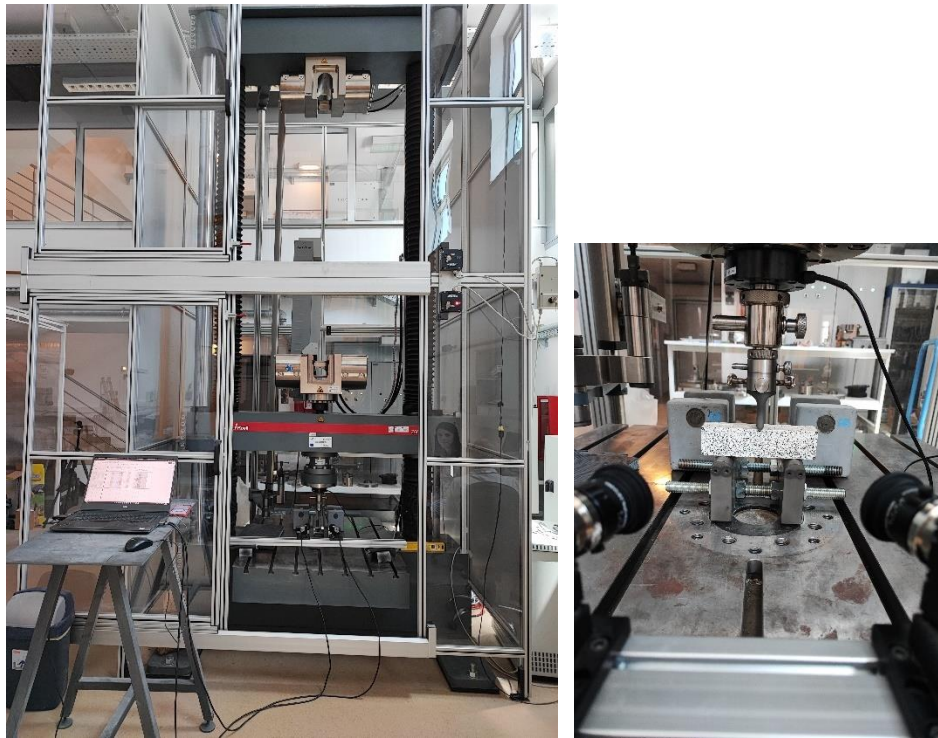
Na temelju dobivenih rezultata ispitivanja uočava se pad čvrstoće kod cementnih prizmi s 10% zamjene, CM-PVC10, u odnosu na referentnu mješavinu za 17,1%. Cementne prizme s 5% zamjene pokazuju gotovo jednake vrijednosti kao i referentna mješavina, uz neznatan pad čvrstoće, za samo 2,7%. Cementni uzorci mješavine CM-PVC5 imaju veću čvrstoću na savijanje u odnosu na CM-PVC10. Uočeno je da metakaolin pozitivno utječe na povećanje čvrstoće mješavine. Nadalje, na Slici 52 prikazan je slom uzoraka bez i s dodatkom PVC piljevine. Kod uzoraka s PVC piljevinom vizualno se može uočiti povećana duktilnost odnosno smanjenje krтости plohe sloma što je izrazito važna karakteristika betona koja će se u danjim ispitivanjima i analizirati.



Slika 52. Usporedba sloma mješavina bez (lijevo) i sa PVC piljevinom (desno)

6.3 Čvrstoća na savijanje na uzorcima starosti 28 dana

Prilikom izrade ispitivanja na uzorcima starim 7 dana uočeno je da se povećanjem postotka zamjene PVC piljevine, odnosno kod uzorka CM-PVC10, povećava i duktilnost uzorka. Međutim, duktilnost nije moguće usporediti ispitivanjem uzoraka metodom kontrole sile. Stoga, ispitivanja čvrstoće na savijanje za uzorke starosti 28 dana provedena su pomoću metode kontrole pomaka pomoću kidalice i programskog paketa GOM Correlate (Slika 53.). Rezultati ispitivanja, odnosno dijagram sila - pomak, jasno prikazuju pomake i nakon što uzorak postigne slom te se time može uspoređivati duktilnost pojedinih uzoraka. Dijagram se dobiva spajanjem i prilagođavanjem podataka sile dobivene iz kidalice i pomaka dobivenim grafičkim snimanjem pomoću programa GOM. Dodatan rad u programu GOM bio je potreban jer podacima dobivenih iz kidalice prikazuju pomak uređaja, što nije realan pomak poput onog na samom uzorku.



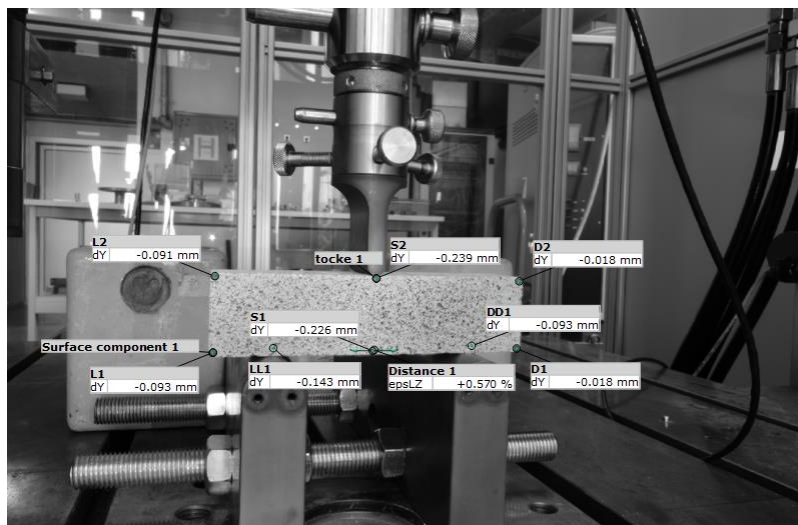
Slika 53. Kidalica s kamerama povezanim na programski paket GOM Correlate

Pomoću programa označavaju se točke na snimljenom uzorku koje se žele promatrati. Primjer pripremljenog uzoraka za ispitivanje pomoću GOM sustava dan je na Slici 54. Na pozicijama označenim s crnim točkicama bilježe se vodoravni pomaci točaka tokom ispitivanja savijanjem. Na taj način se u svakom vremenskom trenutku mogu promatrati pomaci uzorka u odnosu na početni, nulti pomak ,kad na uzorak ne djeluje nikakvo opterećenje.



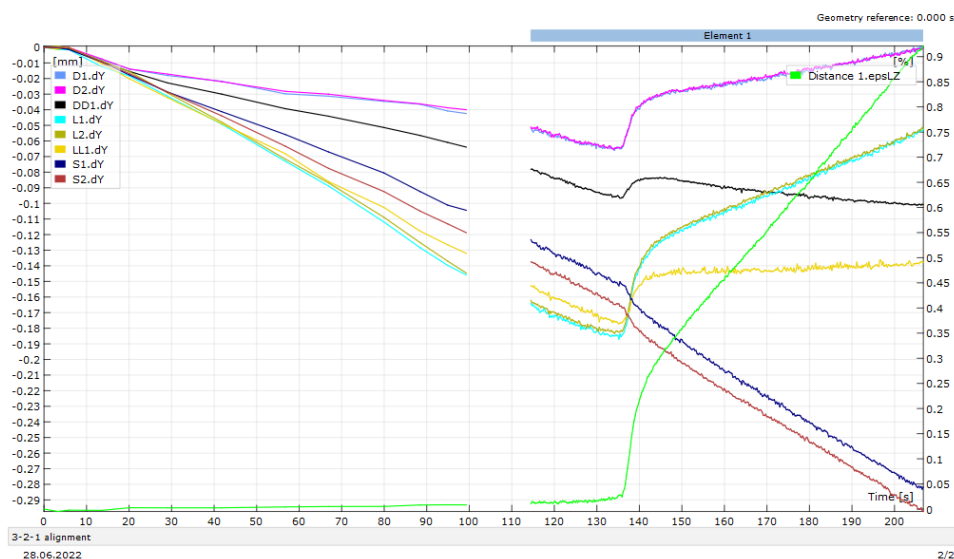
Slika 54. Uzorak spreman za ispitivanje s kidalicom i programom GOM Correlate

Slika 55 prikazuje izrađeni model u kojem su označene željene točke te kako se u bilo kojem vremenskom trenutku koji je sniman mogu vidjeti pomaci s obzirom na povećanje opterećenja na kidalici.



Slika 55, Model u programu GOM Correlate

Dobiveni rezultati, direktno iz programa GOM, prikazuju pomake pojedinih točaka u određeno vrijeme, Slika 56. Točke koje su prikazane u dijagramu jednake su točkama koje su označene na modelu programa. Najznačajnije točke, za provedbu ispitivanja, su točke S1 i S2 na sredini raspona uzorka.



Slika 56. Pomaci pojedinih točaka u vremenu

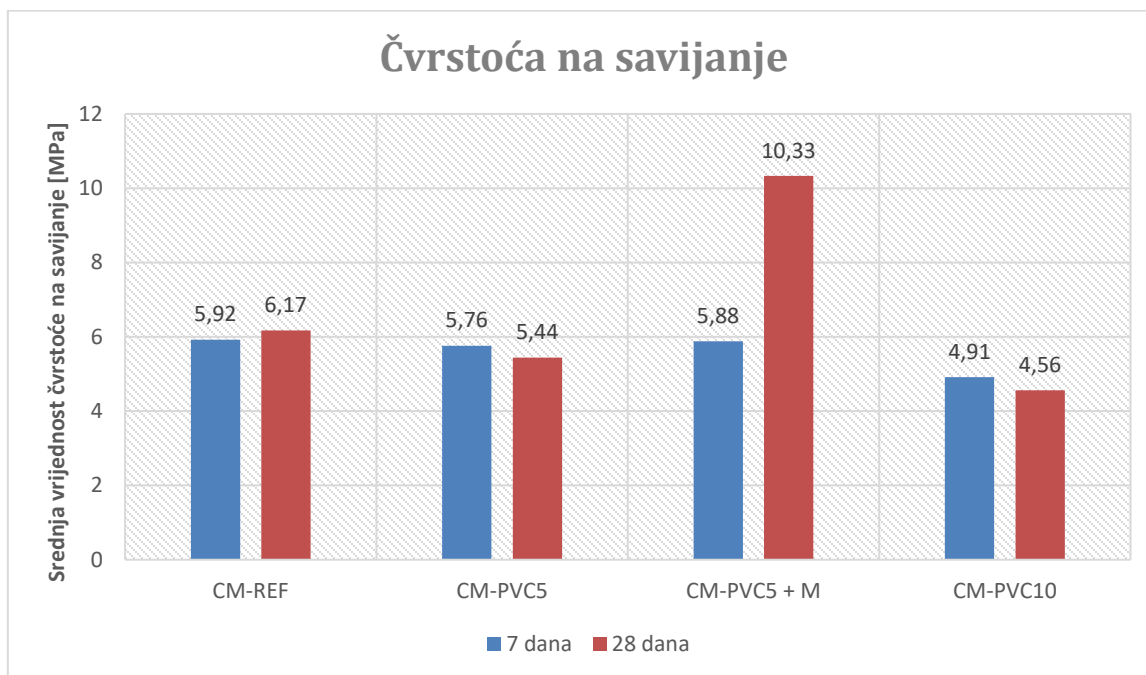
Ispitivanjem čvrstoće savijanjem nakon 28 dana dobivamo očekivane rezultate smanjenja čvrstoće s povećanjem postotka zamjene PVC piljevine, osim kod CM-PVC5+M. Kod cementne mješavine s dodatkom metakaolina, CM-PVC5+M, čvrstoća se udvostručila u odnosu na čvrstoću ispitanu nakon 7 dana. Usporedimo li CM-PVC5+M s CM-REF čvrstoća na savijanje je gotovo 70% veća ispitivanjem nakon 28 dana. Tablica 27 prikazuje dobivene rezultate srednje vrijednosti čvrstoća savijanjem po pojedinim uzorcima. Uzorci mješavine CM-PVC-5 imaju čvrstoću na savijanje približno sličnu veličini čvrstoći na savijanje dobivene na uzorcima CM-REF. Nasuprot tome, uzorci CM-PVC10 pokazuju smanjenje vlačne čvrstoće savijanjem za 35% u odnosu na rezultate referentne mješavine.

Tablica 27. Čvrstoća na savijanje uzoraka starosti 28 dana

28 dana	Čvrstoća na savijanje		
	sila sloma	pojedini rezultat ispitnog uzorka	srednja vrijednost
Uzorak:	[N]	[MPa]	[MPa]
1. CM - REF/1	2290	5,37	6,17
2. CM - REF/2	2811	6,59	
3. CM - REF/3	2795	6,55	
1. CM - PVC 5/1	2309	5,41	5,44
2. CM - PVC 5/2	2314	5,42	
3. CM - PVC 5/3	2341	5,49	
1. CM - PVC 5/1 + M	4428	10,38	10,33
2. CM - PVC 5/2 + M	4438	10,40	
3. CM - PVC 5/3 + M	4360	10,22	
1. CM - PVC 10/1	1973	4,62	4,56
2. CM - PVC 10/2	1959	4,59	
3. CM - PVC 10/3	1904	4,46	

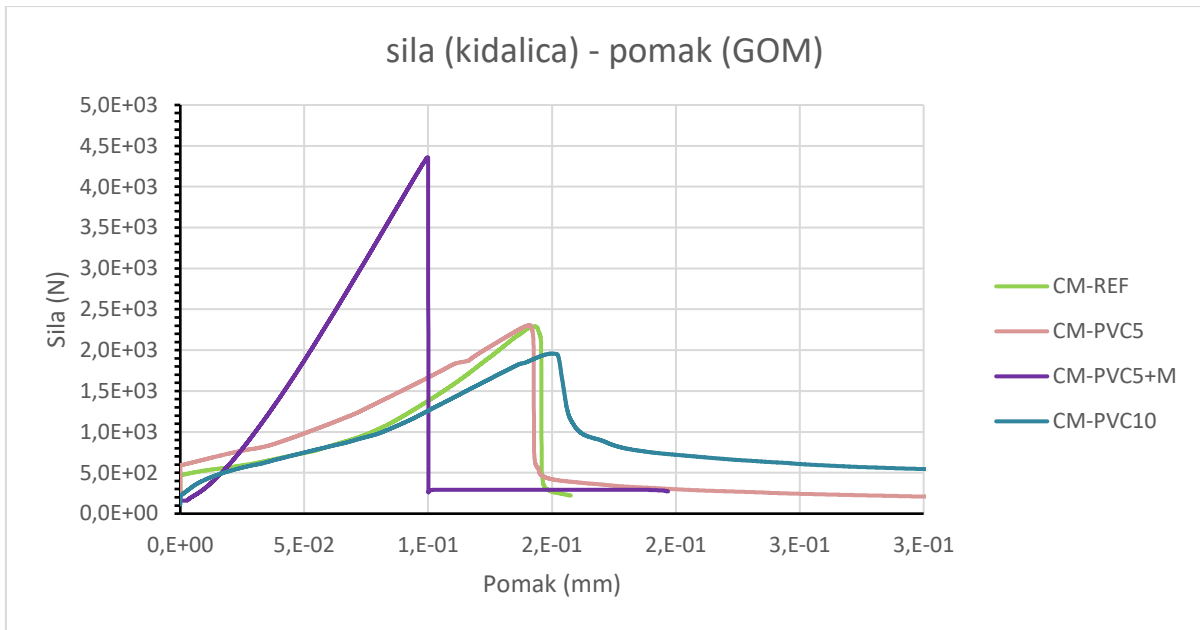
Srednje vrijednosti čvrstoće savijanjem po pojedinoj mješavini dobiveni na temelju ispitivanja uzoraka starosti 7 i 28 dana prikazani su grafički na Slici 57. Čvrstoća na savijanje je očekivano porasla za 4,2% nakon 21 dan za referentnu mješavinu. Međutim, zanimljivo je primijetiti da se čvrstoća na savijanje kod uzoraka CM-PVC5 i CM-PVC10 nakon 28 dana smanjila u odnosu

na onu nakon na 7 dana što nije uobičajeno za mortove, odnosno beton općenito. Nasuprot tome, uzorci CM-PVC5+M imaju veliko povećanje čvrstoće, čak 75,7% u odnosu na čvrstoću uzoraka starosti 7 dana, te 67,4% u odnosu na čvrstoću referentne mješavine. Veliki porast čvrstoće uzoraka s dodatkom metakaolina može se objasniti činjenicom da je pucolanska reakcija metakaolina puno brža između 7 i 28 dana starosti uzoraka.



Slika 57. Usporedba čvrstoće na savijanje uzoraka starosti 7 i 28 dana

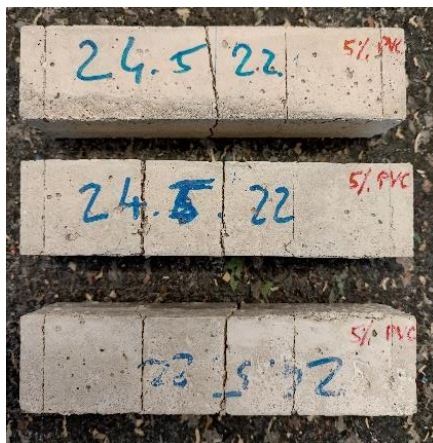
Na Slici 58 prikazan je dijagram sila-pomak za reprezentativni uzorak svake od mješavina. Usporedbom padajućeg djela krivulje sila-pomak može se uočiti razlika u duktilnosti između pojedinih cementnih mješavina. Opaženo je da uzorak mješavine CM-PVC10 pokazuje relativno veću duktilnost u odnosu na ostale mješavine. Nasuprot tome, za uzorke s dodatkom metakaolina uočeno je povećanje krutosti pa se može zaključiti da, metakaolin ima negativan učinak na duktilnost jer ju uvelike smanjuje.



Slika 58. Usporedba rezultata čvrstoće na savijanje uzoraka starosti 28 dana

6.4 Tlačna čvrstoće na uzorcima starosti 7 dana

Nakon ispitivanja čvrstoće na savijanje ispitana je tlačna čvrstoća svake od mješavina na način da se ispituju dva izlomljena dijela svake prizme dobivena ispitivanjem savijanjem. Dakle, po svakoj mješavini cementnog morta ispitano je po 6 uzoraka te je na temelju prosjeka ispitivanja dana srednja vrijednost tlačne čvrstoće po mješavini (Slika 59).



Slika 59. Uzorak nakon tlačnog ispitivanja

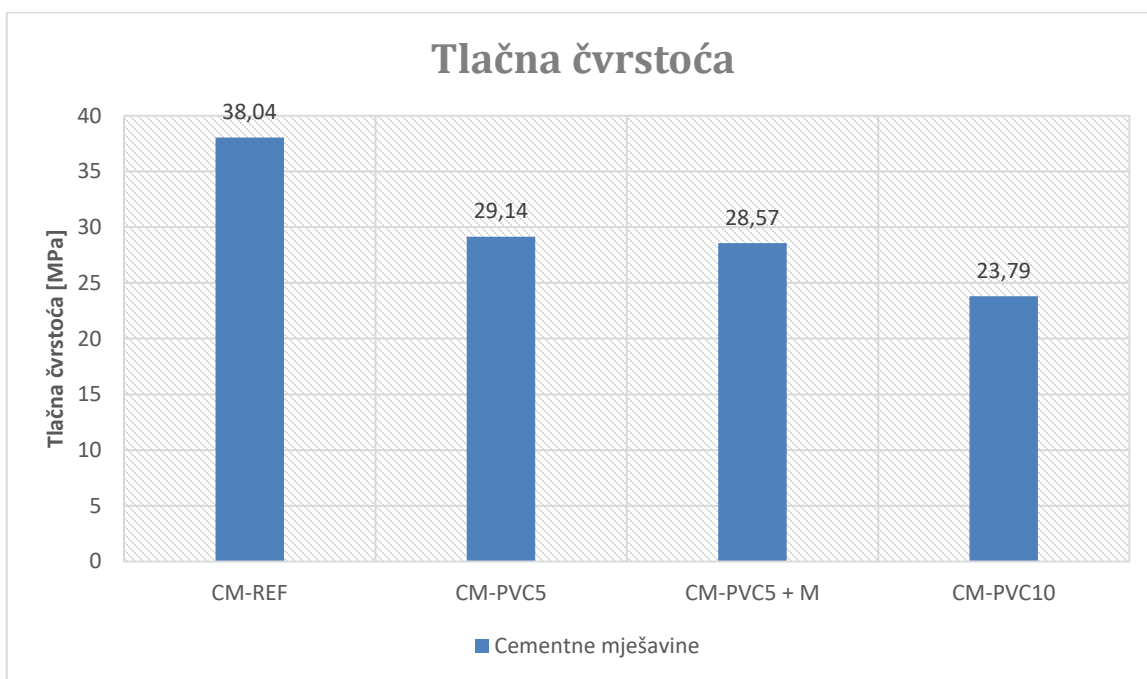
Kod svih uzoraka brzina nanošenja opterećenja je iznosila 2400 N/s sukladno zahtjevu norme HRN EN 196-1 [37].. U Tablici 28 su dani rezultati svih ispitanih uzoraka

Tablica 28. Tlačna čvrstoća cementnih uzorka starosti 7 dana

7 dana	Tlačna čvrstoća		
	sila sloma	pojedini rezultat ispitnog uzorka	srednja vrijednost
Uzorak:	[N]	[MPa]	[MPa]
1. CM - REF/1	61160	38,23	38,04
	57970	36,23	
2. CM - REF/2	60710	37,94	
	61700	38,56	
3. CM - REF/3	60430	37,77	
	63250	39,53	
1. CM - PVC 5/1	49580	30,99	29,14
	42800	26,75	
2. CM - PVC 5/2	46420	29,01	
	49460	30,91	
3. CM - PVC 5/3	46780	29,24	
	44680	27,93	
1. CM - PVC 5/1 + M	48420	30,26	28,57
	45840	28,65	
2. CM - PVC 5/2 + M	44820	28,01	
	44310	27,69	
3. CM - PVC 5/3 + M	45280	28,30	
	45600	28,50	
1. CM - PVC 10/1	39540	24,71	23,79
	37330	23,33	
2. CM - PVC 10/2	39150	24,47	
	36590	22,87	
3. CM - PVC 10/3	39150	24,47	
	36590	22,87	

Usporedbom rezultata srednjih vrijednosti tlačne čvrstoće vidljivo je da se već za uzorke starosti svega 7 dana tlačna čvrstoća smanjuje kod mješavina s zamjenom PVC-a u odnosu na referentnu

mješavinu. Smanjena tlačna čvrstoća mogla bi biti najveći nedostatak mješavina s zamjenom PVC piljevine, što nije zanemariv nedostatak. Nadalje, na Slici 60 vidljiv je trend smanjenja tlačne čvrstoće s povećanjem udjela PVC piljevine. Zanimljivo je primijetiti da je taj trend uočen i kod mješavine s dodatkom metakaolina.



Slika 60. Tlačna čvrstoće uzoraka starosti 7 dana

6.5 Tlačna čvrstoća na uzorcima starim 28 dana

Ispitivanje tlačne čvrstoće na 28 dana starim uzorcima provodi se podjednako ispitivanjima opisanim u poglavlju 7.5 za uzorke starosti 7 dana. Rezultati ispitivanja zajedno sa srednjim vrijednostima za pojedinu mješavinu prikazani su u Tablici 29. U odnosu na vrijednost tlačne čvrstoće pri starosti 7 dana uočeno je povećanje čvrstoće kod svih mješavina, no značajnije povećanje je ponovno vidljivo kod uzorka mješavine s dodatkom metakaolina, CM-PVC5 + M. Tlačna čvrstoća ponovno dokazuje da metakaolin povoljno utječe na poboljšanje svojstava mješavine između 7 i 28 dana starosti uzoraka. Na temelju rezultat ispitivanja može se

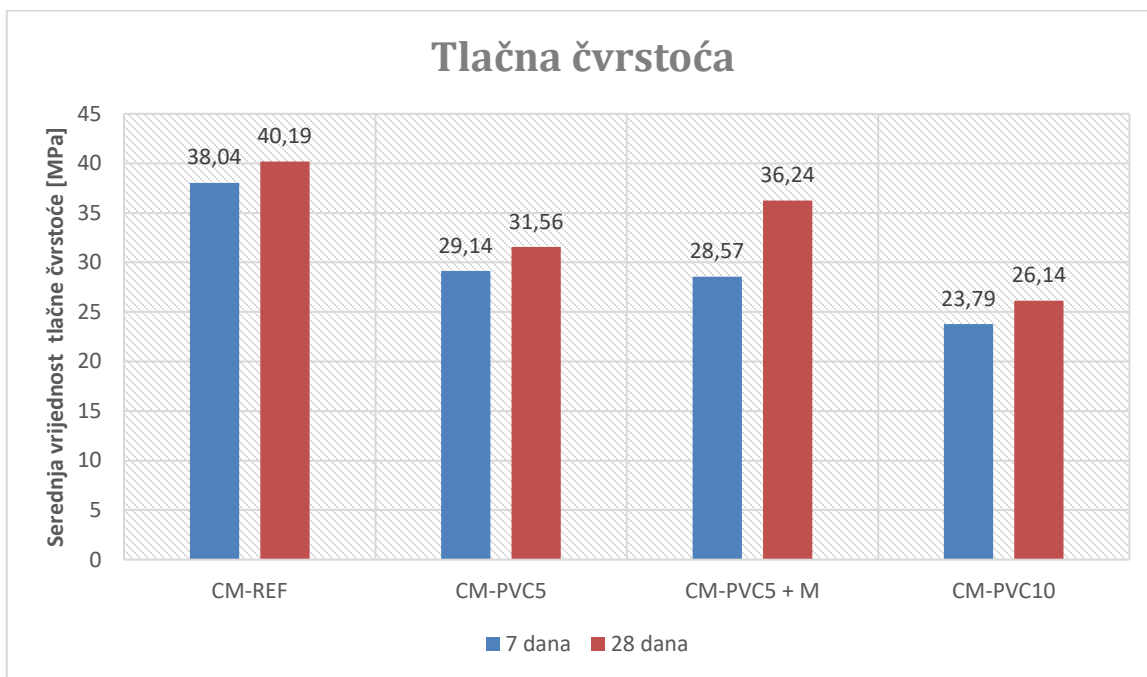
zaključiti da je zadovoljavajuća samo mješavina CM-PVC5+M jer ne odstupa uvelike od rezultata dobivenih referentnom mješavinom. S druge strane, CM-PVC5 i CM-PVC10 imaju znatni pad tlačne čvrstoće za gotovo 30% i 55% u odnosu na referentni uzorak.

Tablica 29. Tlačna čvrstoća uzoraka starosti 28 dana

28 dana	Tlačna čvrstoća		
	sila sloma	pojedini rezultat ispitnog uzorka	srednja vrijednost
Uzorak:	[N]	[MPa]	[MPa]
1. CM - REF/1	67500	42,19	40,19
	62030	38,77	
2. CM - REF/2	63230	39,52	
	62980	39,36	
3. CM - REF/3	/	/	
	65740	41,09	
1. CM - PVC 5/1	53740	33,59	31,56
	51430	32,14	
2. CM - PVC 5/2	49180	30,74	
	50190	31,37	
3. CM - PVC 5/3	50190	31,37	
	48250	30,16	
1. CM - PVC 5/1 + M	61820	38,64	36,24
	58030	36,27	
2. CM - PVC 5/2 + M	56110	35,07	
	58610	36,63	
3. CM - PVC 5/3 + M	56640	35,40	
	56660	35,41	
1. CM - PVC 10/1	43730	27,33	26,14
	42440	26,53	
2. CM - PVC 10/2	38430	24,02	
	44640	27,90	
3. CM - PVC 10/3	41200	25,75	
	40470	25,29	

Povećanje čvrstoće nakon 21 dan kod uzoraka CM-REF, CM-PVC5, CM-PVC10 iznosi redom 5,63%, 8,32% i 9,88%, dok je kod uzorka CM-PVC5 + M povećanje tlačne čvrstoće za 26,83% u odnosu na čvrstoću kod uzoraka starosti 7 dana (Slika 52). Tlačna čvrstoća uzorka s

metakaolinom je kod uzoraka starosti 7 dana bila nešto manje nego kod uzorka bez metakaolin (Slika 61). Uzorci starosti 28 dana mješavine s metakaolinom imaju tlačnu čvrstoću veću za gotovo 15% u odnosu na uzorke bez metakaolina te se približavaju vrijednostima čvrstoće referentne mješavine.



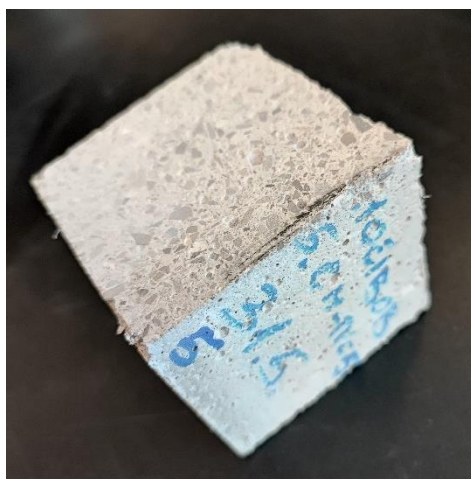
Slika 61. Usporedba tlačne čvrstoće uzoraka starosti 7 i 28 dana

Mogući problemi kod mješavina sa zamjenom pijesaka PVC piljevinom kao što su smanjenje čvrstoće na savijanje i tlačne čvrstoće mogu se ukloniti zamjenom određenog postotka cementa mineralnim dodatcima kao što je npr. metakaolina. U mješavini CM-PVC5 + M samo 5% mase cementa zamijenjeno je s metakaolinom što ostavlja prostor za dodatne mogućnosti povećanja postotka dodatka do čak 15% te samim time povećanju čvrstoće na savijanje i tlačne čvrstoće.

6.6 Otpornost na habanje

Ispitivanje otpornosti na habanje provedeno je već opisanim postupkom za svaku pojedinu cementnu mješavinu. Za svaku mješavinu ispitana su tri uzorka oblika kocke sukladno postupku

danom u normi EN 13892-3, a opisanom u poglavlju 7.1 Masa m_1 predstavlja masu uzorka na početku ispitivanja dok mase od m_2 do m_5 predstavljaju mase nakon svakog četvrtog ciklusa od 22 okretaja. Na Slici 62 prikazan je primjer jednog od uzorak nakon ispitivanja gdje je vidljiv trag oštećene i obrušene površine uzorka izložene procesu habanja. Rezultati ispitivanja prikazani su u Tablici 30.

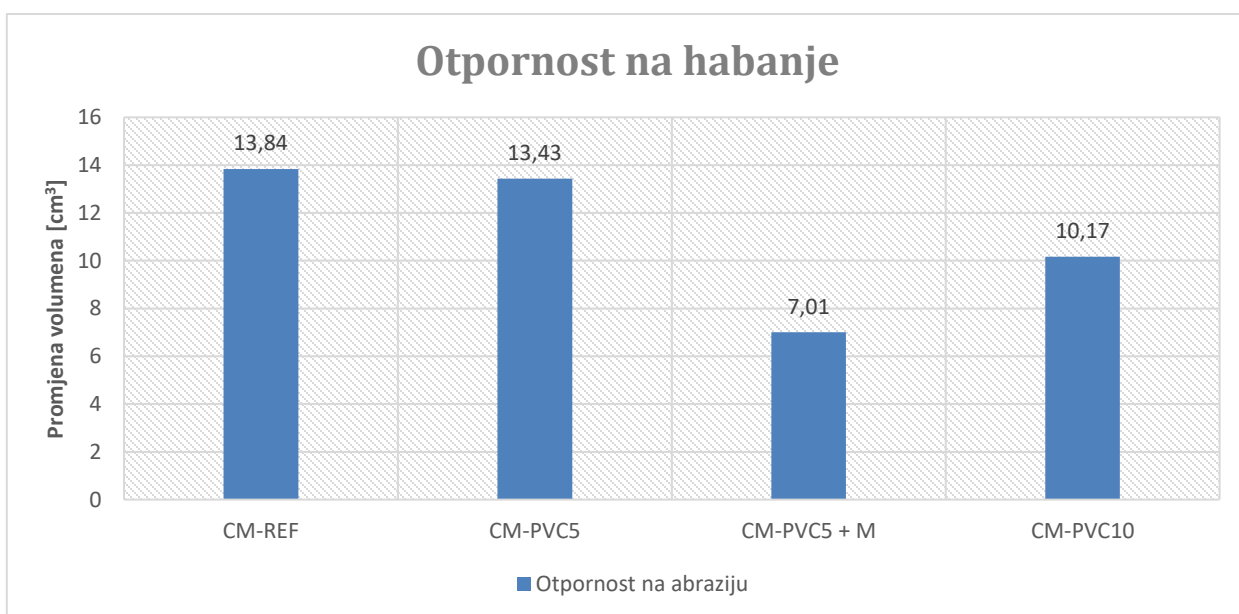


Slika 62. Kocka izložena ispitivanju otpornosti na habanje

Tablica 30. Rezultati ispitivanja otpornosti na habanje

HABANJE	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5	Δm	ρ	ΔV	ΔV_{uk}
Uzorak:	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g/cm ³]	[cm ³]	[cm ³]
1. CM - REF/1	744,50	740,30	733,40	725,20	716,10	28,40	2,22	12,79	13,84
2. CM - REF/2	757,40	750,60	743,10	735,10	726,90	30,50	2,22	13,74	
3. CM - REF/3	763,00	755,50	747,20	738,20	729,70	33,30	2,22	15,00	
1. CM - PVC 5/1	696,70	690,20	683,00	676,20	669,40	27,30	2,01	13,58	13,43
2. CM - PVC 5/2	683,20	676,30	668,10	660,20	655,30	27,90	2,01	13,88	
3. CM - PVC 5/3	682,70	676,30	669,70	662,30	656,90	25,80	2,01	12,84	
1. CM - PVC5/1+M	694,70	690,10	687,00	684,30	681,50	13,20	1,89	6,98	7,01
2. CM - PVC5/2+M	668,90	665,80	662,80	659,10	655,60	13,30	1,89	7,04	
1. CM - PVC 10/1	685,60	682,10	677,80	672,10	666,50	19,10	1,96	9,74	10,17
2. CM - PVC 10/2	675,10	670,20	664,60	659,90	655,10	20,00	1,96	10,20	
3. CM - PVC 10/3	604,70	599,30	594,80	589,00	584,00	20,70	1,96	10,56	

Analizom dobivenih rezultata (Tablica 30) zaključuje se da povećanjem količine PVC piljevine poboljšava otpornost na habanje. Dodatno, mješavina s metakaolinom se i u ovom ispitivanju pokazala kao najotpornija na habanje. Cementna mješavina CM-PVC5+M ima daleko bolju otpornost na habanje od svih ispitanih uzoraka, gotovo dvostruko bolju otpornost u odnosu na referentnu mješavinu ali i na mješavinu CM-PVC5, odnosno mješavinu s istom zamjenom PVC-a ali bez metakaolina. Na Slici 63 dan je grafički prikaz srednje vrijednosti obrušenog volumena za pojedinu mješavinu iz čega je jasno vidljivo odskakanje rezultat uzoraka s metakaolinom.



Slika 63. Otpornost na habanje uzoraka starosti 28 dana

6.7 Kapilarna vodoupojnost

Na uzorcima oblika kocke starosti 28 dana, koji su pripremljeni za ispitivanje otpornosti habanjem, prethodno je ispitana kapilarna vodoupojnost. Postupak ispitivanja započinje sušenjem uzoraka do konstante mase i bilježenjem početne mase, nakon čega se uzorci uranjaju

u vodu pri čemu su oslonjeni na oslonce (Slika 64) te im se važe promjena mase nakon 2,4,8,15,30,45 i 60 minuta te nakon 4 i 24 sata.



Slika 64. Ispitivanje kapilarne vodoupojnosti na uzorcima kočke

U Tablici 29. prikazane su izmjerene mase za svaki pojedini cementni uzorak u pojedinom vremenu i koeficijent kapilarnog upijanja, A , za svaki vremenski period koji se dobiva preko izraza:

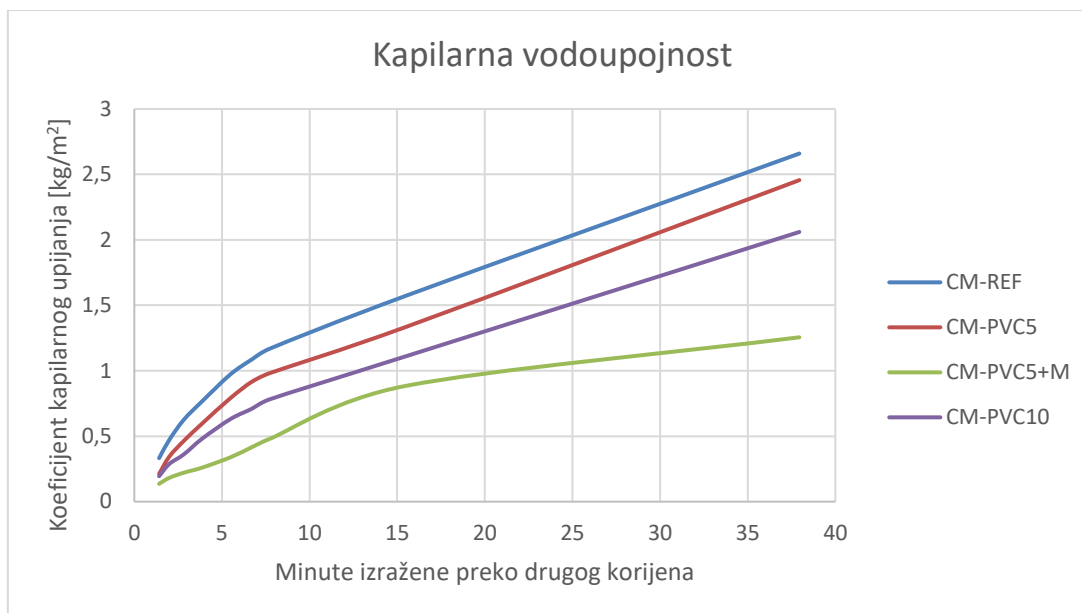
$$A = \frac{m_i - m_0}{S} \quad (15)$$

gdje je m_i masa uzorka nakon i vremena u kontaktu s vodom (g), m_0 masa suhog uzorka (g) i S ploština površine uzorka u kontaktu s vodom (cm²). Nadalje, u Tablici 31 prikazane su ukupne promjene u masi uzoraka (povećanje mase), postotak vodoupojnosti i koeficijent kapilarnog upijanja nakon 24 sata ispitivanja. Na temelju dobivenih srednjih vrijednosti kapilarno upijene vode može se zaključiti da se dodatkom PVC materijala u uzorak smanjuje upojnost vode, što je zapravo i karakteristika PVC-a koji je inertan materijal. Ponovno, uzorak s metakaolinom ima najpovoljnije svojstvo odnosno najmanji postotak kapilarno upijene vode.

Tablica 31. Mase uzoraka nakon pojedinih vremenskih intervala

VODOUPOJNOST	Dimenzije:	m ₀	m ₂	A ₂	m ₄	A ₄	m ₈	A ₈	m ₁₅	A ₁₅
Uzorak:	[cm ²]	[g]	[g]	[kg/m ²]	[g]	[kg/m ²]	[g]	[kg/m ²]	[g]	[kg/m ²]
1. CM - REF/1	52,0506	722,30	724,00	0,33	725,00	0,52	725,80	0,67	726,40	0,79
2. CM - REF/2	52,1916	733,90	735,60	0,33	736,10	0,42	736,80	0,56	737,50	0,69
3. CM - REF/3	52,2004	737,90	739,70	0,34	740,40	0,48	741,30	0,65	742,20	0,82
1. CM - PVC 5/1	52,1283	675,40	676,60	0,23	677,30	0,36	677,80	0,46	678,60	0,61
2. CM - PVC 5/2	49,5615	661,60	662,70	0,22	663,20	0,32	663,90	0,46	664,40	0,56
3. CM - PVC 5/3	49,005	662,30	663,20	0,18	664,00	0,35	664,60	0,47	665,30	0,61
1. CM - PVC 5/1+ M	52,1268	691,40	692,60	0,23	692,90	0,29	693,20	0,35	693,60	0,42
2. CM - PVC 5/2+ M	50,2677	663,70	664,60	0,18	665,00	0,26	665,30	0,32	665,50	0,36
1. CM - PVC 10/1	51,7548	675,50	676,30	0,15	676,70	0,23	677,10	0,31	677,80	0,44
2. CM - PVC 10/2	52,8465	664,30	665,40	0,21	665,90	0,30	666,30	0,38	666,90	0,49
3. CM - PVC 10/3	45,3376	590,30	591,30	0,22	591,80	0,33	592,10	0,40	592,60	0,51
	m ₃₀	A ₃₀	m ₄₅	A ₄₅	m ₆₀	A ₆₀	m _{4h}	A _{4h}	m _{24h}	A _{24h}
	[g]	[kg/m ²]	[g]	[kg/m ²]	[g]	[kg/m ²]	[g]	[kg/m ²]	[g]	[kg/m ²]
1. CM - REF/1	727,60	1,02	728,20	1,13	728,70	1,23	730,90	1,65	737,10	2,84
2. CM - REF/2	738,30	0,84	738,90	0,96	739,20	1,02	741,20	1,40	746,30	2,38
3. CM - REF/3	743,40	1,05	744,00	1,17	744,50	1,26	746,60	1,67	752,30	2,76
1. CM - PVC 5/1	679,40	0,77	680,10	0,90	680,40	0,96	682,20	1,30	688,00	2,42
2. CM - PVC 5/2	665,40	0,77	666,10	0,91	666,40	0,97	668,00	1,29	673,70	2,44
3. CM - PVC 5/3	666,40	0,84	666,90	0,94	667,30	1,02	669,20	1,41	674,60	2,51
1. CM - PVC 5/1+ M	694,20	0,54	694,80	0,65	695,50	0,79	698,70	1,40	701,70	1,98
2. CM - PVC 5/2+ M	666,10	0,48	666,70	0,60	667,00	0,66	670,00	1,25	672,70	1,79
1. CM - PVC 10/1	678,40	0,56	678,90	0,66	679,30	0,73	680,80	1,02	686,10	2,05
2. CM - PVC 10/2	667,60	0,62	668,00	0,70	668,40	0,78	670,20	1,12	674,60	1,95
3. CM - PVC 10/3	593,50	0,71	593,80	0,77	594,10	0,84	595,70	1,19	600,20	2,18

Na Slici 65 prikazani su rezultati pomoću koeficijenta kapilarnog upijanja u vremenskim intervalima ispitivanja (intervali su izraženi u minutama, pomoću drugog korijena vremena). Cementni uzorci CM-REF, CM-PVC5 i CM-PVC10 imaju podjednak oblik krivulje upijanja vode, ali naravno s manjim vrijednostima koeficijenta upijanja vode s obzirom na povećanje količine PVC piljevine. Dok uzorak CM-PVC5+M se ističe drugačijim oblikom krivulje, odnosno vidljiv je blaži nagib koeficijenta kapilarnog upijanja s vremenom, što upućuje na trend smanjenja kapilarne vodoupojnosti dodatkom metakaolina. Tablica 32 prikazuje ukupne dobivene promjene mase te postotak vodoupojnosti i koeficijent kapilarnog upijanja nakon 24 h.



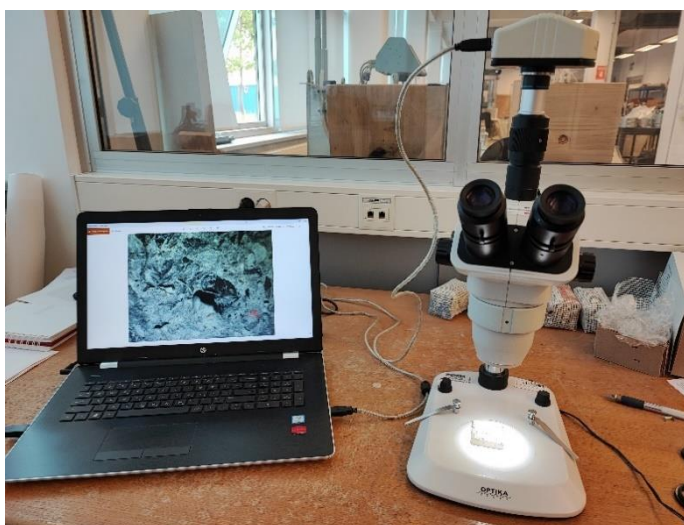
Slika 65. Usporedba kapilarne vodoupojnosti cementnih uzoraka

Tablica 32. Rezultati ispitivanja kapilarne vodoupojnosti

VODOUPOJNOST	Δm	sr. vrijednost	kapilarna vodoupojnost	sr. vrijednost	koef. kapilarnog upijanja
Uzorak:	[g]	[g]	[%]	[%]	[kg/m ²]
1. CM - REF/1	14,80	13,87	2,05	1,90	2,66
2. CM - REF/2	12,40		1,69		
3. CM - REF/3	14,40		1,95		
1. CM - PVC 5/1	12,60	12,33	1,87	1,85	2,46
2. CM - PVC 5/2	12,10		1,83		
3. CM - PVC 5/3	12,30		1,86		
1. CM - PVC 5/1 + M	10,30	9,65	1,49	1,42	1,26
2. CM - PVC 5/2 + M	9,00		1,36		
1. CM - PVC 10/1	10,60	10,27	1,57	1,60	2,06
2. CM - PVC 10/2	10,30		1,55		
3. CM - PVC 10/3	9,90		1,68		

6.8 Struktura morta

Na temelju vlastitih istraživanja ustanovljeno je da cementni uzorci s određenim postotkom PVC-a imaju smanjena mehanička svojstva u odnosu na referentnu mješavinu. Na temelju pregleda literature ustanovljeno je da jedan do razloga tome može biti što PVC piljevina ima slabiju vezu s cementnim kamenom od pijeska. Stoga, korištenjem elektronskog mikroskopa, prikazanog na Slici 66, pokušavaju se uočiti nedostaci koji se pojavljuju zbog dodavanja PVC-a u cementnom mješavinu, odnosno zona između PVC-a i cementnog kamena, ali i povezivanje PVC-a s samim sobom. Mogućnost povećanja mikroskopa je do 45 puta. Kod snimanja uzoraka uglavnom se koristilo uvećanje od 10, 20 i 30 puta, vrlo rijetko 45 puta, jer bi slike bile dosta nejasne.

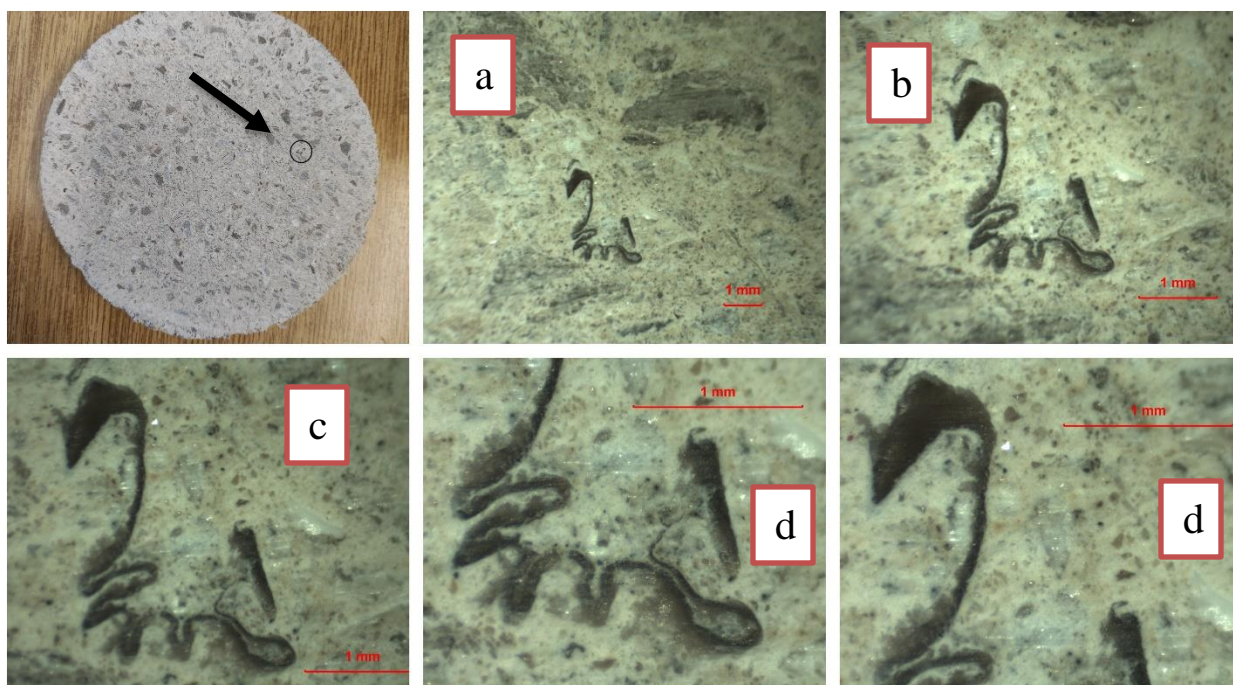


Slika 66. Postupak snimanja uzoraka mikroskopom

Za analizu mikroskopom su pripremljena dva tipa uzoraka, uzorci dobiveni od su slomljenih uzoraka prizme ispitivanih na tlak i uzorci ispiljeni iz valjka pomoći pile za beton. Kako bi snimanje mikroskopom bilo što uspješnije uzorak mora biti što manje debljine. Osim toga, ravnija ploha uzorka daje bolje slike iz razloga što se može jasnije zumirati veće područje. Uzorci s neravninama, poput slomljenog uzorka prizme, omogućavaju jasno zumiranje samo jedne visine uzorka dok je sve ostalo (bilo više ili niže od zumiranog dijela) nejasno i dobiva se mutna slika. Iz tog razloga kod uzoraka ispiljenih iz valjka dobivene slike su jasnije. Međutim,

kod uzoraka dobivenih ispitivanjem prizme vidljivo je na koji način se PVC ponaša prilikom opterećenja i kakva je povezanost PVC piljevine s ostatkom uzorka.

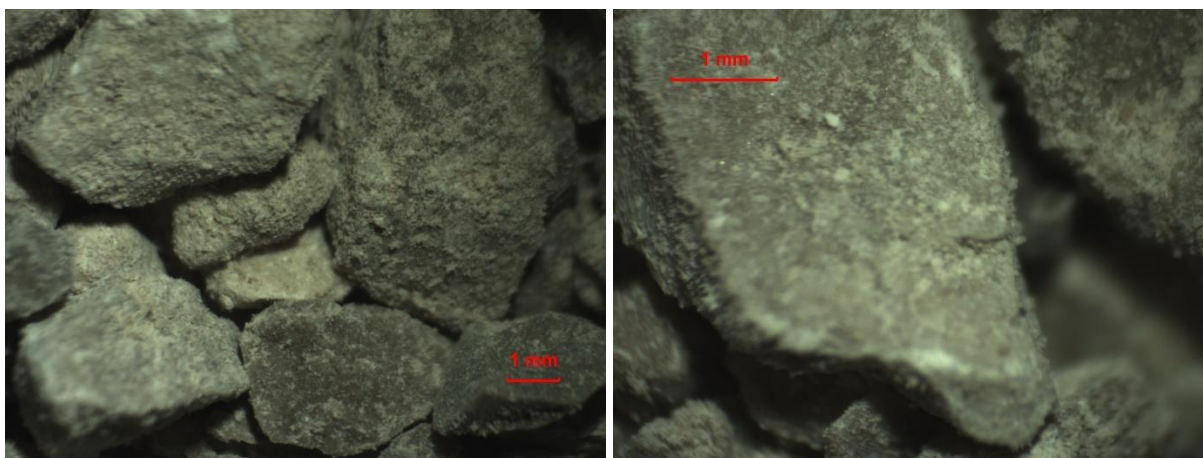
Naposljetku, kako bi bolje shvatili ovaj posljednji dio ispitivanja očvrslog morta i samo povećanje, odnosno rad mikroskopa, na Slici 67 prikazana je slika uzorka vidljiva prostim okom te sukladno tome i pripadajuće povećanje. Prikazan je uzorak CM-PVC5 koji je povećan 10, 20, 30 i 45 puta, odnosno a,b,c,d. Naravno radi se o uzorku valjka, koji je ravan, jer kod uzorka prizme, koja je neravna, ne bi bilo moguće dobiti jasnu sliku.



Slika 67. Prikaz uvećanja mikroskopom – a = 10x, b = 20x, c = 30x i d = 45x

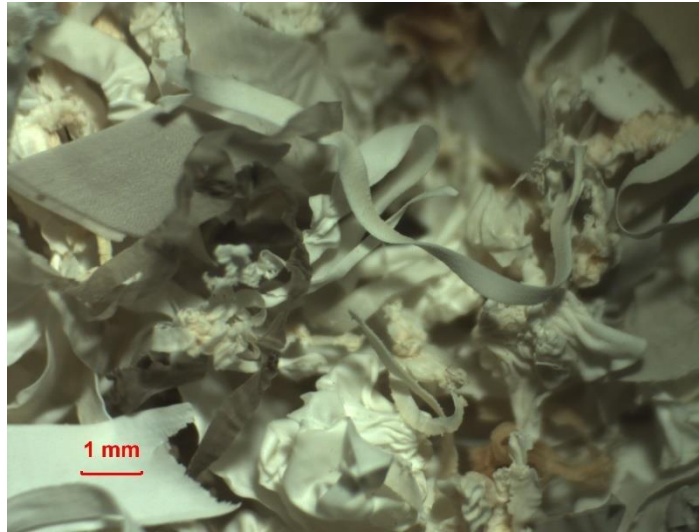
6.8.1 Snimke pijeska i PVC piljevine

Najprije se analizirao materijal korišten za izradu cementnih mješavina, odnosno pijesak i PVC piljevine. Zrna pijeska uglavnom su poznata i ispitivana te se nije pretjerano analizirao izgled njegove strukture. Na Slici 68 prikazana su zrna pijeska uvećana za 10 i 20 puta.



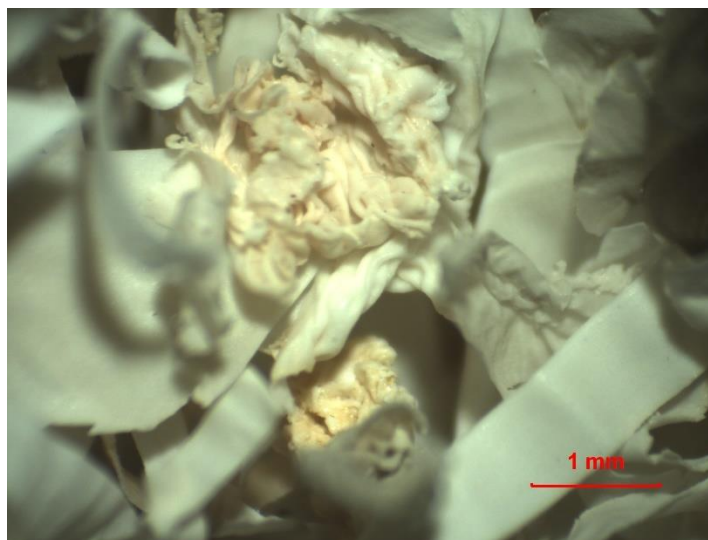
Slika 68. Pijesak uvećan 10x (lijevo) i pijesak uvećan 20x (desno)

Nasuprot tome, uzorci PVC-a imaju raznolikost u veličini, boji i obliku što zapravo otežava spravljanje optimalnih mješavina, sa zadovoljavajućim i uvijek jednakim karakteristikama. Dvije osnovne skupine oblika PVC piljevine su trakasti PVC i PVC u obliku izgužvane grudice (Slika 69). Trakasti PVC pospješuje duktilnost same cementne mješavine te preuzima ulogu vlakana kod mikroarmiranog betona. Nasuprot tome, takozvane grudice PVC piljevine negativno djeluju na mort jer smanjuju kompaktnost mješavine, cementna pasta ne dopire do svih šupljina takvog oblika PVC piljevine i dolazi do znatnog oslabljenja.



Slika 69. PVC piljevina korištena za izradu cementne mješavine (uvećanje 10x)

Na Slici 69 prikazan je nasumice odabranog uzorka materijala PVC piljevine. Međutim dodatno su analizirani uzorci različitih frakcija dobivenih prilikom ispitivanja granulometrije. Vizualnom analizom golim okom uzorka materijala PVC piljevine najsitnije frakcije djelovao je kao nakupina prašine koja se stvara prilikom izrade PVC stolarije. Međutim, ispitivanjem mikroskopom utvrđeno je da je PVC piljevina zastupljen po svim frakcijama, čak i u najsitnijim. Analizom je ustvrđeno da se samo kod frakcija 0,5-1 i 1-2 mm pojavljuje PVC u obliku grudica, dok su trakice PVC piljevine vrlo dugačke i nepravilne (Slika 70 i 71).

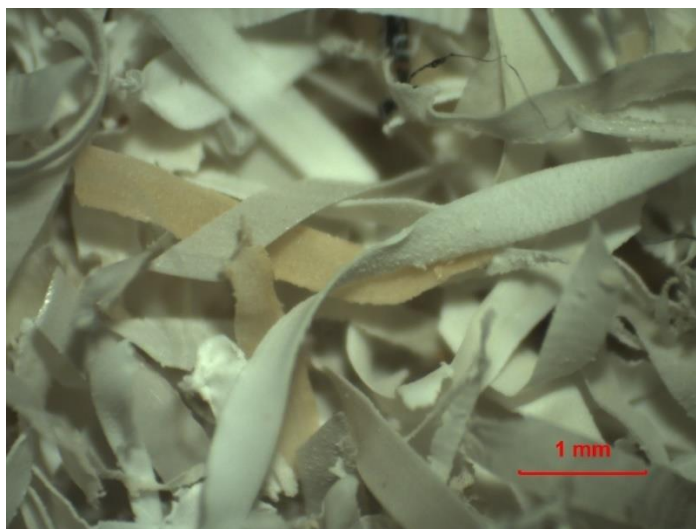


Slika 70. PVC piljevina frakcije 1-2 mm (uvećanje 20x)



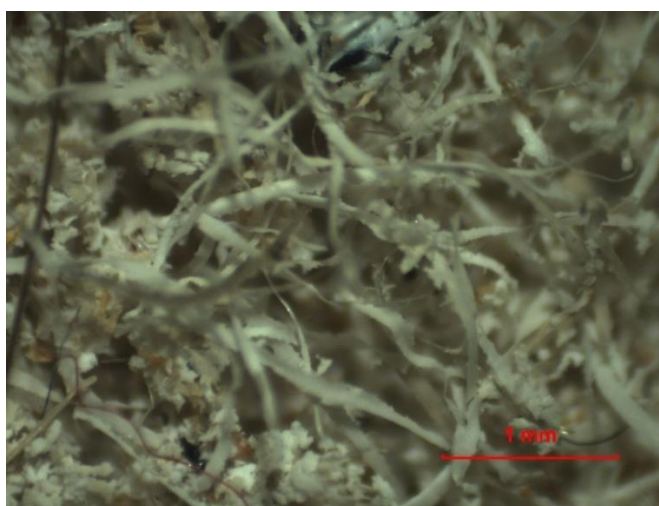
Slika 71. PVC piljevina frakcije 0,5-1 mm (uvećanje 20x)

Frakcija manje od 0,5 mm imaju sve ujednačeniji oblik i izgledaju pravilnije te naravno manje veličine. Pojavljuju se samo PVC trakice dok izgužvanih grudica PVC-a gotovo da i nema. Na Slici 72 prikazana je PVC piljevine frakcije 0,25-0,5 mm gdje su trakice mnogo pravilnije i manjih duljina, bez PVC piljevine u obliku grudice te samim time bolje utječu na karakteristike cementne mješavine.



Slika 72. PVC piljevina frakcije 0,25-0,5 mm (uvećanje 20x)

Kod najsitnijih frakcija (Slika 73), jasno je vidljivo da se radi o PVC-u zbog boje uzoraka koja je slična uzorcima većih frakcija, ali i djelomično zbog same strukture. Zapravo ovaj podatak je vrlo značajan jer govori da PVC otpad nije potrebno prethodno obraditi (filtrirati, pročistiti) jer se u potpunosti sastoji od PVC materijala. U protivnom, prašina i različiti ostali otpadci negativno bi u utjecali na karakteristike cementnih uzoraka te bi za poboljšanje svojstava bila potrebna prethodna obrada što povećava trošak reciklaže i proizvodnje, a samim time dovodi do pitanja njezine isplativosti.



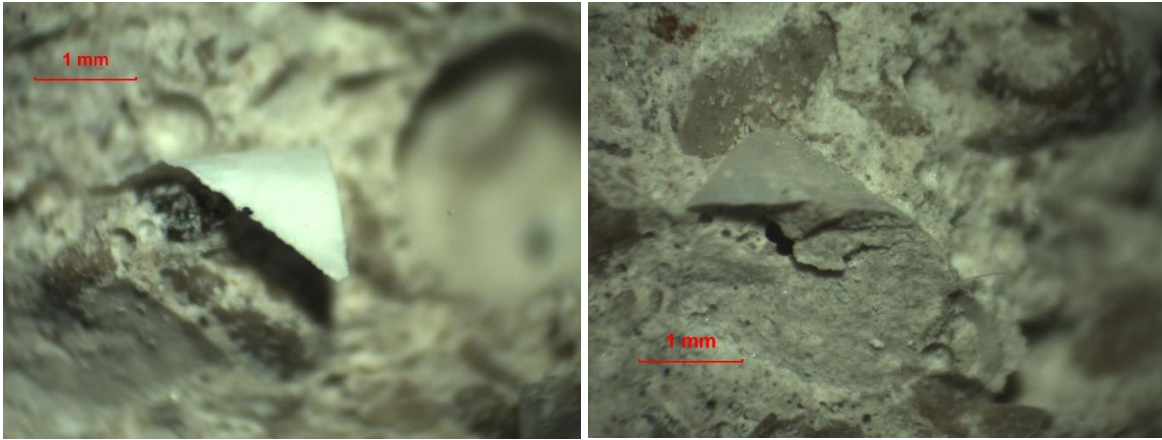
Slika 73. PVC piljevina frakcije 0,063-0,125 mm (uvećanje 30x)

6.8.2 Snimke uzorka dobivenih ispitivanjem prizme

Snimanje uzoraka svih izrađenih mješavina dobivenih iz prizmi provedeno je povećanjem od 10 i 20 puta kako bi se međusobno mogli usporediti rezultati uz najoptimalniju kvalitetu slike. Kod usporedbe između uzoraka s različitim postotkom zamjene PVC piljevine nije uočena znatna razlika, osim naravno brojnijih uzoraka PVC-a po snimanoj površini. Na temelju toga može se izvući zaključak da je to zadovoljavajući podatak jer dokazuje da se povećanjem količine PVC piljevine ne pojavljuju dodatna grupiranja materijala PVC-a što bi predstavljalo znatno oslabljena uzorka na tom području (Slika 74). Dakle, PVC piljevina se homogeno umiješala u cementni mort te ne dolazi do njezinog grudanja i grupiranja. Što se tiče uzoraka sa i bez metakaolina, uočeno je da su uzorci s metakaolinom mnogo kompaktniji i da dolazi do manjeg izbočivanja i izdvajanja PVC piljevine iz kompaktne smjese materijala. Time se povećava trenje PVC-a te samim time čvrstoća mješavine, o čemu je već bilo riječi u prethodnim poglavljima. Na Slici 75 prikazana je usporedba sličnog detalja ispupčenja PVC trakice u kojemu je na lijevoj strani uzorak bez metakaolina, a na desnoj uzorak s metakaolinom. Vidljivo je da je kod uzoraka s metakaolinom PVC trakica više ispunjena cementnim mortom, odnosno da se cementni mort manje izlomio i izdvojio od PVC trakice.



Slika 74. CM-PVC10 s uvećanjem 10x

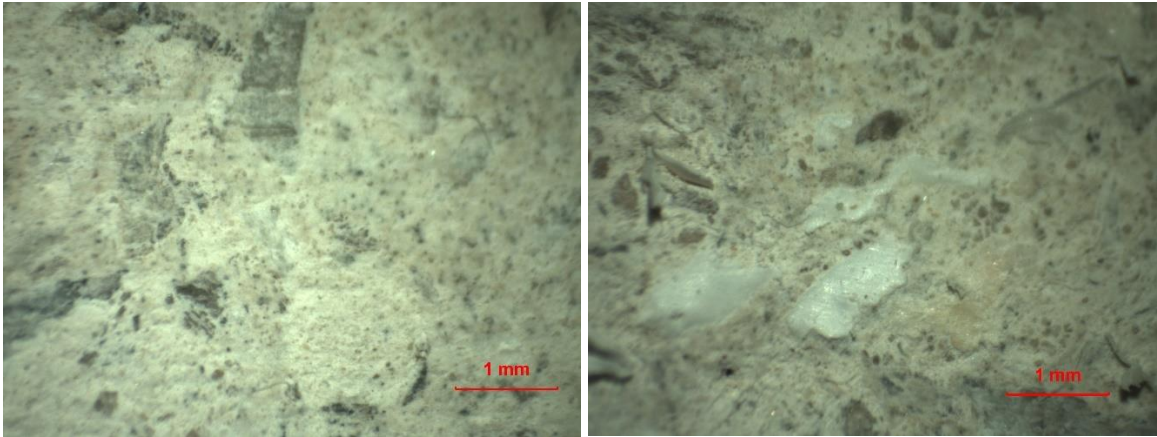


Slika 75. Usporedba CM-PVC5 (lijevo) i CM-PVC5 + M (desno) s uvećanjem 20x

Analiziranjem dobivenih slika ustanovljeno je da je struktura morta homogena te da je veza PVC piljevine i cementnog morta vrlo dobra. Nije uočeno izdvajanja istog unutar mješavine, što bi uvelike smanjilo čvrstoću samog uzorka. Trenje prilikom sloma kod PVC piljevine je nešto slabije te bi se njegovim poboljšanjem uvelike povećala duktilnost.

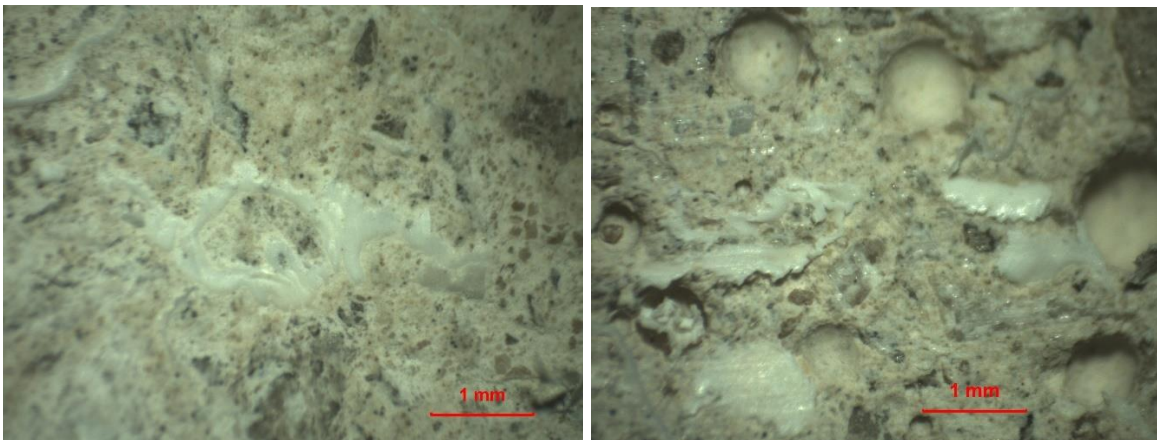
6.8.3 Snimke uzoraka dobivenih piljenjem valjka

Snimanjem uzorka dobivenih piljenjem valjaka provedeno je uz povećanja od 20 i 30 puta. Dobivene slike prikazuju brojnost i razmještaj PVC piljevine te povezivanje piljevine s cementnim mortom. Dojam dobivenih slika je prikaz u 2D obliku, dok se kod prethodnih uzoraka mogla vidjeti trodimenzionalnost i bolje predočiti i pretpostaviti oblik same PVC piljevine. Međutim, dobivene slike su mnogo jasnije što omogućava veće uvećanje mikroskopom. Usporedimo li uzorke mješavine CM-REF s CM-PVC10 uočava se oblik i jasno vidljiv položaj PVC piljevine unutar samog uzorka, Slika 76. Osim toga, vidljiva je povoljna koherentnost PVC piljevine s ostatkom sastojaka cementne mješavine, a da pritom ne dolazi da pojave nepotrebnih oslabljenja u obliku šupljina. Također, u spomenutim primjerima jasno je vidljivo da je PVC piljevina ravnomjerno rasprostranjena po cijeloj mješavini.



Slika 76. Usporedba PVC-REF (lijevo) i PVC-CM10 (desno) s uvećanjem 20x

Usporedimo li ponovno uzorke sa i bez metakaolina, razlika gotovo da i ne postoji i nije vidljiva, Slika 77 Kompaktnost PVC piljevine je podjednako dobra, jedino što se kod uzoraka s metakaolinom uočavaj povećana količina sferičnih zračnih šupljina koje nisu uzrokovane PVC piljevinom. Međutim, moramo uzeti u obzir da su ispitni samo karakteristični uzorci pojedinih mješavina te da bi SEM analiza dala detaljniji uvid u mikroskopsko stanje.



Slika 77. Usporedba CM-PVC5 (lijevo) i CM-PVC5 + M (desno) za uvećanje 20x

7. ZAKLJUČAK

Tema ovog diplomskog rada bila je istražiti utjecaj dodatka PVC piljevine, potencijalnog zamjenskog materijala određenog postotka volumena pijeska, na mehanička i trajnosna svojstva morta te naposljetku i betona. Osnovni cilj rada bila je pronalazak optimalne mješavine cementnog morta s PVC piljevinom odnosno postizanje zadovoljavajuće obradivosti mješavine, raspona 140 – 200 mm mjerene metodom rasprostiranja. Dodavanjem PVC piljevine u betonske mješavine utječe se na smanjenje potrošnje prirodnih sirovina (pijeska) te djelomično rješavanje problema nagomilavanja opasnog otpadnog materijala, PVC piljevine proizvedene izradom PVC stolarije, čiji je proces odlaganja na području Republike Hrvatske upitan..

Rezultati prethodnih ispitivanja cementnog morta s dodatkom plastike doprinijela su saznanju da je potrebno poboljšati svojstva svježeg morta (obradivost, ugradnju i konzistenciju) korištenjem različitih aditiva te dodavanjem materijala sitnijih čestica od čestica cementa, poput metakaolina.

Laboratorijska ispitivanja svježeg i očvrslog morta provedena su na svim spravljenim mješavinama s PVC piljevinom kao zamjenom određenog postotka volumena pijeska (u iznosu od 5 do 10%) kao i mješavini s PVC piljevinom u kojoj je 5% mase cementa zamijenjeno s metakaolinom a rezultati ispitivanja uspoređeni su s rezultatima dobivenim na referentnoj mješavini.

Ispitivanjem konzistencije rasprostiranjem (ključno ispitivanje za određivanje optimalne recepture cementnog morta) mješavina s 5% zamjene volumena pijeska s PVC piljevinom sa i bez metakaolina izmjerene su približno jednake vrijednosti promjera rasprostiranja od 186 mm. Mješavina sa zamjenom od 10% volumena pijeska s PVC piljevinom pokazuje smanjenje promjera rasprostiranja u usporedbi s referentnom mješavinom na približno 150 mm, ali još uvijek unutar granica koje su zahtijevane, između 140 i 200 mm. Nasipna gustoća pokazuje trend smanjenja gustoće mješavina povećanjem postotka PVC piljevine što je u skladu s očekivanim. Dodatno, usporedbom cementnih mješavina s 5% zamjene volumena pijeska PVC piljevinom sa i bez metakaolina, gustoća mješavine s metakaolinom je manja u odnosu na mješavinu bez istog. Rezultati ispitivanja udjela pora slijed podjednak trend kao i gustoća.

Najveća razlika je između referentne mješavine i mješavine s 10% zamjene volumena pijeska PVC piljevinom, odnosno udio pora redom iznosi 2,5% i 16,91%. Mješavine sa zamjenom od 5% volumena pijeska PVC piljevinom sa i bez 5% metakaolina imaju približno jednak udio pora, od 10% i 7,43%.

Mješavine s 5% zamjene volumena pijeska s PVC piljevinom sa i bez metakaolina i mješavina s 10% zamjene volumena pijeska s PVC piljevinom imaju manje čvrstoće na savijanje za uzorke starosti od 7 dana u odnosu na referentnu mješavinu i to redom za 2,7%, 0,7% i 17,1%. Nasuprot tome, kod uzoraka starosti od 28 dana, mješavine s 5% i 10% PVC piljevine pokazuju smanjenje čvrstoće na savijanje od 11,8% i 26,1% u odnosu na referentnu mješavinu, dok kod mješavine s 5% metakaolina dolazi do povećanja čvrstoće na savijanje od čak 67,4% u odnosu na referentnu mješavinu. Tlačne čvrstoća uzoraka s prisustvom PVC piljevine u odnosu na referentnu mješavinu pokazuju još veće smanjenje od čvrstoće na savijanje. Kod uzoraka starosti 7 dana dolazi do smanjenja od 23,4%, 24,9% i 37,5% za mješavine sa 5% PVC piljevine sa i bez metakaolina i kod mješavine sa 10% PVC piljevine. Međutim, na uzorcima starosti 28 dana smanjenja tlačne čvrstoće za prethodno navedene uzorke redom iznosi 21,5%, 9,8% i 35%.

Rezultati ispitivanja pokazuju da uzorci s PVC piljevinom imaju poboljšanu otpornost na habanje u odnosu na referentnu mješavinu. Povećanje otpornosti na habanje kod mješavina sa zamjenom 5% volumena pijeska PVC piljevinom sa i bez 5% metakaolina i 10% PVC piljevine iznose redom 3%, 49,3% i 26,5% u usporedbi s referentnom mješavinom. Naposljetku, ispitana je kapilarna vodoupojnost. Koeficijent kapilarnog upijanja kod uzoraka s zamjenom od 5% volumena pijeska PVC piljevinom sa i bez 5% metakaolina i 10% PVC piljevine se smanjuje za 7,5%, 52,6% i 22,56% u odnosu na referentnu mješavinu. Ponovno uzorak s metakaolionom kao zamjenom 5% udjela cementa imaj najveću otpornost na habanje i najmanji koeficijent kapilarne vodoupojnosti.

Dodatkom aditiva te naposljetku zamjenom cementa s metakaolinom omogućeno je postizanje boljih svojstva svježeg morta s prisustvom PVC piljevine te samim time su poboljšana i svojstva očvrslog morta. Usporedbom samo mješavina s dodatkom PVC piljevine, cementna mješavina s PVC piljevinom u količini od 5% volumena pijeska pokazala se kao najoptimalnija mješavina. Rezultati dobiveni laboratorijskim ispitivanjem ukazuju na to da su mehanička svojstva mješavine, u principu, vrlo slična svojstvima referentne mješavine a trajnosna su čak i bolja. Međutim, ispitivanjima se pokazalo da se sva svojstva mješavina znatno poboljšavaju zamjenom cementa s metakaolinom pa tako i tlačna čvrstoća i čvrstoća na savijanje. U ovom ispitivanju svega 5% mase cementa zamijenjeno je metakaolinom što daje puno veću mogućnost povećanja postotka zamjene pošto se u literaturi navodi i zamjena do 30% ukupne mase cementa. Povećanje postotka metakaolina pridonijelo bi dodatnom povećanju mehaničkih, ali i trajnosnih svojstva uzorka cementnih mortova. Na taj način omogućava se i povećanje postotka zamjene pijeska s PVC piljevinom čime bi se povećala reciklaža i smanjila potrošnja prirodnih sirovina za spravljanje ekološki prihvatljivih mortova, odnosno betona.

Na kraju, možemo zaključiti da su svojstva očvrslog morta očekivano nešto lošija u odnosu na mort bez prisustva PVC piljevine. Međutim, mješavina s dodatkom metakaolina ima ista, a često i bolja svojstva u odnosu na mort bez PVC piljevine. Dobiveni rezultati ispitivanja svježeg i očvrslog morta, uljevaju nadu u nastavak ispitivanja morta, a ponajviše betona, s zamjenom određenog postotka volumena pijeska s PVC piljevinom uz dodatak potrebnih aditiva. Iz tog razloga, preporuča se dodatno ispitivanje mješavina s prisustvom PVC piljevine uz zamjenu cementa s metakaolinom. Osim poboljšanja svojstva očvrslog morta, omogućilo bi se i povećanje postotka zamjene pijeska s PVC piljevinom bez značajnog smanjenja mehaničkih svojstava cementnog morta te možda i naposljetku postepenog plasiranja neke nove vrste recikliranog morta i betona.

8. LITERATURA

- [1] Babafemi A. J., Šavija B., Paul S.C., Anggraini V., *Engineering Properties of Concrete with Waste Recycled Plastic: A Review*, *Sustainability*, 10(11), 3875, 2018; <https://doi.org/10.3390/su10113875>
- [2] Cukarić M., *Mogućnost primjene PVC piljevine kao sitnog agregata u mortu i betonu*, Završni rad, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka 2020
- [3] *Cement and concrete around the world*, <https://gccassociation.org/concretefuture/cement-concrete-around-the-world>, pristup 25.7.2022.
- [4] *Hoover Dam*, <https://www.britannica.com/topic/Hoover-Dam>, pristup 25.7.2022.
- [5] *Hoover Dam*, <https://www.viator.com/tours/Las-Vegas/Hoover-Dam-Mini-Tour/d684-65770P2>, pristup 25.7.2022.
- [6] Čećez M., Šahinagić – Isović M., *Mortovi s dodatkom lokalnih industrijskih nusproizvoda*, *Građevinar* 71 (1), pp1-7, 2019; <https://doi.org/10.14256/JCE.2358.2018>
- [7] Garside, M.: *Cement production worldwide from 1995 to 2021*, <https://www.statista.com/statistics/1087115/global-cement-production-volume/>, pristup 28.7.2022.
- [8] Mrakovčić S., *Projektiranje sastava, svojstva i ispitivanje svježeg betona*, Predavanje u okviru kolegija Teorija i tehnologija betona, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka 2020.
- [9] R.B. Holland, ... L.F. Kahn, *in Corrosion of Steel in Concrete Structures*, 2016
- [10] *What is Metakaolin?*, <https://www.concrete.org.uk/fingertips-nuggets.asp?cmd=display&id=768>, pristup 29.7.2022.
- [11] *Meta Kaolin*, https://www.go4worldbusiness.com/pref_product/view/931452/meta-kaolin.html, pristup 29.7.2022.

- [12] *poli (vinil-klorid)*, <https://www.enciklopedija.hr/natuknica.aspx?ID=49251>, pristup 29.7.2022.
- [13] *PVC Plastics: Polyvinyl Chloride*, <https://www.thoughtco.com/what-is-pvc-plastics-820366>, pristup 29.7.2022.
- [14] *Plastic Pollution by Country 2022*, <https://worldpopulationreview.com/country-rankings/plastic-pollution-by-country>, pristup 4.8.2022.
- [15] *Ograničenja EU-a za određene plastične proizvode za jednokratnu uporabu*, https://environment.ec.europa.eu/topics/plastics/single-use-plastics/eu-restrictions-certain-single-use-plastics_hr, pristup 4.8.2022.
- [16] *Potrošnja plastike i plastični otpad će se utrostručiti*, <https://bljesak.info/gospodarstvo/ekologija/potrosnja-plastike-i-plasticni-otpad-ce-se-utrostruciti/384648>, pristup 4.8.2022.
- [17] Merlo A., Lavagna L., Suarez- Riera D., Pavese M., *Recycling of WEEE Plastics Waste in Mortar: The Effects on Mechanical Properties*, *Recycling*, 6(4), 70, 2021: <https://doi.org/10.3390/recycling6040070>
- [18] *Plastic pollution is growing relentlessly as waste management and recycling fall short, says OECD*, <https://www.oecd.org/environment/plastic-pollution-is-growing-relentlessly-as-waste-management-and-recycling-fall-short.htm>, pristup 5.8.2022.
- [19] Kou, S.C.; Lee, G.; Poon, C.S.; Lai, W.L. *Properties of Lightweight Aggregate Concrete Prepared with PVC Granules Derived from Scraped PVC Pipes*. *Waste Manag.* 2009,
- [20] Senhadji, Y.; Siad, H.; Escadeillas, G.; Benosman, A.S.; Chihaoui, R.; Mouli, M.; Lachemi, M. *Physical, Mechanical and Thermal Properties of Lightweight Composite Mortars Containing Recycled Polyvinyl Chloride*. *Constr. Build. Mater.* 2019
- [21] Mustafa, M.A.T.; Hanafi, I.; Mahmoud, R.; Tayeh, B.A. *Effect of Partial Replacement of Sand by Plastic Waste on Impact Resistance of Concrete: Experiment and Simulation*. *Structures* 2019,

- [22] *How Long Does It Take for Plastic to Decompose?*, <https://chariotenergy.com/blog/how-long-until-plastic-decomposes/>, pristup 5.8.2022.
- [23] *Enzim koji jede plastiku mogao bi eliminirati milijarde tona otpada na odlagalištima*, <https://www.ekovjesnik.hr/clanak/5093/enzim-koji-jede-plastiku-mogao-bi-eliminirati-milijarde-tona-otpada-na-odlagalistima>, pristup 5.8.2022.
- [24] Hrvatski zavod za norme, HRN EN 1015-3:2000, *Metode ispitivanja mortova za ziđe – 3. dio: Određivanje konzistencije svježeg morta (stolićem za potresanje)*
- [25] Hrvatski zavod za norme, HRN EN 1015-6:2000, *Metode ispitivanja mortova za ziđe – 6. dio: Određivanje gustoće svježeg morta*
- [26] Hrvatski zavod za norme, HRN EN 1015-7:2000, *Metode ispitivanja mortova za ziđe – 7. dio: Određivanje udjela pora u svježem mortu*
- [27] Hrvatski zavod za norme, HRN EN 1015-11:2000, *Metode ispitivanja mortova za ziđe – 11. dio: Određivanje čvrstoće pri savijanju i tlačne čvrstoće očvrslog morta*
- [28] Hrvatski zavod za norme, HRN RN 1015-18:2003, *Metode ispitivanja mortova za ziđe – 18. dio: Određivanje koeficijenta kapilarne vodoupojnosti*
- [29] EN 13892-3, *Određivanje otpornosti na habanje (Bohme)*
- [30] *Certifikati i tehničke upute*, <https://www.holcim.hr/proizvodi-i-usluge/cement/certifikati-i-tehnicke-upute>, pristup 5.8.2022
- [31] Hrvatski zavod za norme, HRN EN 1097-6:2013, *Ispitivanja mehaničkih i fizikalnih svojstava agregata – 6. dio: Određivanje gustoće i upijanje vode*
- [32] Hrvatski zavod za norme, HRN EN 933-1:2012, *Ispitivanje granulometrijskih svojstava agregata – 1. dio: Određivanje granulometrijskog sastava – Metoda sijanja*
- [33] Hrvatski zavod za norme, HRN EN 932-2:2003, *Ispitivanje općih svojstava agregata – 2. dio: Metode smanjivanja laboratorijskih uzoraka*
- [34] HRN EN 12620:2013, *Agregat za beton (EN 12620:2013)*

[35] Dynamon SF 16S, <https://www.mapei.com/at/de-at/produkte/produktliste/produktdetails/dynamon-sf-16s>, pristup 15.8.2022.

[36] MasterMatrix SDC 150, <https://www.master-builders-solutions.com/en-gb/products/mastermatrix/mastermatrix-sdc-150-high-performance-viscosity-modifying-agent>, pristup 15.8.2022.

[37] Hrvatski zavod za norme, HRN EN 196-1:2016, *Metode ispitivanja cementa – 1. dio: Određivanje čvrstoće*