

# Utjecaj superplastifikatora na mehanička svojstva morta

---

**Mišan, Andrina**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2024**

*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:157:416825>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-21**



*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**

**Andrina Mišan**

**Utjecaj superplastifikatora na mehanička svojstva morta**

**Završni rad**

**Rijeka, 2024.**

**SVEUČILIŠTE U RIJECI  
GRAĐEVINSKI FAKULTET**

**Stručni prijediplomski studij  
Građevinski materijali**

**Andrina Mišan  
JMBAG: 0069077298**

**Utjecaj superplastifikatora na mehanička svojstva morta**

**Završni rad**

**Rijeka, rujan 2024.**

## **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.

---

Andrina Mišan

U Rijeci, 10.09.2024.

## ZAHVALA

*Zahvaljujem se mentorici izv. prof. dr. sc. Natalija Bede Odorčić na usmjeravanju, savjetima, pomoći i uloženom vremenu pri izradi ovog završnog rada. Također zahvaljujem se laborantima Dini Juriševiću i Dominiku Štroku na trudu, strpljenju i savjetima pri izradi i ispitivanju morta.*

*Zahvalila bi se i roditeljima na usmjeravanju, neizmjerne podršci, potpori i povjerenju koje su iskazali brojnim motivacijskim govorima i konstantnim podsjetnicima.*

*Puno hvala i dečku, ostalim članovima obitelji i prijateljima na razumijevanju i podršci tijekom studiranja.*

## SAŽETAK

Cementni mort ključan je materijal u građevinarstvu, poznat po svojoj važnosti u raznim građevinskim procesima, kao što su zidanje, žbukanje i izrada betonskih elemenata. Njegova svojstva, poput tlačne i vlačne čvrstoće, obradivosti i trajnosti, mogu se značajno poboljšati korištenjem kemijskih dodataka poput superplastifikatora. Ovaj rad bavi se istraživanjem utjecaja superplastifikatora na svojstva cementnog morta s naglaskom na mehanička svojstva. Cilj istraživanja bio je utvrditi kako različite koncentracije superplastifikatora (0,5% i 1%) utječu na svojstva svježeg i očvrstlog morta, uključujući tlačnu čvrstoću, vlačnu čvrstoću i konzistenciju. Ispitivanja su provedena na više uzoraka, a rezultati su uspoređeni s referentnom mješavinom bez dodataka. Rezultati su pokazali da superplastifikatori značajno poboljšavaju mehanička svojstva morta, osiguravajući veće tlačne i vlačne čvrstoće kao i poboljšanje obradivosti za konstantni vodocementni faktor. To jasno upućuje na mogućnost spravljanja mješavina uz manji vodocementni faktor te zadržavanja iste obradivosti i povećanja trajnosti smjese. Mješavine s 1% superplastifikatora ostvarile su najbolje rezultate u pogledu obradivosti i čvrstoće. S druge strane, naknadno dodavanje superplastifikatora imalo je manji učinak u usporedbi s njegovim dodavanjem tijekom početnog miješanja. Na temelju dobivenih rezultata, zaključeno je da pravilno doziranje i način primjene superplastifikatora imaju ključnu ulogu u optimizaciji svojstava morta, čime se postižu bolje performanse u građevinskoj industriji.

Ključne riječi: cementni mort, superplastifikator, tlačna čvrstoća, čvrstoća na savijanje, konzistencija morta

## **ABSTRACT**

Cement mortar is a critical material in construction, widely used in various processes such as masonry, plastering, and the production of concrete elements. Its properties, including compressive and tensile strength, workability, and durability, can be significantly enhanced by chemical additives like superplasticizers. This study focuses on the impact of superplasticizers on the mechanical properties of cement mortar. The aim was to determine how different concentrations of superplasticizers (0.5% and 1%) affect the properties of both fresh and hardened mortar, including compressive strength, tensile strength, and consistency. Tests were conducted on multiple samples, and the results were compared to a reference mixture without additives. The results showed that superplasticizers significantly improve the mechanical properties of mortar, providing higher compressive and tensile strengths as well as improved workability for a constant water-cement ratio. This clearly indicates the possibility of producing mixes with a lower water-cement ratio while maintaining the same workability and increasing the durability of the mixture. Furthermore, the optimal dosage of superplasticizer is crucial for achieving the best performance, while adding the additive later in the mixing process proved less effective. The conclusion is that proper dosing of superplasticizers can greatly improve the quality of cement mixtures in the construction industry.

**Keywords:** cement mortar, superplasticizer, compressive strength, tensile strength, workability, mortar consistency.

# SADRŽAJ

|        |   |    |
|--------|---|----|
| 1.     | UVOD.....   | 1  |
| 2.     | OPĆENITO O BETONU I MORTU .....   | 2  |
| 3.     | DODACI ZA BETON I NJIHOV UTJECAJ .....  | 4  |
| 3.1.   | Kemijski dodaci za beton.....   | 4  |
| 3.2.   | Plastifikatori .....  | 4  |
| 3.3.   | Superplastifikatori .....   | 5  |
| 4.     | REZULTATI DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA UTJECAJA PLASTIFIKATORA I SUPERPLASTIFIKATORA..... | 7  |
| 5.     | METODE ISPITIVANJA SVOJSTVA SVJEŽEG BETONA .....                                      | 12 |
| 5.1.   | Ispitivanje svježeg betona slijeganjem .....  | 12 |
| 5.2.   | Ispitivanje svježeg betona rasprostiranjem .....                                      | 14 |
| 5.3.   | Vebe postupak .....   | 16 |
| 5.4.   | Stupanj zbijenosti po Walzu .....   | 17 |
| 6.     | METODE ISPITIVANJA SVOJSTVA OČVRSLOG BETONA .....                                     | 18 |
| 6.1.   | Razorno ispitivanje očvrslog betona .....   | 18 |
| 6.1.1. | Ispitivanje tlačne čvrstoće .....   | 18 |
| 6.1.2. | Ispitivanje direktne vlačne čvrstoće .....  | 20 |
| 6.1.3. | Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem .....  | 20 |
| 6.1.4. | Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem .....  | 21 |
| 6.2.   | Nerazorno ispitivanje očvrslog betona.....  | 22 |
| 6.2.1. | Ispitivanje betona sklerometrom .....   | 22 |
| 6.2.2. | Ispitivanje betona ultrazvukom .....  | 23 |
| 6.2.3. | Ispitivanje betona metodom rezonantne frekvencije .....                               | 23 |
| 6.3.   | Razlike između ispitivanja svojstava cementnog morta i betona.....                    | 23 |
| 7.     | MATERIJALI I IZRADA CEMENTNIH MJEŠAVINA.....  | 25 |
| 7.1.   | Sastav cementnih mješavina .....  | 27 |
| 7.2.   | Izrada cementnih mješavina .....  | 28 |



|      |   |    |
|------|---|----|
| 8.   | ISPITIVANJA SVJEŽEG CEMENTNOG MORTA ..... | 30 |
| 8.1. | Nasipna gustoća .....                     | 30 |
| 8.2. | Ispitivanje konzistencije morta.....      | 31 |
| 9.   | ISPITIVANJA OČVRSLOG CEMENTNOG MORTA..... | 35 |
| 9.1. | Ispitivanje čvrstoće na savijanje.....    | 37 |
| 9.2. | Ispitivanje tlačne čvrstoće.....          | 42 |
| 10.  | ZAKLJUČAK .....                           | 48 |
| 11.  | LITERATURA.....                           | 49 |

## POPIS TABLICA

|   |    |
|---|----|
| Tablica 1. Proporcije mješavina samozbijajućeg betona [5] .....             | 8  |
| Tablica 2. Rezultati ispitivanja slijeganja betona [6].....                 | 9  |
| Tablica 3. Rezultati ispitivanja rasprostiranja betona [6] .....            | 10 |
| Tablica 4. Korigirane mase sastojaka cementne mješavine .....               | 28 |
| Tablica 5. Rezultati ispitivanja gustoće svježeg morta.....                 | 30 |
| Tablica 6. Rezultati ispitivanja konzistencije metodom rasprostiranja ..... | 33 |
| Tablica 7. Gustoća, masa i dimenzije uzoraka nakon 2 dana njegovanja.....   | 35 |
| Tablica 8. Gustoća, masa i dimenzije uzoraka nakon 7 dana njegovanja.....   | 36 |
| Tablica 9. Usporedba gustoća cementnih mješavina nakon 2 i 7 dana .....     | 36 |
| Tablica 10. Čvrstoća na savijanje za 2 dana stare uzorke .....              | 39 |
| Tablica 11. Čvrstoća na savijanje za 7 dana stare uzorke .....              | 40 |
| Tablica 12. Rezultati ispitivanja čvrstoća na savijanje .....               | 41 |
| Tablica 13. Tlačna čvrstoća uzorka starosti 2 dana .....                    | 44 |
| Tablica 14. Tlačna čvrstoća uzorka starosti 7 dana .....                    | 45 |
| Tablica 15. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće .....                     | 47 |

## POPIS SLIKA

|   |    |
|---|----|
| Slika 1. Sastav betona i volumni udio [2] .....   | 3  |
| Slika 2. Shematski prikaz načina i svrhe uporabe plastifikatora [3] .....                             | 5  |
| Slika 3. Odnos između konzistencije betona i količine vode za pripremu svježeg betona [4] ...         | 6  |
| Slika 4. Tlačna čvrstoća samozbijajućeg betona u različitim vremenima [5] .....                       | 8  |
| Slika 5. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće [6] .....  | 11 |
| Slika 6. Postupak ispitivanja slijeganja [7] .....  | 13 |
| Slika 7. Rezultat ispitivanja: slijeganje, s (mm) [7] .....   | 14 |
| Slika 8. Postupak ispitivanja rasprostiranja [7].....   | 15 |
| Slika 9. Vebe aparat [9] .....  | 16 |
| Slika 10. Waltzov kontejner [10] .....  | 17 |
| Slika 11. Oblici sloma [11] .....   | 19 |
| Slika 12. Rezultat ispitivanja [11] .....   | 19 |
| Slika 13. Ispitivanje direktne vlačne čvrstoće [11] .....   | 20 |
| Slika 14. Oblik uzoraka i opterećenje [11].....   | 21 |
| Slika 15. Vlačna čvrstoća savijanjem [11].....  | 22 |
| Slika 16. Holcim pijesak 0-4 mm .....   | 26 |
| Slika 17. Holcim cement 42,5.....   | 27 |
| Slika 18. Miješalica za miješanje .....   | 29 |
| Slika 19. Ugrađeni cementni mort .....  | 29 |
| Slika 20. Usporedba rezultata ispitivanja gustoće.....  | 31 |
| Slika 21. Potresni stolić za ispitivanje konzistencije rasprostiranjem.....                           | 32 |
| Slika 22. Usporedba rezultata konzistencije metodom rasprostiranja.....                               | 33 |
| Slika 23. Usporedba konzistencije rasprostiranjem mješavine 0,5% SP (lijevo) i 1% SP (desno)<br>..... | 34 |
| Slika 24. Usporedba gustoća cementnih uzoraka .....   | 37 |
| Slika 25. Uređaj za ispitivanje čvrstoće na savijanje .....   | 38 |
| Slika 26. Uzorak nakon ispitivanja čvrstoće na savijanje.....   | 38 |
| Slika 27. Čvrstoća na savijanje za 2 dana stare uzorke .....  | 39 |
| Slika 28. Čvrstoća na savijanje za 7 dana stare uzorke .....  | 40 |
| Slika 29. Usporedba čvrstoća na savijanje uzoraka od 2 i 7 dana starosti .....                        | 42 |

|   |    |
|---|----|
| Slika 30. Ispitivanje tlačne čvrstoće.....                                | 43 |
| Slika 31. Uzorci nakon ispitivanja čvrstoće na tlak.....                  | 43 |
| Slika 32. Tlačna čvrstoća uzorka starosti 2 dana .....                    | 44 |
| Slika 33. Tlačna čvrstoća uzorka starosti 7 dana .....                    | 46 |
| Slika 34. Usporedba tlačnih čvrstoća uzoraka od 2 i 7 dana starosti ..... | 47 |

## 1. UVOD

Cementni mort jedan je od najvažnijih materijala u građevinskoj industriji zbog svoje široke primjene u zidarskim, završnim i konstrukcijskim radovima. Kvaliteta morta, koja se očituje u njegovim mehaničkim svojstvima, kao što su tlačna i vlačna čvrstoća, ali i obradivost, od presudne je važnosti za dugovječnost i stabilnost građevinskih konstrukcija. Kako bi se poboljšala svojstva svježeg i očvrstlog morta, te smanjila količina vode potrebne za postizanje željene konzistencije, često se koriste kemijski dodaci poznati kao superplastifikatori. Superplastifikatori omogućuju postizanje veće zbijenosti smjese uz manji vodocementni faktor, što rezultira boljim mehaničkim svojstvima i dugotrajnijom strukturom.

Cilj ovog završnog rada je istražiti i analizirati utjecaj različitih udjela superplastifikatora na mehanička i trajnosna svojstva cementnog morta. U tu svrhu, provedena su laboratorijska ispitivanja na uzorcima morta s dodatkom superplastifikatora u različitim omjerima, s posebnim naglaskom na mjerenje tlačne i vlačne čvrstoće, kao i konzistenciju svježeg morta. Uz to, ispitivana je i gustoća kako bi se dobili sveobuhvatni rezultati o kvaliteti cementnih mješavina s dodatkom superplastifikatora. Očekivano je da će rezultati istraživanja pružiti značajne podatke o prednostima i ograničenjima korištenja superplastifikatora u cementnim mješavinama te omogućiti bolje razumijevanje njihove uloge u poboljšanju trajnosti i otpornosti betona u građevinskim konstrukcijama.

## 2. OPĆENITO O BETONU I MORTU

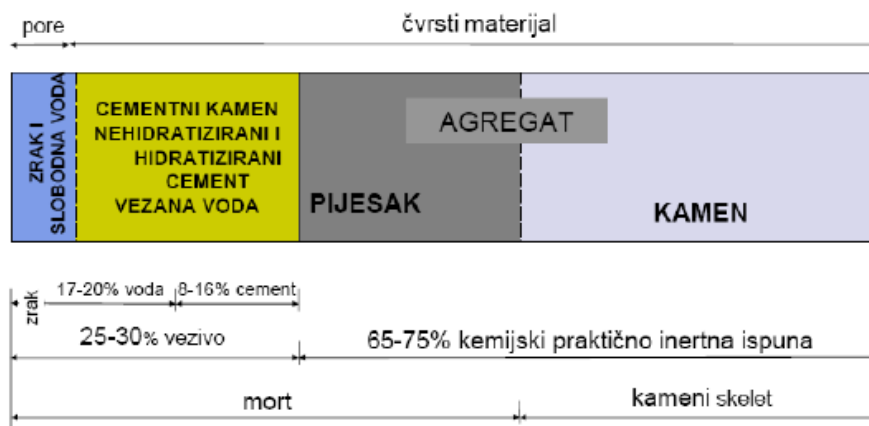
Beton je najčešće korišteni građevinski materijal na svijetu. Njegova glavna karakteristika je čvrstoća i dugotrajnost. U svježem stanju beton se može lako oblikovati, primjerice ulijevanjem u kalupe ili oplatu, a nakon stvrdnjavanja trajno zadržava svoj oblik. Zbog svojih povoljnih konstrukcijskih svojstava, postao je najrašireniji građevinski materijal današnjice.

Beton je kompozitni materijal koji se sastoji od cementa, agregata, vode i aditiva. Najčešći tip cementa je portland cement koji djeluje kao vezivo koje, u prisutnosti vode, prolazi kroz kemijsku reakciju poznatu kao hidratacija. Sastoji se od klinkera, mineralnih dodataka i male količine gipsa. Ova reakcija uzrokuje stvrdnjavanje i povezivanje agregata u čvrstu masu. Agregat čini od 60% do 80% volumena betona i dijeli se u frakcije kako bi se postiglo najbolje moguće zbijanje zrna s minimalnim prisustvom praznina (Slika 1). Frakcije su skupine zrna određene veličine, kao što su 0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm, 16-32 mm i druge. Prije proizvodnje betona, analizira se granulometrijski sastav kako bi se postigao što gušći raspored zrna, odnosno raspodjela veličine zrna koja daje minimalan broj šupljina među zrnima agregata u betonu. Za beton se koriste različite vrste agregata, uključujući prirodni agregat koji je agregat iz mineralnih nalazišta, umjetni agregat odnosno industrijski proizveden agregat koji je mineralnog podrijetla te reciklirani agregat koji je dobiven preradom anorganskih materijala poput betona, gume, opeke i sličnih materijala prethodno već korištenih u građevinarstvu. Važna svojstva agregata za primjenu u betonu uključuju oblik zrna, sastav zrna, udio sitnih čestica, sadržaj klorida, sulfata i sumpora, otpornost na drobljenje, habanje i ostalo [1].

U današnjoj proizvodnji betona koriste se razni aditivi odnosno kemijski dodaci betonu radi promjene ili poboljšanja svojstava. To su kemikalije koje se u značajno malim količinama (1 do 2% ukupne mase cementa) dodaju svježem betonu tokom njegovog miješanja. Neki od njih su aeranti, plastifikatori, superplastifikatori, usporivači i ubrzavači vezivanja. Također, postoje i mineralni dodaci betonu koji poboljšavaju njegovu ugradivost i doprinose postizanju većih čvrstoća betona kao što su silicijska prašina i leteći pepeo.

U usporedbi s betonom, cementni mort je manje čvrst materijal jer ne sadrži krupne agregate poput šljunka ili kamena. Također se koristi kao vezivni materijal u građevinarstvu te se sastoji od tri glavna sastojka: cementa, pijeska i vode. Cement djeluje kao vezivo koje drži pijesak zajedno, dok voda pokreće kemijsku reakciju poznatu kao hidratacija, koja uzrokuje

stvrđnjavanje smjese. Cementni mort se koristi u različitim građevinskim radovima, posebno tamo gdje je potrebna preciznost i obradivost, poput spajanja građevinskih materijala kao što su cigle ili blokovi, za žbukanje zidova te kao podloga za polaganje pločica. Kada se osuši, postaje čvrst i trajan, što osigurava stabilnost zidova ili površina. Fleksibilan je u svježem stanju, lako se nanosi, a nakon stvrđnjavanja pruža dobru otpornost na pritisak i habanje.



Slika 1. Sastav betona i volumni udio [2]

## **3. DODACI ZA BETON I NJIHOV UTJECAJ**

### **3.1. Kemijski dodaci za beton**

Dodaci za beton su kemijski spojevi koji se u malim količinama na masu cementa dodaju betonu tijekom miješanja kako bi se poboljšala ili prilagodila njegova svojstva. Koriste se kako bi se postigli specifični efekti u svježem ili očvrstnutom betonu, kao što su bolja obradivost, brže ili sporije vezivanje te povećana otpornost na vanjske uvjete. Neke od prednosti korištenja dodataka su poboljšanje obradivosti smjese, povećana otpornost na smrzavanje, vlagu i kemijske napade, omogućavanje preciznog upravljanja vremenom vezivanja te smanjenje rizika od pukotina i drugih oštećenja. Njihov utjecaj ovisi o svojstvima dodataka, agregata i cementa te o međusobnom odnosu komponenti. Dodaci se koriste u različitim vrstama betona kako bi se prilagodili specifičnim zahtjevima projekta i uvjetima gradnje.

### **3.2. Plastifikatori**

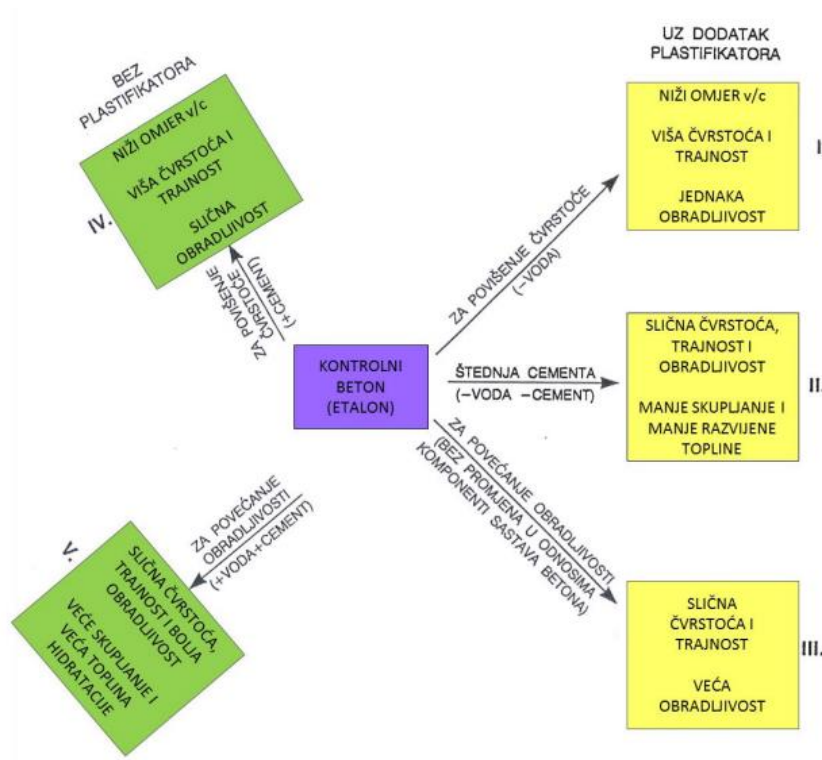
Plastifikatori su dodaci za beton koji poboljšavaju njegovu obradivost bez dodavanja prekomjerne količine vode u smjesu. Cilj plastifikatora je smanjenje trenja između čestica cementa i agregata, što omogućuje fluidniju smjesu, lakše rukovanje i ugradnju betona. U osnovi, oni djeluju na molekularnom nivou tako da omogućavaju bolje "klizanje" čestica u mješavini, smanjujući potrebu za vodom.

Jedan od utjecaja plastifikatora na svježi beton je povećana obradivost. Plastifikatori poboljšavaju fluidnost i konzistenciju svježeg betona, olakšavajući miješanje, transport i ulijevanje smjese u kalupe ili oplata. To omogućuje lakše rukovanje, čak i kod složenijih oblika i konstrukcija. Smanjenja potreba za vodom je također utjecaj plastifikatora na svježi beton. U svježem stanju plastifikatori omogućuju smanjenje količine vode potrebne za postizanje željene obradivosti, što sprječava segregaciju (odvajanje materijala) i stvaranje šupljina u betonskoj smjesi.

Utjecaj plastifikatora koji djeluje na očvrstnuli beton je povećana čvrstoća na tlak i na vlak. Zbog smanjene količine vode u betonskoj smjesi, plastifikatori pomažu u postizanju veće tlačne i



vlačne čvrstoće očvrnutog betona. Manje vode rezultira gušćom i kompaktnijom strukturom. Plastifikatori pridonose većoj trajnosti betona smanjenjem rizika od nastanka pukotina i osiguravaju veću otpornost na klimatske promjene. Smanjena poroznost je jedan od bitnih utjecaja. Manje vode znači manji broj kapilara unutar betona, što smanjuje njegovu poroznost i povećava otpornost na prodor vode, mraza i kemijskih agresivnih tvari (Slika 2).



Slika 2. Shematski prikaz načina i svrhe uporabe plastifikatora [3]

### 3.3. Superplastifikatori

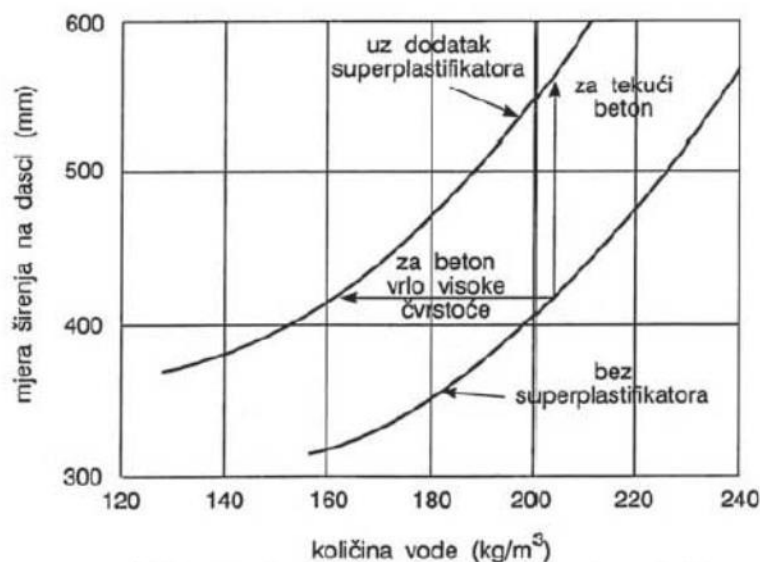
Superplastifikatori su napredniji oblik plastifikatora i spadaju u kategoriju visokoučinkovitih aditiva. Djeluju na sličan način kao plastifikatori, ali omogućuju drastičnije smanjenje količine vode potrebne za postizanje visoko obradive smjese. Oni omogućuju postizanje izuzetno fluidnog betona, zadržavajući ili čak povećavajući čvrstoću, trajnost i otpornost betona.

Superplastifikatori sprječavaju segregaciju svježeg betona, odnosno smanjuju rizik od segregacije agregata i izdvajanja cementne paste, osiguravajući ujednačenu smjesu. Svježem betonu daju stabilnost te pridonose zbijanju pod vlastitom težinom te samozaravnavanje (Slika

3). Značajan utjecaj imaju i na žitkost cementne paste, čineći svjež i beton izuzetno fluidnim i obradivim, bez potrebe za dodatkom vode. Ovaj efekt omogućuje superplastifikatorima da stvore betonsku smjesu koja se lako izlijeva i prilagođava najkompleksnijim oblicima, bez gubitka na čvrstoći što pomaže u složenim projektima gdje je potrebna visoka fluidnost i homogena distribucija betona.

Na očvrsnuli beton superplastifikatori utječu na poboljšanje otpornosti betona na cikluse smrzavanja i odmrzavanja, što ga čini izdržljivijim u teškim klimatskim uvjetima. Očvrsnuli beton s superplastifikatorima pokazuje smanjenu apsorpciju vode, čime se smanjuje rizik od oštećenja zbog mraza, erozije i kemijske agresije. Također, omogućuju postizanje betona s izuzetno niskim omjerom voda – cement te mu samim time daju veću trajnost, što rezultira vrlo visokom tlačnom čvrstoćom, većom nego kod betona s običnim plastifikatorima.

Plastifikatori i superplastifikatori igraju ključnu ulogu u modernoj proizvodnji betona, omogućujući prilagodbu njegovih svojstava prema potrebama specifičnih građevinskih projekata. Plastifikatori su praktični u standardnim građevinskim radovima, dok superplastifikatori nude napredne mogućnosti za visokozahtjevne projekte koji traže maksimalnu čvrstoću, dugotrajnost i prilagodljivost betonskih smjesa [3].



Slika 3. Odnos između konzistencije betona i količine vode za pripremu svježeg betona [4]

## 4. REZULTATI DOSADAŠNJIH ISTRAŽIVANJA UTJECAJA PLASTIFIKATORA I SUPERPLASTIFIKATORA

Članak "Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete", objavljen u časopisu "Construction and Building Materials" 2013. godine, istražuje utjecaj različitih tipova superplastifikatora na svojstva svježeg betona i reološka svojstva, kao i na tlačnu čvrstoću samozbijajućeg betona. U istraživanju su korištena četiri različita superplastifikatora s istom glavnom polimernom strukturom (Tablica 1), ali s različitim molekularnim težinama. Cilj je bio istražiti kako te varijacije utječu na svojstva betona.

Korišteni su različiti testovi, poput testa V-lijevka i reometra, za mjerenje viskoznosti i vremena tečenja betona. Testovi su pokazali da povećanje gustoće bočnih lanaca smanjuje plastičnu viskoznost betona, što omogućava bolji protok smjese. Također je utvrđeno da veća gustoća bočnih lanaca može smanjiti zadržavanje obradivosti smjese tijekom vremena, što može utjecati na sposobnost betona da popuni kalupe bez vibracija. To može biti dijelom zbog razlike između bočnih strana gustoće lanaca karboksilnih kiselina skupina primjesa i dijelom zbog doziranja smjese.

Uočeno je da različiti tipovi superplastifikatora imaju različite učinke na tlačnu čvrstoću betona, posebno u ranim fazama očvršćivanja što je prikazano na Slici 4. Najveće promjene u čvrstoći zabilježene su unutar prvih sedam dana, nakon čega se utjecaj superplastifikatora smanjuje. To sugerira da izbor superplastifikatora može biti ključan za postizanje željenih svojstava u ranim fazama. Istraživanje također ističe važnost kompatibilnosti između cementa i superplastifikatora. Ako nisu kompatibilni, smjesa može pokazati značajne gubitke u obradivosti, što može dovesti do lošije kvalitete betona. Jedan od superplastifikatora uzrokovao je najveći gubitak obradivosti, ali je također rezultirao najvišom tlačnom čvrstoćom u ranim fazama [5].

Tablica 1. Proporcije mješavina samozbijajućeg betona [5]

**Table 4**

Corrected mix proportions of the SCC mixtures (kg/m<sup>3</sup>).

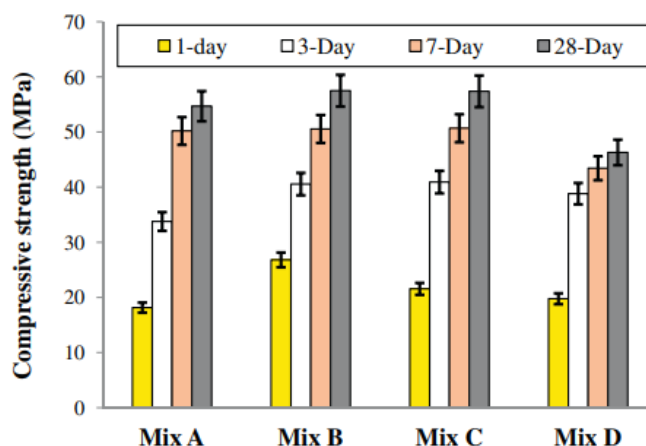
|                    | Cement | Water | LP <sup>b</sup><br>0–0.125(mm) | Aggregate |           | SP <sup>c</sup> | Unit weight |          |
|--------------------|--------|-------|--------------------------------|-----------|-----------|-----------------|-------------|----------|
|                    |        |       |                                | 0–5 (mm)  | 5–15 (mm) |                 | Theoretical | Measured |
| Mix A <sup>a</sup> | 465    | 186   | 173                            | 793       | 793       | 6.6             | 2338.4      | 2416.6   |
| Mix B <sup>a</sup> | 459    | 183   | 171                            | 783       | 783       | 6.1             | 2338.0      | 2385.1   |
| Mix C <sup>a</sup> | 461    | 184   | 172                            | 786       | 786       | 5.7             | 2337.6      | 2394.7   |
| Mix D <sup>a</sup> | 442    | 177   | 165                            | 754       | 754       | 7.4             | 2339.5      | 2299.4   |

<sup>a</sup> Each mixture contains a different type of superplasticizer admixture having modified polymer chain and structures.

<sup>b</sup> LP: limestone powder as filler.

<sup>c</sup> SP: superplasticizer admixture.

\*water – voda, unit weight – težina mješavina, theoretical – teorijska, measured – izmjerena



\*compressive strenght – tlačna čvrstoća

Slika 4. Tlačna čvrstoća samozbijajućeg betona u različitim vremenima [5]

Zaključci članka sugeriraju da optimizacija smjese betona zahtijeva pažljiv odabir superplastifikatora, uzimajući u obzir njihove kemijske karakteristike i specifične potrebe projekta. Autori preporučuju daljnja istraživanja kako bi se bolje razumjeli dugoročni učinci različitih superplastifikatora na trajnost i mehanička svojstva betona. U konačnici, rezultati ovog istraživanja pomažu u definiranju kriterija za odabir superplastifikatora za specifičnu uporabu takvog betona u građevinarstvu.

Članak “Effect of Superplasticizer Dosage on Workability and Strength Characteristics of Concrete” koji je objavljen u časopisu “Mechanical and Civil Engineering” u izdanju srpanj/kolovoz 2016. godine, istražuje utjecaj različitih doza superplastifikatora na svojstva svježeg i očvrstnalog betona. U ovom istraživanju, istraživači su ispitali učinke različitih doza superplastifikatora (400 ml, 600 ml, 800 ml, 100 ml i 1200 ml na 100 kg cementa) na betonske

smjese. Cilj je bio razumjeti kako različite doze utječu na svojstva betona, uključujući zadržavanje konzistencije i tlačnu čvrstoću tijekom vremena.

Eksperimentalni program uključivao je miješanje različitih betonskih smjesa i ispitivanja svojstava svježeg betona poput konzistencije slijeganjem i rasprostiranjem kao i svojstva očvrstlog betona poput tlačne čvrstoće. Korištena je vrsta superplastifikatora Glenium C380, koja je poznata po svojoj sposobnosti da poboljša i ranu i konačnu čvrstoću betona.

Kod ispitivanja slijeganjem (Slump testa) rezultati pokazuju da povećanje doze superplastifikatora u smjesi dovodi do povećanja obradivosti betona s konstantnim vodocementnim omjerom što je prikazano u Tablici 2. Jasno je prikazano da će se sa povećanjem količine superplastifikatora, povećati i slijeganje. Superplastifikator pomaže u zadržavanju betona u tekućem stanju dulje vrijeme i samim time reducira slijeganje tijekom transporta betona do potrebne lokacije.

*Tablica 2. Rezultati ispitivanja slijeganja betona [6]*

**Table 3 Slump Loss for Superplasticizer Concrete**

| Concrete mix                 | Slump (mm) |        |        |        |         |         |         |         |
|------------------------------|------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
|                              | 0 min      | 30 min | 60 min | 90 min | 120 min | 180 min | 240 min | 300 min |
| Control M                    | 40         | 35     | 20     | 10     | 0       | 0       | 0       | 0       |
| Control M1                   | 130        | 100    | 70     | 50     | 30      | 15      | 10      | 0       |
| 400ml/100 kg of cement(MS1)  | 150        | 110    | 80     | 60     | 35      | 20      | 10      | 0       |
| 600ml/100 kg of cement(MS2)  | 160        | 140    | 90     | 65     | 35      | 25      | 13      | 0       |
| 800ml/100 kg of cement(MS3)  | 165        | 140    | 110    | 95     | 73      | 50      | 20      | 0       |
| 1000ml/100 kg of cement(MS4) | 170        | 150    | 140    | 115    | 65      | 47      | 15      | 0       |
| 1200ml/100 kg of cement(MS5) | 190        | 170    | 155    | 123    | 76      | 52      | 25      | 10      |

\*slump loss for superplasticizer concrete – slijeganje betona sa superplastifikatorom, concrete mix – mješavina betona, slump - slijeganje

Ispitivanje konzistencije rasprostiranjem (Flow test) služi za provjeru obradivosti i kohezivnosti betona. Promjer širenja betona smanjuje se s vremenom što je razumljivo pošto beton s vremenom gubi obradivost što je vidljivo u Tablici 3. Zaključak je da superplastifikator značajno povećava promjer rasprostiranja unutar prva dva sata, a zatim, nakon vezivanja betona, njegov učinak nestaje.

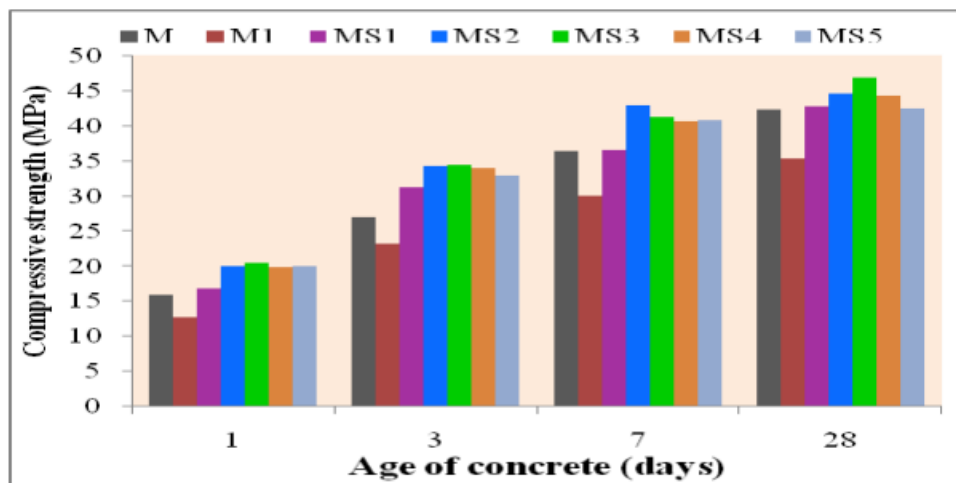
Tablica 3. Rezultati ispitivanja rasprostiranja betona [6]

**Table 4 Flow Table for Superplasticizer Concrete**

| Concrete mix            | Flow table (mm) |        |        |        |         |         |         |         |
|-------------------------|-----------------|--------|--------|--------|---------|---------|---------|---------|
|                         | 0 min           | 30 min | 60 min | 90 min | 120 min | 180 min | 240 min | 300 min |
| Control M               | 350             | 340    | 330    | 320    | 320     | 320     | 320     | 320     |
| Control M1              | 450             | 440    | 395    | 375    | 350     | 330     | 330     | 330     |
| 400ml/100 kg of cement  | 470             | 440    | 410    | 370    | 360     | 340     | 340     | 340     |
| 600ml/100 kg of cement  | 510             | 450    | 400    | 380    | 360     | 350     | 350     | 350     |
| 800ml/100 kg of cement  | 530             | 500    | 480    | 450    | 420     | 400     | 390     | 380     |
| 1000ml/100 kg of cement | 580             | 520    | 480    | 450    | 420     | 400     | 390     | 380     |
| 1200ml/100 kg of cement | 650             | 600    | 540    | 470    | 400     | 385     | 380     | 380     |

\*flow table for superplasticizer concrete - rasprostiranje betona sa superplastifikatorom, concrete mix – betonska mješavina, flow table - rasprostiranje

Proučavajući tlačnu čvrstoću betona rezultati su pokazali da se ona raste s povećanjem doze superplastifikatora (Slika 5). Najveće povećanje tlačne čvrstoće primijećeno je unutar prvih sedam dana nakon lijevanja, dok su nakon 28 dana sve smjese pokazale poboljšanja, ali s manjim razlikama između različitih doza superplastifikatora. To sugerira da, iako superplastifikatori poboljšavaju rane performanse betona, njihova učinkovitost može varirati ovisno o dozi i uvjetima stvrdnjavanja. Također su istražili učinke superplastifikatora na konzistenciju betona tijekom vremena. Rezultati pokazuju da veće doze superplastifikatora produžuju vrijeme očvršćivanja betona, omogućujući dulje vrijeme obrade, što je ključno za velike građevinske projekte. Međutim, prekomjerna uporaba superplastifikatora može dovesti do povećane sklonosti segregaciji i krvarenju betona, što može utjecati na konačnu kvalitetu i čvrstoću betonskih elemenata [6].



**Figure 3** Compressive Strength of Concrete with Different Dosages of Superplasticizer

\*compressive strenght – tlačna čvrstoća, age of concrete – starost betona

Slika 5. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće [6]

Na kraju, studija potvrđuje da superplastifikatori mogu značajno poboljšati performanse betona, ali njihova uporaba mora biti pažljivo kontrolirana i prilagođena kako bi se postigli najbolji rezultati. Učinkovitost superplastifikatora također ovisi o omjeru vode i cementa, tipu cementa i specifičnim zahtjevima projekta.

## **5. METODE ISPITIVANJA SVOJSTVA SVJEŽEG BETONA**

Svojstva svježeg betona su ključna za razumijevanje njegovog ponašanja prilikom ugradnje i prije stvrdnjavanja. Ona određuju kako se beton može rukovati, transportirati, postavljati i završno obraditi.

Jedno od osnovnih potrebnih svojstva svježeg betona je fluidnost. Fluidnost se odnosi na sposobnost svježeg betona da lako teče i popuni kalupe ili oblike bez potrebe za vibracijama ili drugim metodama zbijanja. To je ključno svojstvo posebno za beton, koji mora biti dovoljno tečan da se samostalno rasporedi po kalupu, popuni sve praznine i obuhvati armaturu bez segregacije ili krvarenja. Fluidnost se često mjeri pomoću V-lijevka ili L-kutije u laboratorijskim uvjetima kako bi se utvrdila sposobnost betona da teče kroz uske prostore ili oko prepreka. Veća fluidnost omogućava lakšu ugradnju betona, posebno u složenim konstrukcijama ili mjestima s ograničenim pristupom, ali prevelika fluidnost može dovesti do problema sa segregacijom i stabilnošću smjese.

Zbijenost se odnosi na sposobnost betonske smjese da se zbiju čestice kako bi se postigla maksimalna gustoća i minimalna poroznost. Zbijenost je važna za postizanje čvrstoće i izdržljivosti betona jer smanjuje količinu zraka i praznina unutar smjese, što može oslabiti beton i povećati rizik od oštećenja uslijed zamrzavanja, otapanja i kemijskih napada. Zbijenost se može poboljšati mehaničkim vibriranjem ili korištenjem dodataka kao što su superplastifikatori koji smanjuju viskoznost smjese i olakšavaju zbijanje. Dobra zbijenost osigurava bolju adheziju između cementne paste i agregata, što rezultira homogenijom i gušćom strukturom betona.

Kohezivnost svježeg betona odnosi se na sposobnost smjese da ostane zajedno bez segregacije. Kohezivnost je važna kako bi se osigurala ravnomjerna raspodjela čestica cementa i agregata, što rezultira homogenošću smjese i optimalnim mehaničkim svojstvima u stvrdnutom stanju.

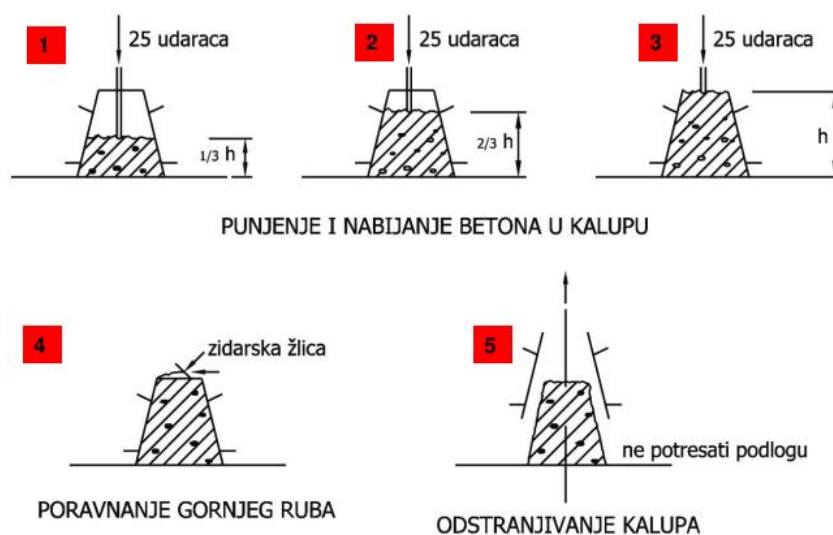
### **5.1. Ispitivanje svježeg betona slijeganjem**

Ispitivanje svježeg betona slijeganjem prema normi HRN EN 12350-2, poznato i kao "slump test", je standardizirani postupak kojim se određuje konzistencija svježeg betona. Ovaj test



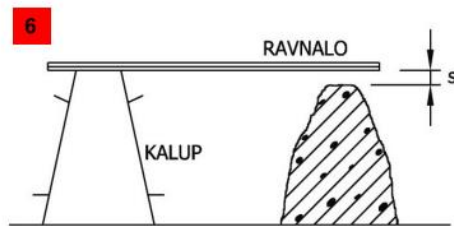
mjeri sposobnost betona da zadrži oblik nakon uklanjanja standardiziranog kalupa. Za ispitivanje je potrebna specifična oprema koja uključuje metalni kalup za slijeganje u obliku stošca, koji se naziva Abramsov kalup, čeličnu zbijalicu, ravnu i čvrstu podlogu te mjerne alate za određivanje visine slijeganja.

Postupak počinje pripremom kalupa, koji se postavlja na ravnu i čvrstu podlogu te mora biti čist i suh. Kalup se puni svježim betonom u tri sloja, pri čemu svaki sloj zauzima približno jednu trećinu visine kalupa. Nakon punjenja prvog sloja, on se zbjija s 25 udaraca zbijalicom ravnomjerno raspoređenih po površini sloja. Zatim se dodaje drugi sloj betona do dvije trećine visine kalupa, nakon čega se ponovno zbijanjem s 25 udaraca osigurava dobra homogenost između slojeva. Treći sloj betona se dodaje do vrha kalupa i ponovno zbijanje se vrši s 25 udaraca što je prikazano u Slici 6.



Slika 6. Postupak ispitivanja slijeganja [7]

Nakon što je kalup napunjen i beton izravan s vrhom kalupa, kalup se pažljivo podiže ravnomjerno prema gore, bez zatezanja ili rotacije, u trajanju od 5 do 10 sekundi. Kada se kalup ukloni, mjeri se visina slijeganja, što je razlika između visine kalupa i najviše točke slegnutog betona (Slika 7). Ovaj rezultat se bilježi u milimetrima i pokazuje konzistenciju betonske smjese, koja može varirati od vrlo suhe smjese s niskim slijeganjem do vrlo vlažne smjese s visokim slijeganjem.



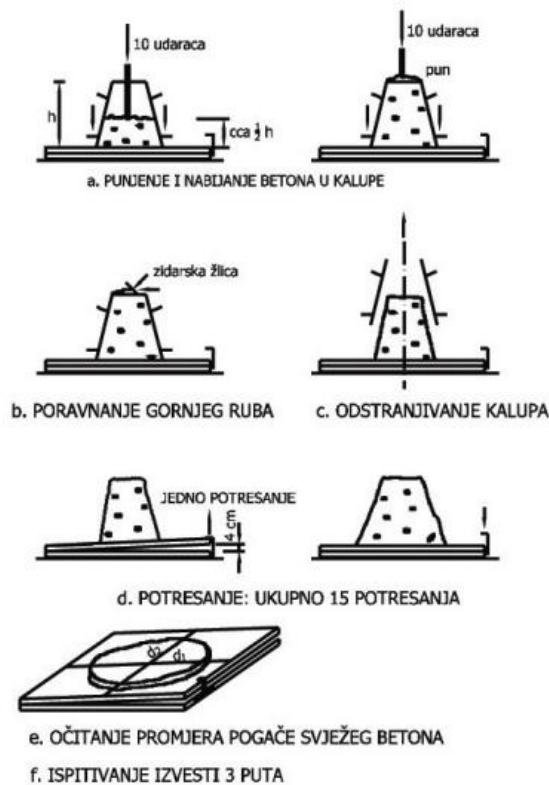
Slika 7. Rezultat ispitivanja: slijeganje,  $s$  (mm) [7]

Ispitivanje treba provesti brzo nakon pripreme betona kako bi se izbjeglo isparavanje vode i promjene u konzistenciji, a preporučuje se obavljanje testa na zaštićenom mjestu daleko od izravnog sunca i vjetra kako bi se spriječilo brzo isparavanje vode. Ovaj postupak je ključan za kontrolu kvalitete betona i osiguranje da smjesa ima odgovarajuća svojstva za planirane građevinske radove [7], [8].

## 5.2. Ispitivanje svježeg betona rasprostiranjem

Ispitivanje svježeg betona rasprostiranjem prema normi HRN EN 12350-4, poznato i kao "flow table test", koristi se za određivanje konzistencije betonske smjese, posebno za betone koji imaju veću radnu sposobnost ili koji su tekući. Ovaj test mjeri koliko se svježi beton širi kada se ispusti na vibrirajuću ploču, čime se procjenjuje njegova obradivost i lakoća ugrađivanja. Za provođenje ovog ispitivanja potrebna je određena oprema, uključujući ravnu metalnu ploču koja može vibrirati ili se naglo podizati, stožasti kalup visine 200 mm s unutarnjim promjerom od 100 mm na vrhu i 200 mm na dnu, te metalnu ili drvenu zbijalicu. Test se izvodi na ravnoj, čvrstoj i nepropusnoj površini.

Postupak započinje postavljanjem stožastog kalupa u sredinu ploče koja se koristi za ispitivanje. Kalup se zatim puni svježim betonom u dva jednaka sloja. Nakon punjenja prvog sloja, beton se zbija s 10 udaraca zbijalicom ravnomjerno raspoređenih po površini sloja. Zatim se dodaje drugi sloj betona do vrha kalupa, nakon čega se ponavlja zbijanje s 10 udaraca kako bi se osiguralo dobro sjedinjavanje između slojeva. Višak betona se odstrani zidarskom žlicom ili drugom ravnom alatkom, kako bi se površina izravnala s rubom kalupa (Slika 8).



Slika 8. Postupak ispitivanja rasprostiranja [7]

Nakon što je beton izravan, kalup se pažljivo podiže vertikalno prema gore bez ikakvog zatezanja ili rotacije, omogućujući betonu da se slobodno širi po površini ploče. Ploča se zatim podiže i spušta ili vibrira određen broj puta prema standardiziranom postupku, kako bi se omogućilo da se beton dalje rasprostire. Nakon završetka vibriranja ili podizanja i spuštanja ploče, mjeri se promjer raširenog betona u dva međusobno okomita smjera preko slijedeće formule (1):

$$d = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (1)$$

gdje je  $d$  promjer rasprostiranja ( $mm$ ),  $d_1$  najveći promjer raširenog betona ( $mm$ ) i  $d_2$  promjer raširenog betona za  $90^\circ$  u odnosu na  $d_1$  ( $mm$ ) [7].

Rezultati ovog testa se izražavaju u milimetrima i pokazuju koliko se beton rasprostire pod vlastitom težinom. Veća vrijednost rasprostiranja ukazuje na tekuću smjesu s visokom obradivošću, dok manja vrijednost ukazuje na gušću smjesu s nižom obradivošću. Ispitivanje se treba provesti brzo nakon pripreme betona kako bi se izbjeglo isparavanje vode i promjene u konzistenciji smjese.

### 5.3. Vebe postupak

Ispitivanje svježeg betona metodom "Vebe" prema normi HRN EN 12350-3 koristi se za određivanje konzistencije betonskih smjesa koje su previše suhe ili krute za druge metode. Ova metoda je posebno pogodna za betone s niskim sadržajem vode. Za ispitivanje je potreban Vebe uređaj (Slika 9), koji se sastoji od vibracijske platforme, prozirnog kalupa i metalnog poklopca. Postupak započinje postavljanjem stožastog kalupa na vibracijsku platformu, koji se zatim puni svježim betonom u tri sloja, pri čemu se svaki sloj zbija s 25 udaraca zbijalicom. Nakon punjenja i zbijanja, kalup se pažljivo uklanja, ostavljajući betonski stožac u prozirnog kalupu.



Slika 9. Vebe aparat [9]

Platforma se zatim vibrira sve dok beton ne postigne ravnu površinu u kontaktu s poklopcem. Vrijeme potrebno za ovaj proces, poznato kao "Vebe vrijeme", mjeri se kronometrom i izražava u sekundama. Kraće Vebe vrijeme označava veću obradivost smjese, dok duže vrijeme ukazuje na gušću smjesu. Ovaj test je ključan za betone s niskom razinom vode i visokom čvrstoćom, osiguravajući da smjesa ima odgovarajuća svojstva za specifične primjene.

#### 5.4. Stupanj zbijenosti po Walzu

Stupanj zbijenosti betona po Waltzu prema normi HRN EN 12350-4 koristi se za procjenu sposobnosti svježeg betona da se zbije pod vlastitom težinom. Ovaj test je posebno koristan za smjese s nižim udjelom vode i visokom gustoćom, koje su previše krute za testove poput ispitivanja slijeganjem. Za ispitivanje je potreban Waltz kontejner, prikazan na Slici 10, koji je cilindričnog oblika i izrađen je od metala s unaprijed definiranim dimenzijama (visina oko 300 mm i promjer 200 mm). Postupak započinje stavljanjem svježeg betona u Waltz kontejner u dva sloja, bez dodatnog sabijanja. Nakon što se napuni, površina betona se izravnavava. Zatim se kontejner pažljivo podiže vertikalno, omogućujući betonu da se slegne pod vlastitom težinom. Nakon što se beton slegne, mjeri se visina betona prije i nakon podizanja kontejnera. Ove visine koriste se za izračunavanje stupnja zbijenosti, što je omjer između početne visine betona prije podizanja kontejnera i visine nakon podizanja.



Slika 10. Waltzov kontejner [10]

Stupanj zbijenosti daje uvid u gustoću i radnu sposobnost betonske smjese. Viši stupanj zbijenosti ukazuje na bolju sposobnost betona da se zbije i ispuni kalup, što je ključno za osiguranje homogenosti i čvrstoće gotovog betona. Ovaj test je osobito važan za betone koji se koriste u konstrukcijama koje zahtijevaju visoku čvrstoću i minimalnu poroznost.

## 6. METODE ISPITIVANJA SVOJSTVA OČVRSLOG BETONA

Svojstva očvrslog betona važna su za razumijevanje i projektiranje betonskih konstrukcija, jer utječu na performanse i dugotrajnost betona u različitim uvjetima. Svojstva su određena tlačnom čvrstoćom, vlačnom čvrstoćom, gustoćom, modulom elastičnosti, skupljanjem i puzanjem i ostalim trajnosnim svojstvima.

Tlačna čvrstoća betona odnosi se na njegovu sposobnost da izdrži pritisak bez pucanja i smatra se najvažnijim svojstvom jer određuje nosivost konstrukcije. Vlačna čvrstoća, koja je značajno manja od tlačne, opisuje otpornost betona na sile koje ga pokušavaju razvući ili slomiti, što je razlog zašto se beton često armira čelikom. Gustoća betona, izražena u kilogramima po kubičnom metru, utječe na težinu i toplinske karakteristike konstrukcije. Modul elastičnosti je mjera krutosti betona i njegove sposobnosti deformiranja pod opterećenjem; viši modul znači da će beton manje mijenjati oblik pod pritiskom.

Skupljanje se odnosi na smanjenje volumena betona tijekom sušenja, dok puzanje označava postepenu deformaciju pod stalnim opterećenjem, a oba ova fenomena mogu uzrokovati pukotine i deformacije ako se ne kontroliraju pravilno. Vodopropusnost je sposobnost betona da propušta vodu pod tlakom; niža vodopropusnost pomaže u očuvanju trajnosti betona smanjujući rizik od korozije i prodora štetnih tvari. Otpornost na smrzavanje, posebno u uvjetima korištenja soli za odmrzavanje, važna je za izdržljivost betona jer se odnosi na njegovu sposobnost da podnosi ponovljene cikluse smrzavanja i odmrzavanja bez značajnog oštećenja. Svojstva poput vodopropusnosti i otpornosti na smrzavanje ključna su za dugotrajnost betonskih konstrukcija, osobito u ekstremnim klimatskim uvjetima.

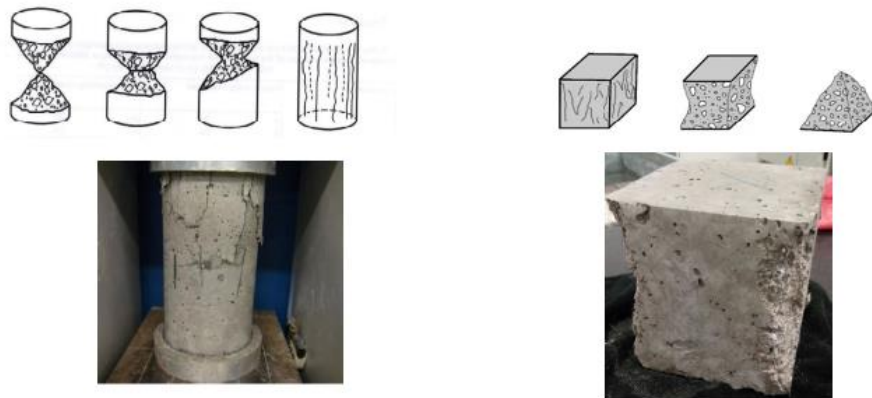
### 6.1. Razorno ispitivanje očvrslog betona

#### 6.1.1. *Ispitivanje tlačne čvrstoće*

Ispitivanje tlačne čvrstoće betona prema normi HRN EN 12390-3 koristi se za određivanje sposobnosti betona da izdrži pritisak prije nego što dođe do loma. Ovaj test se provodi na standardiziranim uzorcima betona u obliku kocki ili valjaka. Za ispitivanje tlačne čvrstoće, uzorci se pripremaju, lijevaju u kalupe i njeguju na propisani način. Najčešće se ispitivanje vrši

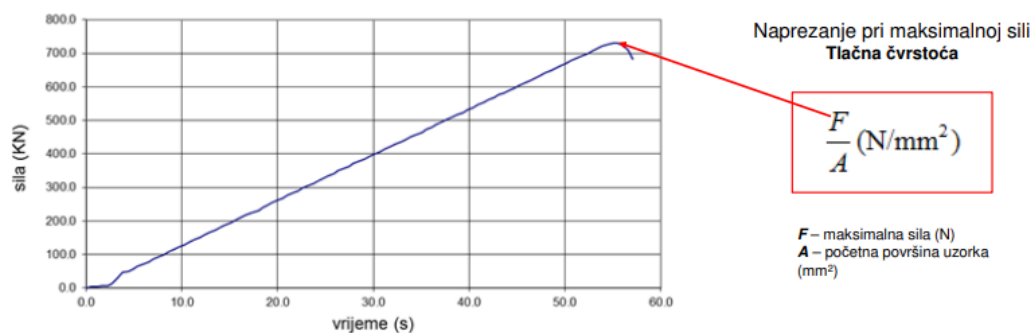
na uzorcima u dobi od 28 dana, jer se tada smatra da beton postiže svoju karakterističnu čvrstoću.

Uzorci se pripremaju u kalupima standardnih dimenzija (npr. Kocke  $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$  ili valjka promjera  $150 \text{ mm}$  i visine  $300 \text{ mm}$ ) (Slika 11). Nakon njege uzoraka u vodi ili u vlažnoj komori, oni se podvrgavaju ispitivanju tlačne čvrstoće pomoću preše koja primjenjuje tlak na uzorak sve do loma. Opterećenje se ravnomjerno povećava tijekom ispitivanja, a maksimalno opterećenje koje uzorak može izdržati bilježi se kao rezultat.



Slika 11. Oblici sloma [11]

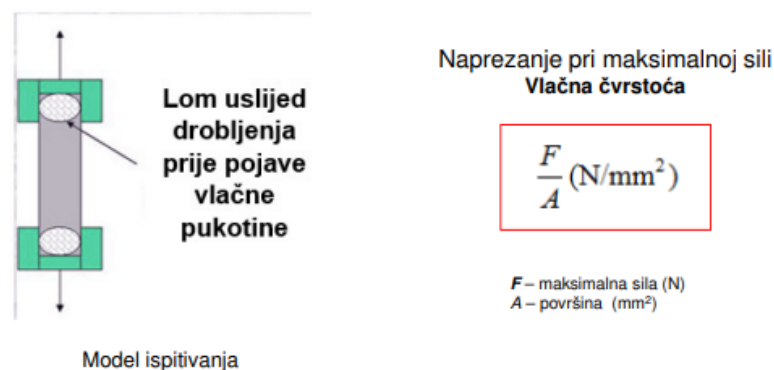
Tlačna čvrstoća izračunava se kao omjer maksimalne sile primijenjene na uzorak i površine uzorka na koju je sila primijenjena kao što je prikazano na Slici 12. Za razrede tlačnih čvrstoća betona, prema normi HRN EN 206, razlikuju se tlačne čvrstoće betonskih valjaka ( $f_{ck,cyl}$ ) i betonskih kocki ( $f_{ck,cube}$ ), pri čemu je čvrstoća kocke obično veća zbog različitog stanja naprezanja [11], [12].



Slika 12. Rezultat ispitivanja [11]

### 6.1.2. Ispitivanje direktne vlačne čvrstoće

Ova metoda se rijetko koristi zbog složenosti pripreme i prihvata uzoraka. Test mjeri izravno naprezanje u vlačnoj osovini, pri čemu se uzorak, obično u obliku kocke ili valjka, podvrgava sili koja ga pokušava razvući do loma. Uzorak se postavlja u prešu koja primjenjuje vlačnu silu duž uzdužne osi uzorka (Slika 13). Ova metoda je najtočnija za određivanje vlačne čvrstoće, ali se rijetko koristi zbog praktičnih poteškoća u laboratorijskim uvjetima [11].



Slika 13. Ispitivanje direktne vlačne čvrstoće [11]

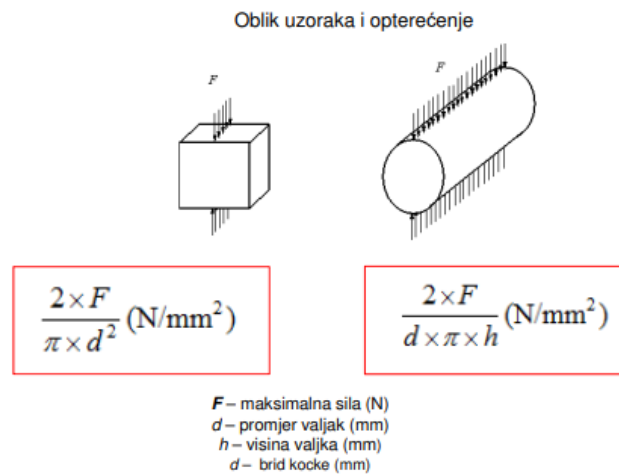
### 6.1.3. Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem

Ispitivanje vlačne čvrstoće cijepanjem, prema normi HRN EN 12390-6, koristi se za indirektno određivanje vlačne čvrstoće betona. Ova metoda je popularna jer je relativno jednostavna za provođenje i daje pouzdane rezultate. Za ispitivanje se koriste valjkasti uzorci ili kocke. Valjkasti uzorci obično imaju promjer od 150 mm i visinu od 300 mm, dok kocke imaju dimenzije 150 × 150 × 150 mm (Slika 14).

Postupak ispitivanja započinje postavljanjem uzorka na tlačnu prešu, s tim da se valjak postavlja tako da je njegova osovina horizontalna, a opterećenje se primjenjuje duž izvodnice valjka. U slučaju kockastih uzoraka, sila se primjenjuje duž središta baze kocke. Prilikom primjene opterećenja, dolazi do pojave naprezanja okomitih na smjer djelovanja sile. Ova naprezanja uzrokuju pucanje uzorka duž njegovog vertikalnog promjera ili središta baze, stvarajući jasnu rascjepnu liniju. Puknuće uzorka nastaje zbog vlačnih naprezanja koja se razvijaju unutar betona pod djelovanjem tlačnog opterećenja. Testiranje se nastavlja sve dok



uzorak ne pukne, a maksimalna sila pri kojoj dolazi do loma bilježi se i koristi za izračunavanje vlačne čvrstoće cijepanjem.



Slika 14. Oblik uzoraka i opterećenje [11]

Ova metoda je korisna jer se naprezanja ravnomjerno raspoređuju duž središnje linije uzorka, što omogućuje preciznije određivanje vlačne čvrstoće. Vlačna čvrstoća cijepanjem obično je veća od izravno mjerene vlačne čvrstoće jer se radi o indirektnoj metodi koja koristi tlačna opterećenja za stvaranje vlačnih naprezanja [11].

#### **6.1.4. Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem**

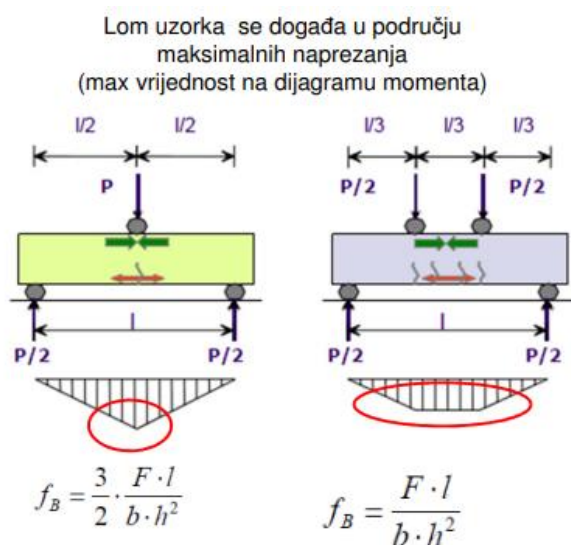
Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem, prema normi HRN EN 12390-5, koristi se za određivanje otpornosti betona na savijanje i vlačna naprezanja koja nastaju pri savijanju. Ova metoda se najčešće primjenjuje za betonske prizme ili grede standardnih dimenzija, kao što su 100 × 100 × 400 mm, 100 × 100 × 500 mm ili 150 × 150 × 600 mm.

Prizme se postavljaju na dva oslonca, a opterećenje se primjenjuje u sredini gdje i djeluje koncentrirana sila ili na dvije točke između oslonaca gdje se one simetrično primjenjuju između oslonaca. Tijekom ispitivanja, primijenjena sila stvara savojni moment u uzorku, što uzrokuje razvoj vlačnih naprezanja na donjoj strani uzorka (ispod neutralne osi) i tlačnih naprezanja na gornjoj strani uzorka (iznad neutralne osi). Puknuće uzorka nastaje kada vlačna naprezanja na donjoj strani postanu veća od vlačne čvrstoće betona.

Savijanje uzorka uzrokuje maksimalna naprezanja na donjoj strani, gdje dolazi do loma uzorka. Maksimalna sila pri kojoj dolazi do loma bilježi se i koristi za izračunavanje vlačne čvrstoće savijanjem što je prikazano na Slici 15 pomoću sljedeće formule (2):

$$f_B = \frac{3}{2} \cdot \frac{F \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (2)$$

gdje je  $f_B$  vlačna čvrstoća savijanjem,  $F$  maksimalna sila primijenjena na uzorak ( $N$ ),  $l$  razmak oslonaca ( $mm$ ),  $b$  širina poprečnog presjeka uzorka ( $mm$ ) i  $h$  visina poprečnog presjeka uzorka ( $mm$ ) [8].



Slika 15. Vlačna čvrstoća savijanjem [11]

Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem daje veće vrijednosti čvrstoće u usporedbi s drugim metodama jer savijanje uzorka uzrokuje složenije stanje naprezanja, uključujući i vlačna i tlačna naprezanja.

## 6.2. Nerazorno ispitivanje očvrslog betona

### 6.2.1. Ispitivanje betona sklerometrom

Ispitivanje sklerometrom, također poznato kao ispitivanje tvrdoće površine, koristi udarni čekić (sklerometar) za procjenu tlačne čvrstoće betona na temelju povratnog odskoka klipa. Udarni čekić pritisne se okomito na površinu betona, a zatim se oslobađa opruga koja udara klip o površinu betona. Veličina povratnog odskoka klipa ovisi o tvrdoći i elastičnosti betona, a

očitava se na skali sklerometra. Postupak se ponavlja nekoliko puta na različitim mjestima na betonskoj površini, a dobivene vrijednosti se koriste za procjenu prosječne tlačne čvrstoće betona pomoću baždarene krivulje. Ova metoda je jednostavna i brza, ali može biti podložna varijacijama zbog uvjeta površine, prisutnosti agregata i homogenosti betona.

### **6.2.2. Ispitivanje betona ultrazvukom**

Ispitivanje ultrazvukom koristi ultrazvučne valove za procjenu homogenosti i kvalitete betona. Ultrazvučni valovi se šalju kroz beton pomoću dviju sondi (odašiljača i prijarnika) postavljenih na suprotne strane betonskog elementa. Brzina kojom valovi prolaze kroz beton ovisi o njegovoj gustoći i elastičnosti; brže brzine ukazuju na gušći i homogeniji beton s manjim brojem pukotina ili poroznosti. Rezultati ultrazvučnog ispitivanja daju uvid u unutarnju strukturu betona i mogu otkriti prisutnost šupljina, pukotina, segregacije, ili drugih oštećenja. Metoda je vrlo osjetljiva i precizna, ali zahtijeva dobar kontakt između sondi i površine betona, što može biti izazovno kod hrapavih ili neravnih površina.

### **6.2.3. Ispitivanje betona metodom rezonantne frekvencije**

Ispitivanje metodom rezonantne frekvencije temelji se na mjerenju prirodne frekvencije vibracija betonskog uzorka. Uzorak betona se postavlja u uređaj koji ga pobuđuje na vibracije. Prirodna frekvencija vibracija ovisi o elastičnim svojstvima i gustoći betona. Promjena u rezonantnoj frekvenciji može ukazivati na promjene u krutosti, prisutnost pukotina ili promjene u sastavu betona. Ova metoda je korisna za procjenu modula elastičnosti betona i praćenje promjena u njegovim svojstvima tijekom vremena. Ispitivanje rezonantnom frekvencijom može se koristiti na betonskim uzorcima ili na stvarnim konstrukcijama, ali zahtijeva specijaliziranu opremu i može biti osjetljivo na vanjske vibracije i uvjete okoliša.

## **6.3. Razlike između ispitivanja svojstava cementnog morta i betona**

Ispitivanja svojstava cementnog morta i betona imaju sličan cilj, ocjenu obradivosti i mehaničkih svojstava, ali se razlikuju zbog različitog sastava i primjene ovih materijala.

Cementni mort se sastoji od cementa, pijeska i vode, dok beton sadrži i krupni agregat poput šljunka ili drobljenog kamena, što rezultira različitim metodama ispitivanja i karakteristikama.

Kod ispitivanja svježeg cementnog morta, koristi se metoda rasprostiranja na stoliću za potresanje, pri čemu se mjeri konzistencija finog materijala bez prisutnosti krupnog agregata što je detaljnije opisano u poglavlju 8.2. Ova metoda osigurava precizno mjerenje obradivosti morta, a smjesa se uglavnom koristi za vezivne i završne slojeve. Nasuprot tome, svježi beton ispituje se metodama kao što su ispitivanje slijeganja stošca ili rasprostiranje betona na stolu za vibracije, jer se teže konzistencije s krupnim agregatom ne mogu pouzdano mjeriti metodama namijenjenim za mort. Beton, zbog prisutnosti krupnih čestica agregata, zahtijeva veću kontrolu u pogledu obradivosti kako bi se postigla pravilna ugradnja u oplatu.

Ispitivanje gustoće provodi se i za svježi mort i za beton, no zbog odsustva krupnog agregata, cementni mort ima znatno manju gustoću. U betonu, krupni agregat zauzima veći volumen, što doprinosi većoj gustoći i čvrstoći u očvrslom stanju. Kod morta se također ispituje sposobnost zadržavanja vode, koja osigurava pravilno hidriranje cementa i smanjuje rizik od stvaranja pukotina tijekom očvršćivanja, dok se kod betona ovaj parametar manje naglašava jer krupni agregat smanjuje potrebu za kontrolom zadržavanja vode.

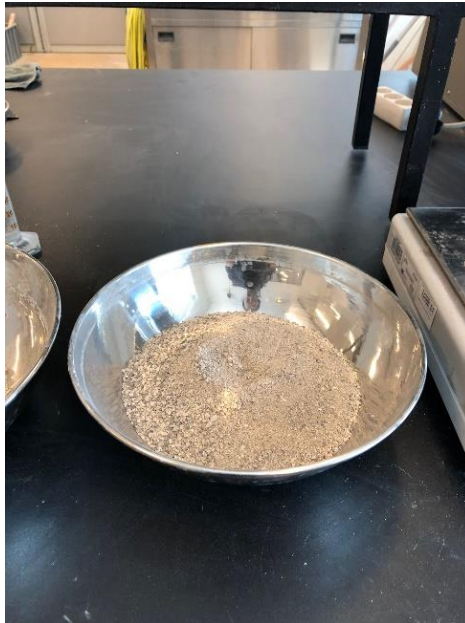
Kada je riječ o ispitivanju očvrslulih svojstava, obje smjese ispituju se na tlačnu i vlačnu čvrstoću, no razlika je u veličini uzoraka. Cementni mort se ispituje na manjim prizmama dimenzija 40 x 40 x 160 mm što je detaljnije opisano u poglavlju 9, dok se beton ispituje na uzorcima većih dimenzija, poput kocki ili cilindara. U cementnom mortu, bez prisutnosti krupnog agregata, vlačna i tlačna naprezanja djeluju izravno na cementnu pastu i pijesak, dok u betonu krupni agregat preuzima veći dio naprezanja, povećavajući ukupnu čvrstoću.

Iako se cementni mort i beton ispituju na slične parametre, kao što su tlačna čvrstoća, vlačna čvrstoća, konzistencija i gustoća, razlike u njihovom sastavu zahtijevaju prilagodbu metoda ispitivanja. Cementni mort koristi se za finije radove i žbuku, stoga su uzorci manji, a fokus je na obradivosti i sposobnosti zadržavanja vode. Beton, s druge strane, zahtijeva veće uzorke i rigoroznije testove zbog svoje nosive funkcije i primjene u vanjskim uvjetima.

## 7. MATERIJALI I IZRADA CEMENTNIH MJEŠAVINA

Ovim radom istražuje se utjecaj superplastifikatora na mehanička svojstva morta. Cilj istraživanja je analizirati utjecaj superplastifikatora na svojstva svježeg i očvrslog morta na 2 i 7 dana starim uzorcima s različitim udjelima superplastifikatora od 0,5% i 1% obzirom na masu cementa. U ovom istraživanju izrađeno je osam mješavina cementnog morta, koje su se izrađivale u skladu s normom HRN EN 196-1 te su se sastojale od standardnog sastava cementa, pijeska i vode u omjeru od 1:3:0,5 uz dodatak aditiva. Izradile su se dvije referentne mješavine standardnog sastava cementa, pijeska i vode, dvije mješavine sa dodatkom superplastifikatora od 0,5% od ukupne mase cementa koji se dodao u vodu prije miješanja sastojka. Zatim, dvije mješavine sa dodatkom superplastifikatora od 1% od mase cementa, koji se također dodao u vodu prije miješanja sastojka, i dvije mješavine sa dodatkom od 0,5% superplastifikatora koji se naknadno dodao u posudu za miješanje nakon što su se izmiješali standardni sastojci.

Za izradu mješavine koristio se pijesak tvrtke Holcim d.o.o., proizveden u Hrvatskoj, granulacije 0-4 mm (Slika 16). Prednosti korištenja Holcim proizvoda su odlična obradivost morta koja omogućuje produženo vrijeme rada, što olakšava pripremu većih količina smjese i omogućuje lakši rad bez potrebe za naknadnim dolijevanjem vode. Mort i žbuka se bolje prijanjaju za podlogu. Zbog povećane sposobnosti zadržavanja vode smanjuje se mogućnost pojave pukotina i kasnijeg "iscvjetavanja". Vodonepropusnost je također poboljšana jer vapnenac zatvara pore u cementnoj pasti, povećava gustoću i stvara kompaktniju mikrostrukturu, što smanjuje poroznost.



Slika 16. Holcim pijesak 0-4 mm

Cement koji je korišten za izradu mješavina je Holcim Lumen cement, CEM II/A-LL 42,5 R (Slika 17). To je portlandski cement s dodatkom vapnenca koji zadovoljava standarde prema normi HRN EN 197-1. Sadrži 80-94% portlandskog cementnog klinkera, 6-20% prirodnog vapnenca (LL), te do 5% filtarske prašine dobivene iz proizvodnog procesa klinkera. Regulator vezivanja je industrijski gips. Holcim Lumen cement je prikladan za primjenu u predgotovljenim betonskim elementima, dekorativnim proizvodima i prednapetim betonskim konstrukcijama. Njegova svojstva uključuju nizak zahtjev za vodom, veću sposobnost zadržavanja vode i poboljšanu nepropusnost zahvaljujući vapnencu. Cement karakterizira ubrzan razvoj čvrstoće, povećana toplina hidratacije, te svijetla i ujednačena boja, što ga čini pogodnim za dekorativne i estetske primjene [13].



Slika 17. Holcim cement 42,5

Aditiv koji je korišten je superplastifikator Dynamon SF 16, tvrtke Mapei sa sjedištem u Austriji. Dynamon SF je superplastifikator baziran na modificiranim akrilnim polimerima, posebno namijenjen za betone s niskim omjerom vode/cementa, uključujući uobičajene i samozbijajuće betone. Kao visokokvalitetni dodatak, Dynamon SF se preporučuje za upotrebu u industriji gotovih betona, osobito kada je potrebno veliko smanjenje vode te postizanje odličnog zadržavanja slijeganja i mehaničke čvrstoće betonske smjese [14].

### 7.1. Sastav cementnih mješavina

Prije izrade cementnih mješavina bilo je potrebno izvagati sastojke te korigirati mase pijeska i vode zbog površinske vlažnosti pijeska za svih osam cementnih mješavina. Količine sastojka za mješavine dobili smo formulama (3 i 4):

$$m'_p = m_p + (w - A_w) \quad (3)$$

$$m'_w = m_w + (w - A_w) \quad (4)$$

gdje je  $m'_p$  korigirana masa pijeska ( $g$ ),  $m'_w$  korigirana masa vode ( $g$ ),  $m_p$  i  $m_w$  mase pijeska i vode prema omjeru 1:3:0,5 ( $g$ ),  $w$  vlažnost pijeska ( $g$ ) te  $A_w$  apsorbirana voda ( $g$ ). Površinska vlažnost jednaka je razlici vlažnosti pijeska i apsorpcije pijeska sukladno izrazima: 5 i 6.

$$w = m_p \cdot \frac{w'}{100} \quad (5)$$

$$A_w = m_p \cdot \frac{A_w'}{100} \quad (6)$$

gdje je  $w'$  izmjerena vlažnost pijeska (%), a  $A_w'$  apsorpcija pijeska koja je preuzeta sa deklaracije proizvoda pijeska. Masu količine korištenog superplastifikatora u smjesama dobili smo formulom (7):

$$m_{SP} = 0,5 \% \cdot m_c \quad (7)$$

u kojoj je  $m_{SP}$  masa superplastifikatora ( $g$ ), a  $m_c$  masa cementa ( $g$ ). Rezultati masa za svih osam cementnih mješavina prikazani su u Tablici 4.

Tablica 4. Korigirane mase sastojaka cementne mješavine

| MJEŠAVINE                      | MASA PIJESKA | MASA VODE | IZMJERENA VLAŽNOST PIJESKA | APSORPCIJA PIJESKA | VLAŽNOST PIJESKA | APSORBIRANA VODA | MASA CEMENTA | MASA SP | KORIGIRANA MASA PIJESKA | KORIGIRANA MASA VODE |
|--------------------------------|--------------|-----------|----------------------------|--------------------|------------------|------------------|--------------|---------|-------------------------|----------------------|
|                                | (g)          | (g)       | (%)                        | (%)                | (g)              | (g)              | (g)          | (g)     | (g)                     | (g)                  |
| DVIJE REFERENTNE MJEŠAVINE     | 1350,00      | 225,00    | 0,9                        | 1,5                | 12,15            | 20,25            | 450          | /       | 1341,90                 | 233,10               |
| DVIJE MJEŠAVINE SA 0,5% SP     | 1350,00      | 225,00    | 0,9                        | 1,5                | 12,15            | 20,25            | 450          | 2,25    | 1341,90                 | 233,10               |
| DVIJE MJEŠAVINE SA 1% SP       | 1350,00      | 225,00    | 0,9                        | 1,5                | 12,15            | 20,25            | 450          | 4,50    | 1341,90                 | 233,10               |
| DVIJE MJEŠAVINE SA 0,5% SP DOD | 1350,00      | 225,00    | 0,5                        | 1,5                | 6,75             | 20,25            | 450          | 2,25    | 1336,50                 | 238,50               |

\*SP - superplastifikator

## 7.2. Izrada cementnih mješavina

Miješanje morta provodilo se tako da se najprije u posudu miješalice za miješanje (Slika 18) dodaju voda i cement te se miješalice postavi na brzinu 1 i miješa 30 sekundi. Kod mješavina koje sadrže superplastifikator prije postupka miješanja, potrebno je promiješati vodu i superplastifikator. U tih 30 sekundi miješanja postupno se dodaje pijesak te se zatim prebacuje na razinu 2 i miješa još 30 sekundi. Miješanje se nakon toga zaustavi te se ostružu ostaci morta sa stjenke posude i nakon 90 sekundi miješanje se nastavlja još 60 sekundi u drugoj brzini. Dvije mješavine izradile su se naknadnim dodavanjem superplastifikatora kao što je prikazano u Tablici 4. Superplastifikator se nije dodao u vodu prije miješanja, kao u prethodnim mješavinama, nego direktno u posudu za miješanje nakon cijelog postupka miješanja te se zatim mješavina miješala dodatnih 120 sekundi.





Slika 18. Miješalica za miješanje

Nakon miješanja, cementni mort se ugrađuje u standardne kalupe dimenzija  $40 \times 40 \times 160$  mm (Slika 19), koji se koriste za ispitivanje čvrstoće morta na savijanje i tlak. Površina morta se zaravna mistrijom, a kalupi se vibriraju na vibrostolu kako bi se osiguralo pravilno zbijanje smjese i uklanjanje viška zraka. Duljina vibriranja ovisi o karakteristikama smjese, uz oprez da ne dođe do segregacije. Nakon što je mort ugrađen, prekriva se staklenom pločicom. Nakon  $24 \pm 2$  sata od miješanja, uzorci se raskalupljuju i njeguju u vlažnoj okolini, nakon čega se ispituje njihova čvrstoća.



Slika 19. Ugrađeni cementni mort

## 8. ISPITIVANJA SVJEŽEG CEMENTNOG MORTA

### 8.1. Nasipna gustoća

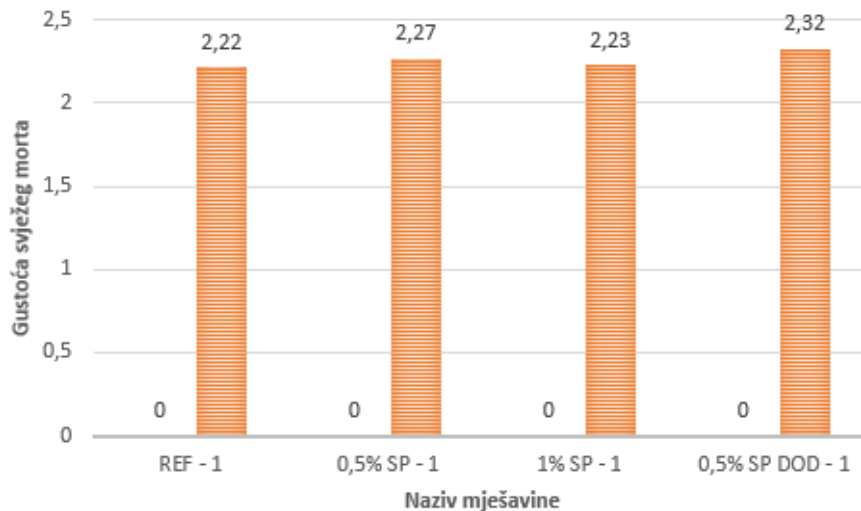
Metoda ispitivanja gustoće svježeg morta prema normi HRN EN 1015-6, ispitivanje mortova za ziđe 6. dio, koristi se za određivanje mase po jedinici volumena svježeg morta. Potrebna oprema uključuje šipku za zbijanje te mjerni cilindar poznatog volumena. U ovom slučaju koristila se čaša čiji je volumen iznosio  $350 \text{ cm}^3$ . Čaša se punila svježim mortom u tri sloja. Svaki sloj se zbijao kako bi se uklonio zarobljeni zrak i osigurala homogena smjesa. Nakon što se čaša napunila, površina morta se izravna kako bi se uklonio višak materijala, čime se osigurava točno mjerenje volumena. Gustoća svježeg morta izračunava se prema formuli (8):

$$\rho_m = \frac{m_2 - m_1}{V_v} \quad (8)$$

u kojoj je  $\rho_m$  gustoća svježeg morta ( $\text{g/cm}^3$ ),  $m_2$  masa posude s mortom ( $\text{g}$ ),  $m_1$  masa prazne posude ( $\text{g}$ ) i  $V_v$  volumen posude ( $\text{cm}^3$ ). Posuda, u ovom slučaju čaša, je tarirana prije vaganja te nije bilo potrebno oduzimati mase. Rezultati ispitivanja prikazani su u Tablici 5 i Slici 20 [15].

Tablica 5. Rezultati ispitivanja gustoće svježeg morta

| Naziv mješavine           | Masa svježeg morta | Volumen posude    | Gustoća (srednja vrijednost) |
|---------------------------|--------------------|-------------------|------------------------------|
|                           | (g)                | ( $\text{cm}^3$ ) | ( $\text{g/cm}^3$ )          |
| <b>1. REF - 1</b>         | 773,5              | 350,0             | 2,22                         |
| <b>2. REF - 2</b>         | 778,9              | 350,0             |                              |
| <b>3. 0,5% SP - 1</b>     | 796,4              | 350,0             | 2,27                         |
| <b>4. 0,5% SP - 2</b>     | 792,1              | 350,0             |                              |
| <b>5. 1% SP - 1</b>       | 770,5              | 350,0             | 2,23                         |
| <b>6. 1% SP - 2</b>       | 788,7              | 350,0             |                              |
| <b>7. 0,5% SP DOD - 1</b> | 833,8              | 350,0             | 2,32                         |
| <b>8. 0,5% SP DOD - 2</b> | 793,5              | 350,0             |                              |



Slika 20. Usporedba rezultata ispitivanja gustoće

Dodavanje superplastifikatora u mješavinu betona (0,5% SP i 1% SP) utječe na povećanje gustoće svježeg morta u usporedbi s referentnim mješavinama (REF-1 i REF-2). Povećanje udjela superplastifikatora s 0,5% na 1% ne pokazuje značajno povećanje gustoće u odnosu na mješavine s nižom dozom. Kada se superplastifikator dodaje naknadno (0,5% SP DOD), dolazi do dodatnog povećanja gustoće, što je vidljivo iz rezultata gustoće od 2,32 g/cm<sup>3</sup>. Ovaj način dodavanja superplastifikatora može poboljšati zbijenost i homogenost smjese u odnosu na ostale metode dodavanja. Svi rezultati pokazuju da dodavanje superplastifikatora, bilo u vodi ili naknadno, povećava gustoću svježeg morta u usporedbi s referentnim mješavinama bez superplastifikatora. Superplastifikator smanjuje potrebu za vodom u smjesi, omogućujući bolje zbijanje i smanjenje zarobljenog zraka, što rezultira većom gustoćom.

## 8.2. Ispitivanje konzistencije morta

Ispitivanje konzistencije cementnog morta prema normi HRN EN 1015-3, metode ispitivanja mortove za ziđe 3. dio, provodi se pomoću stolića za potresanje (Slika 21) kako bi se izmjerilo rasprostiranje svježeg morta i odredila njegova konzistencija.

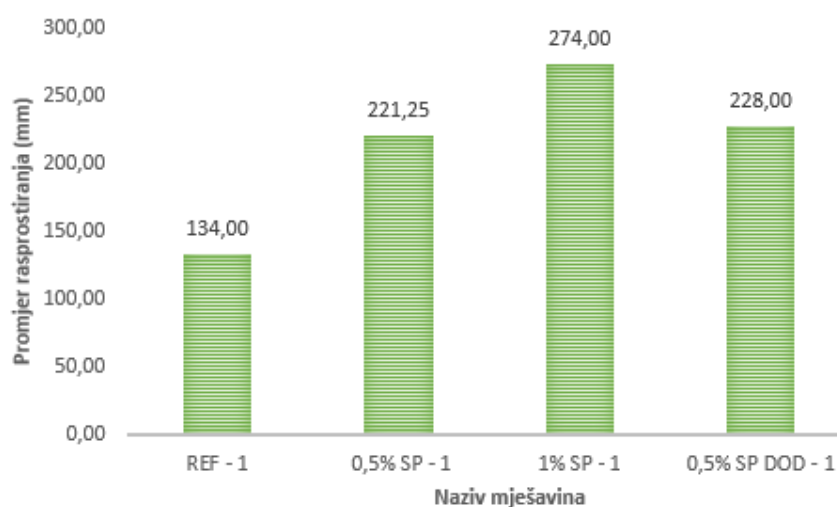


Slika 21. Potresni stolić za ispitivanje konzistencije rasprostiranjem

Ispitivanje se obavlja odmah nakon pripreme svježe mješavine. Potrebno je osigurati da volumen svježeg morta bude najmanje 1,5 litara. Površina stolića i kalupa u obliku krnjeg stošca mora se obrisati vlažnom krpom kako bi se osigurala čistoća i ravnomjernost ispitivanja, te ostaviti da se osuši. Prilikom punjenja kalup treba čvrsto držati jednom rukom na postolju stolića. Kalup se puni u dva sloja, a svaki sloj se zbija s 10 laganih udaraca kako bi se osiguralo ravnomjerno punjenje. Drugi sloj se mora napuniti iznad vrha kalupa, zatim sabiti, poravnati mort te ukloniti višak materijala s postolja. Nakon 15 sekundi od završetka punjenja kalupa, kalup se vertikalno podiže, a stolić za potresanje se uključuje. Stolić vrši 15 udaraca brzinom od jednog udarca po sekundi. Nakon potresanja, mjere se dva okomita promjera rasprostrog morta, s točnošću od 1 mm. Izračunava se srednja vrijednost tih promjera koja predstavlja pokazatelj konzistencije morta. Ako promjeri odstupaju manje od 10% od srednje vrijednosti, rezultat je valjan. U slučaju da neki promjer odstupa više od 10%, ispitivanje se ponavlja s novim uzorkom morta. Ukoliko i ponovljeno ispitivanje pokazuje odstupanje promjera veće od 10%, rezultat se smatra nezadovoljavajućim i ispitivanje se mora ponoviti s potpuno novim uzorkom. Rezultati ispitivanja su prikazani u Tablici 6 i Slici 22 [16].

Tablica 6. Rezultati ispitivanja konzistencije metodom rasprostiranja

| Naziv mješavine    | Prvi promjer | Drugi promjer<br>(okomit na prvi) | Vrijednost promjera<br>rasprostiranja<br>(srednja vrijednost) |
|--------------------|--------------|-----------------------------------|---|
|                    | (mm)         | (mm)                              | (mm)  |
| 1. REF - 1         | 129          | 132                               | 134,00  |
| 2. REF - 2         | 134          | 141                               |   |
| 3. 0,5% SP - 1     | 235          | 238                               | 221,25  |
| 4. 0,5% SP - 2     | 205          | 207                               |   |
| 5. 1% SP - 1       | 278          | 281                               | 274,00  |
| 6. 1% SP - 2       | 266          | 271                               |   |
| 7. 0,5% SP DOD - 1 | 214          | 211                               | 228,00  |
| 8. 0,5% SP DOD - 2 | 246          | 241                               |   |



Slika 22. Usporedba rezultata konzistencije metodom rasprostiranja

Dodavanje superplastifikatora u mješavinu značajno povećava vrijednosti promjera rasprostiranja u usporedbi s referentnim mješavinama (REF-1 i REF-2). Na primjer, referentne mješavine imaju prosječnu vrijednost rasprostiranja od 134 mm, dok mješavine s 0,5% superplastifikatora postižu veće vrijednosti (221,25 mm). Povećanje udjela plastifikatora s 0,5% na 1% dodatno povećava konzistenciju, što je vidljivo iz povećanja prosječnog promjera rasprostiranja na 274 mm. Preveliki udio superplastifikatora može negativno utjecati na homogenost svježe betonske mješavine, što može dovesti do segregacije. Na Slici 23 kod mješavine sa 1% superplastifikatora vidljiv je prsten vode po rubu potresnog stolića, dok se u sredini ispitnog uzorka na stoliću jasno uočava nakupina agregata, što ukazuje na segregaciju.



*Slika 23. Usporedba konzistencije rasprostiranjem mješavine 0,5% SP (lijevo) i 1% SP (desno)*

Mješavine u kojima je superplastifikator naknadno dodan (0,5% SP DOD) također pokazuju povećanu konzistenciju u usporedbi s referentnim mješavinama. Prosječna vrijednost rasprostiranja za ove mješavine iznosi 228 mm, što je više od mješavina s 0,5% superplastifikatora dodanih u vodi tijekom miješanja, ali manje od mješavina s 1% superplastifikatora. Svi rezultati pokazuju da dodavanje superplastifikatora, bilo u procesu miješanja ili naknadno, povećava konzistenciju morta. Veća doze superplastifikatora (1%) ima najveći utjecaj na konzistenciju, dok naknadno dodavanje superplastifikatora također doprinosi povećanju rasprostiranja, ali u manjoj mjeri u usporedbi dozom superplastifikatora od 1%.

## 9. ISPITIVANJA OČVRSLOG CEMENTNOG MORTA

Uzorci cementnih prizmi su nakon njegovanja u bazenu s vodom izvađeni te im je odstranjena površinska voda. Uzorci su izvagani i izmjerene su im dimenzije te su ti rezultati vidljivi u Tablici 7 i 8 za uzorke od 2 i 7 dana starosti.

Tablica 7. Gustoća, masa i dimenzije uzoraka nakon 2 dana njegovanja

| 2 DANA          | DIMENZIJE          | MASA  | GUSTOĆA              |
|-----------------|--------------------|-------|----------------------|
| UZORCI          | (mm)               | (g)   | (g/cm <sup>3</sup> ) |
| REF - 1         | 160*39,9*41,4      | 586,6 | 2,22                 |
| REF - 2         | 160*40*40,4        | 576,0 | 2,23                 |
| REF - 3         | 161,5*40*42,2      | 592,4 | 2,17                 |
| 0,5% SP - 1     | 161*39,9*41,1      | 587,2 | 2,22                 |
| 0,5% SP - 2     | 160*39,8*41,2      | 585,1 | 2,23                 |
| 0,5% SP - 3     | 160,5*40*42,6      | 608,0 | 2,22                 |
| 1% SP - 1       | 160,5*40*40,7      | 577,5 | 2,21                 |
| 1% SP - 2       | 160,5*40*41,4      | 588,6 | 2,21                 |
| 1% SP - 3       | 160,5*41*40,5      | 592,7 | 2,22                 |
| 0,5% SP DOD - 1 | 160,37*39,95*39,9  | 568,3 | 2,22                 |
| 0,5% SP DOD - 2 | 160,12*39,93*41,23 | 592,8 | 2,25                 |
| 0,5% SP DOD - 3 | 160,24*39,88*39,48 | 565,3 | 2,24                 |

Na temelju prikazanih rezultata gustoće, mase i dimenzija uzoraka nakon 2 dana njegovanja možemo zaključiti da gustoća svih mješavina, uključujući referentne i mješavine sa superplastifikatorima, relativno je ujednačena, krećući se oko vrijednosti od 2,22 do 2,24 g/cm<sup>3</sup>. Ovo ukazuje na to da dodavanje superplastifikatora u različitim omjerima nije značajno utjecalo na gustoću betona nakon 2 dana njegovanja. Gustoća morta ostaje prilično konstantna bez obzira na način i količinu dodavanja superplastifikatora. Razlike u masi mogu ukazivati na varijacije u zbijenosti ili homogenosti smjese, ali u ovom ispitivanju, superplastifikator nije imao značajan utjecaj na gustoću nakon 2 dana njegovanja.

Tablica 8. Gustoća, masa i dimenzije uzoraka nakon 7 dana njegovanja

| 7 DANA          | DIMENZIJE          | MASA  | GUSTOĆA<br>( $g/cm^3$ ) |
|-----------------|--------------------|-------|-------------------------|
| UZORCI          | (mm)               | (g)   |                         |
| REF - 1         | 160,16*40,21*40,06 | 578,8 | 2,24                    |
| REF - 2         | 160,3*39,9*42,15   | 589,7 | 2,19                    |
| REF - 3         | 160,41*40,15*41,9  | 599,1 | 2,22                    |
| 0,5% SP - 1     | 160,46*40,27*40,23 | 587,9 | 2,26                    |
| 0,5% SP - 2     | 160,23*39,87*41,36 | 589,3 | 2,23                    |
| 0,5% SP - 3     | 160,26*40,03*40,81 | 572,8 | 2,19                    |
| 1% SP - 1       | 160,58*39,97*38,99 | 584,2 | 2,33                    |
| 1% SP - 2       | 160,96*40,13*41,58 | 592,7 | 2,21                    |
| 1% SP - 3       | 160,81*40,09*41,11 | 587,8 | 2,22                    |
| 0,5% SP DOD - 1 | 160,62*39,97*41,87 | 593,9 | 2,21                    |
| 0,5% SP DOD - 2 | 160,05*40,53*41,57 | 583,9 | 2,17                    |
| 0,5% SP DOD - 3 | 160,26*40,01*41,21 | 578,4 | 2,19                    |

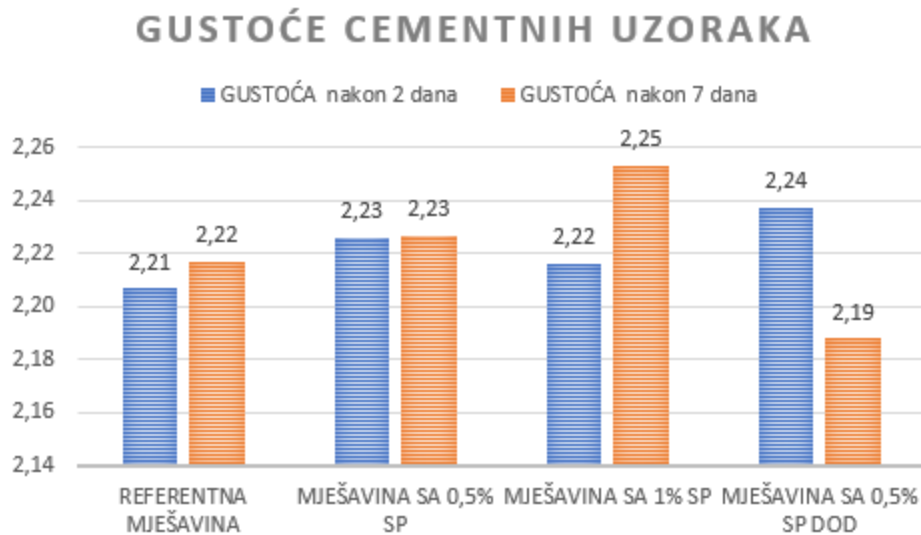
Slično kao i nakon 2 dana njegovanja, gustoća svih mješavina ostaje relativno ujednačena, krećući se od 2,19 do 2,24  $g/cm^3$ . Ove vrijednosti pokazuju da dodavanje superplastifikatora, bilo tijekom miješanja ili naknadno, nema značajan utjecaj na gustoću uzoraka nakon 7 dana njegovanja. Mase uzoraka pokazuju manje varijacije nakon 7 dana. Mješavine s 0,5% i 1% superplastifikatora (bilo tijekom miješanja ili naknadno dodane) imaju slične mase kao i referentne mješavine, s minimalnim razlikama.

Nakon 7 dana njegovanja, gustoća referentne mješavine ostaje stabilna s blagim povećanjem, dok mješavine s 0,5% superplastifikatora zadržavaju stabilnu gustoću. Mješavina s 1% superplastifikatora postiže najvišu gustoću, ali se nakon 7 dana ta gustoća smanjuje. Mješavine s naknadno dodanim superplastifikatorom pokazuju pad gustoće nakon 7 dana, što sugerira manju homogenost ili zbijenost. Dodavanje superplastifikatora tijekom miješanja općenito poboljšava zbijenost i konzistentnost gustoće u usporedbi s naknadnim dodavanjem (Tablica 9 i Slika 24).

Tablica 9. Usporedba gustoća cementnih mješavina nakon 2 i 7 dana

| MJEŠAVINE CEMENTNOG<br>MORTA | GUSTOĆA ( $g/cm^3$ ) |              |
|------------------------------|----------------------|--------------|
|                              | nakon 2 dana         | nakon 7 dana |
| REFERENTNA MJEŠAVINA         | 2,21                 | 2,22         |
| MJEŠAVINA SA 0,5% SP         | 2,23                 | 2,23         |
| MJEŠAVINA SA 1% SP           | 2,22                 | 2,25         |
| MJEŠAVINA SA 0,5% SP DOD     | 2,24                 | 2,19         |





Slika 24. Usporedba gustoća cementnih uzoraka

## 9.1. Ispitivanje čvrstoće na savijanje

Ispitivanje vlačne čvrstoće savijanjem cementa, određeno je normom za cement HRN EN 196-1, metode ispitivanja cementa, 1. dio: određivanje čvrstoće. Kod ispitivanja vlačne čvrstoće savijanjem, cementne prizme se opterećuju u tri točke, pri čemu se opterećenje nanosi jednoliko brzinom od  $50 \pm 10$  N/s dok ne dođe do loma uzorka. Uzorci se postavljaju okomito na smjer ugradnje u kalup, a bilježi se maksimalna sila pri kojoj dolazi do sloma. Ispitivanje se provodi na tri prizme, a zatim se polovice prizmi koriste za ispitivanje tlačne čvrstoće. Savojna čvrstoća se računa kao srednja vrijednost sva tri uzorka i zaokružuje se na najbližih 0,1 MPa prema sljedećoj formuli (9):

$$\sigma_f = \frac{1.5 \cdot F_f \cdot l}{b \cdot h^2} \quad (9)$$

gdje je  $\sigma_f$  čvrstoća na savijanje (MPa),  $F_f$  sila sloma (N),  $l$  je udaljenost između oslonaca (mm),  $b$  širina poprečnog presjeka (mm) i  $h$  visina poprečnog presjeka (mm). Ispitivanje je provedeno na hidrauličkoj preši proizvođača Controls (Slika 25) [17].



Slika 25. Uređaj za ispitivanje čvrstoće na savijanje

Za svaku od četiri vrste mješavina provedena su ispitivanja na tri prizme po mješavini (Slika 26), čime su dobivene tri sile sloma za svaki uzorak. Ispitivanja su provedena na 2 i 7 dana starim uzorcima. Rezultati čvrstoće na savijanje nakon 2 dana za svaki pojedini uzorak navedeni su u Tablici 10, gdje su izračunate i srednje vrijednosti za svaku mješavinu. Ove srednje vrijednosti predstavljaju prosječnu vlačnu čvrstoću svake mješavine na savijanje. Usporedba srednjih vrijednosti za sve mješavine prikazana je grafički na Slici 27.

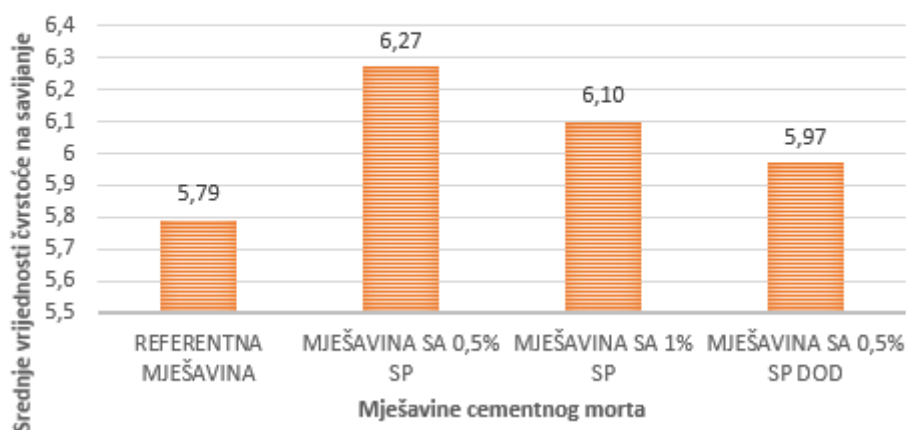


Slika 26. Uzorak nakon ispitivanja čvrstoće na savijanje

Tablica 10. Čvrstoća na savijanje za 2 dana stare uzorke

| ČVRSTOĆA NA SAVIJANJE NAKON 2 DANA |            |                                      |                       |
|------------------------------------|------------|--------------------------------------|-----------------------|
| UZORAK                             | SILA SLOMA | POJEDINI REZULTAT<br>ISPITNOG UZORKA | SREDNJA<br>VRIJEDNOST |
|                                    | (kN)       | (MPa)                                | (MPa)                 |
| 1. REF - 1                         | 2,329      | 5,30                                 | 5,79                  |
| 2. REF - 2                         | 2,547      | 5,91                                 |                       |
| 3. REF - 3                         | 2,769      | 6,15                                 |                       |
| 1. 0,5% SP - 1                     | 2,768      | 6,35                                 | 6,27                  |
| 2. 0,5% SP - 2                     | 2,726      | 6,27                                 |                       |
| 3. 0,5% SP - 3                     | 2,809      | 6,18                                 |                       |
| 1. 1% SP - 1                       | 2,679      | 6,17                                 | 6,10                  |
| 2. 1% SP - 2                       | 2,572      | 5,82                                 |                       |
| 3. 1% SP - 3                       | 2,863      | 6,31                                 |                       |
| 1. 0,5 % SP DOD - 1                | 2,329      | 5,49                                 | 5,97                  |
| 2. 0,5 % SP DOD - 2                | 2,715      | 6,20                                 |                       |
| 3. 0,5 % SP DOD - 3                | 2,603      | 6,22                                 |                       |

### ČVRSTOĆE NA SAVIJANJE ZA 2 DANA STARE UZORKE



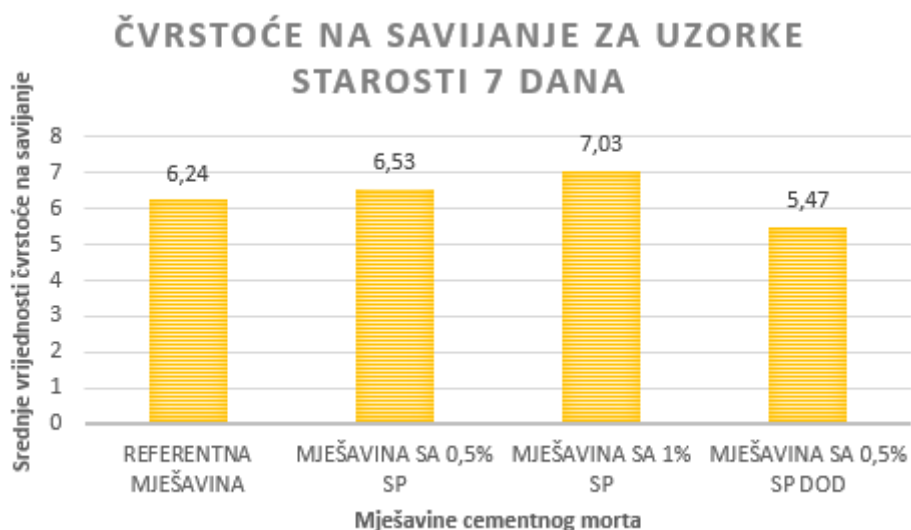
Slika 27. Čvrstoća na savijanje za 2 dana stare uzorke

Na temelju rezultata ispitivanja čvrstoće na savijanje uzoraka starih 2 dana, može se zaključiti da sve mješavine s dodatkom superplastifikatora postižu veću čvrstoću od referentne mješavine. Mješavina s 0,5% plastifikatora pokazuje najveću čvrstoću na savijanje od 6,27 MPa, dok referentna mješavina ima čvrstoću od 5,79 MPa. Mješavina s 1% superplastifikatora postiže nešto manju čvrstoću (6,10 MPa), ali je i dalje značajno viša od referentne. Mješavina s naknadno dodanim superplastifikatorom ima nešto nižu čvrstoću (5,97 MPa), ali je još uvijek veća od referentne. Općenito, upotreba plastifikatora pozitivno utječe na čvrstoću na savijanje

morta već nakon 2 dana. Istim postupkom ispitivala se čvrstoća na savijanje uzoraka nakon 7 dana njegovanja te su rezultati dani u Tablici 11 i Slici 28.

Tablica 11. Čvrstoća na savijanje za 7 dana stare uzorke

| ČVRSTOĆA NA SAVIJANJE NAKON 7 DANA |            |                                      |                       |
|------------------------------------|------------|--------------------------------------|-----------------------|
| UZORAK                             | SILA SLOMA | POJEDINI REZULTAT<br>ISPITNOG UZORKA | SREDNJA<br>VRIJEDNOST |
|                                    | (kN)       | (MPa)                                | (MPa)                 |
| 1. REF - 1                         | 2,654      | 6,15                                 | 6,24                  |
| 2. REF - 2                         | 2,691      | 6,02                                 |                       |
| 3. REF - 3                         | 2,935      | 6,56                                 |                       |
| 1. 0,5% SP - 1                     | 2,734      | 6,29                                 | 6,53                  |
| 2. 0,5% SP - 2                     | 2,885      | 6,58                                 |                       |
| 3. 0,5% SP - 3                     | 2,927      | 6,72                                 |                       |
| 1. 1% SP - 1                       | 3,165      | 7,61                                 | 7,03                  |
| 2. 1% SP - 2                       | 2,940      | 6,59                                 |                       |
| 3. 1% SP - 3                       | 3,033      | 6,89                                 |                       |
| 1. 0,5 % SP DOD - 1                | 2,757      | 6,18                                 | 5,47                  |
| 2. 0,5 % SP DOD - 2                | 2,344      | 5,15                                 |                       |
| 3. 0,5 % SP DOD - 3                | 2,239      | 5,09                                 |                       |



Slika 28. Čvrstoća na savijanje za 7 dana stare uzorke

Na temelju rezultata ispitivanja čvrstoće na savijanje uzoraka starih 7 dana, vidljivo je da sve mješavine sa superplastifikatorom, osim naknadno dodanog (0,5% SP DOD), pokazuju veću čvrstoću u usporedbi s referentnom mješavinom. Mješavina s 1% superplastifikatora ima najveću čvrstoću na savijanje od 7,03 MPa, dok referentna mješavina ima čvrstoću od 6,24 MPa. Mješavina s 0,5% superplastifikatora također pokazuje povećanje čvrstoće (6,53 MPa), ali nešto manje u odnosu na mješavinu s 1% plastifikatora. Mješavina s naknadno dodanim

superplastifikatorom (0,5% SP DOD) ima najnižu čvrstoću (5,47 MPa), što je manje i od referentne mješavine. Općenito, superplastifikator poboljšava čvrstoću morta nakon 7 dana, s najvećim učinkom kod mješavina s većim udjelom superplastifikatora.

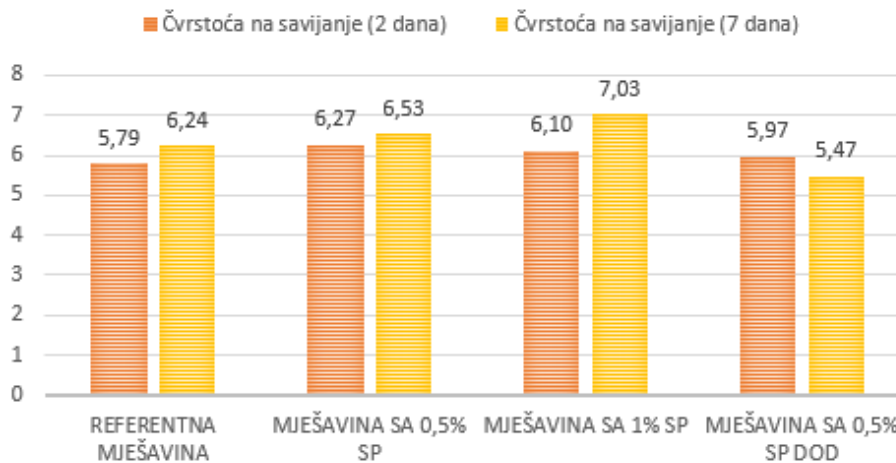
Manja čvrstoća uzorka s naknadno dodanim superplastifikatorom u usporedbi s uzorkom u kojem je superplastifikator dodan tijekom početnog miješanja može se pripisati neujednačenom raspoređivanju aditiva u smjesi. Naknadno dodavanje može rezultirati lošijom homogenizacijom, što dovodi do povećane poroznosti i smanjenja zbijenosti smjese. Superplastifikator pomaže smanjenju vodocementnog omjera, čime omogućuje bolju zbijenost smjese. Ako se superplastifikator dodaje kasnije, smjesa se možda nije pravilno sabila ili je zarobljeno više zraka, što povećava poroznost i smanjuje čvrstoću.

Iz usporedbe čvrstoća na savijanje za uzorke stare 2 i 7 dana (Tablica 12 i Slika 29) vidljivo je da sve mješavine, uključujući referentnu, pokazuju porast čvrstoće s vremenom. Mješavina s 1% superplastifikatora postiže najveću čvrstoću na savijanje nakon 7 dana (7,03 MPa), dok mješavina s naknadno dodanim superplastifikatorom ima najmanji porast čvrstoće i najnižu čvrstoću nakon 7 dana (5,47 MPa). Mješavine s 0,5% superplastifikatora pokazuju porast čvrstoće, ali su ispod rezultata mješavine s 1% superplastifikatora. Zaključno, superplastifikator poboljšava čvrstoću, pri čemu veći udio i dodavanje u početnoj fazi miješanja daje bolje rezultate.

Tablica 12. Rezultati ispitivanja čvrstoća na savijanje

| UZORAK          | SAVOJNA ČVRSTOĆA (2 DANA)<br>(MPa) |      |      | PROSJEČNO (2 DANA)<br>(Mpa) | STANDARDNA<br>DEVIJACIJA (2 DANA) | SMANJENJE/<br>POVEĆANJE<br>(%) |
|-----------------|------------------------------------|------|------|-----------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|
|                 |                                    |      |      |                             |                                   |                                |
| 1. REF          | 5,30                               | 5,91 | 6,15 | 5,79                        | 0,438                             | /                              |
| 2. 0,5% SP      | 6,35                               | 6,27 | 6,18 | 6,27                        | 0,085                             | 8,290                          |
| 3. 1% SP        | 6,17                               | 5,82 | 6,31 | 6,10                        | 0,252                             | 5,354                          |
| 4. 0,5 % SP DOD | 5,49                               | 6,20 | 6,22 | 5,97                        | 0,416                             | 3,109                          |
| UZORAK          | SAVOJNA ČVRSTOĆA (7 DANA)<br>(MPa) |      |      | PROSJEČNO (7 DANA)<br>(Mpa) | STANDARDNA<br>DEVIJACIJA (7 DANA) | SMANJENJE/<br>POVEĆANJE<br>(%) |
|                 |                                    |      |      |                             |                                   |                                |
| 1. REF          | 6,15                               | 6,02 | 6,56 | 6,24                        | 0,282                             | /                              |
| 2. 0,5% SP      | 6,29                               | 6,58 | 6,72 | 6,53                        | 0,219                             | 4,647                          |
| 3. 1% SP        | 7,61                               | 6,59 | 6,89 | 7,03                        | 0,524                             | 12,660                         |
| 4. 0,5 % SP DOD | 6,18                               | 5,15 | 5,09 | 5,47                        | 0,613                             | -12,340                        |

## USPOREDBA ČVRSTOĆA NA SAVIJANJE



Slika 29. Usporedba čvrstoća na savijanje uzoraka od 2 i 7 dana starosti

### 9.2. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Ispitivanje tlačne čvrstoće cementa provodi se na polovicama prizmi koje su prethodno dobivene ispitivanjem vlačne čvrstoće savijanjem (Slika 30). Ispitivanje je određeno normom HRN EN 196-1, metode ispitivanja cementa, 1. dio: određivanje čvrstoće, kao i ispitivanje čvrstoće na savijanje. Opterećenje se primjenjuje ravnomjerno brzinom od  $2400 \pm 200$  N/s, koristeći metalnu pločicu dimenzija 40 x 40 mm, sve do sloma uzorka. Kao rezultat ispitivanja bilježi se maksimalna sila pri kojoj dolazi do sloma (Slika 31). Ispitivanje se provodi na šest polovica prizmi, s time da ploha na kojoj se provodi ispitivanje ne smije biti ploha s koje se mort ulijevao u kalup. Čvrstoća na tlak je srednja vrijednost šest ispitanih uzoraka dobivenih kao polovice prizmi prema izrazu (10):

$$\sigma_c = \frac{F_C}{A} \quad (10)$$

u kojem je  $\sigma_c$  čvrstoća na tlak ( $MP_a$ ),  $F_C$  sila sloma ( $N$ ) i  $A$  površina opterećenja ( $mm^2$ ) koja iznosi  $1600 \text{ mm}^2$ .



Slika 30. Ispitivanje tlačne čvrstoće

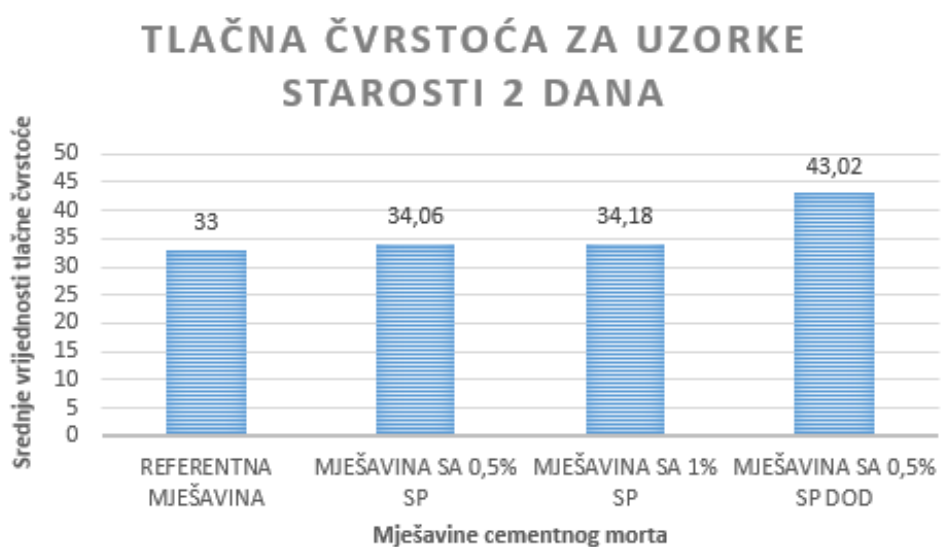


Slika 31. Uzorci nakon ispitivanja čvrstoće na tlak

Na svih uzorcima brzina nanošenja opterećenja je iznosila 2400 N/s sukladno zahtjevu norme HRN EN 196-1 [17]. U Tablici 13 i Slici 32 dani su rezultati ispitanih cementnih uzoraka starosti 2 dana.

Tablica 13. Tlačna čvrstoća uzorka starosti 2 dana

| TLAČNA ČVRSTOĆA NAKON 2 DANA |            |                                      |                       |
|------------------------------|------------|--------------------------------------|-----------------------|
| UZORAK                       | SILA SLOMA | POJEDINI REZULTAT<br>ISPITNOG UZORKA | SREDNJA<br>VRIJEDNOST |
|                              | (kN)       | (MPa)                                | (MPa)                 |
| 1. REF - 1                   | 52,89      | 33,06                                | 33,00                 |
|                              | 58,50      | 36,56                                |                       |
| 2. REF - 2                   | 52,56      | 32,85                                |                       |
|                              | 50,57      | 31,61                                |                       |
| 3. REF - 3                   | 52,34      | 32,71                                |                       |
|                              | 49,94      | 31,21                                |                       |
| 1. 0,5% SP - 1               | 56,12      | 35,07                                | 34,06                 |
|                              | 56,50      | 35,31                                |                       |
| 2. 0,5% SP - 2               | 52,49      | 32,81                                |                       |
|                              | 53,63      | 33,52                                |                       |
| 3. 0,5% SP - 3               | 55,70      | 34,81                                |                       |
|                              | 52,57      | 32,86                                |                       |
| 1. 1% SP - 1                 | 55,14      | 34,46                                | 34,18                 |
|                              | 56,20      | 35,13                                |                       |
| 2. 1% SP - 2                 | 52,24      | 32,65                                |                       |
|                              | 53,01      | 33,13                                |                       |
| 3. 1% SP - 3                 | 53,60      | 33,50                                |                       |
|                              | 57,98      | 36,23                                |                       |
| 1. 0,5 % SP DOD - 1          | 68,60      | 42,87                                | 43,02                 |
|                              | 65,61      | 41,01                                |                       |
| 2. 0,5 % SP DOD - 2          | 68,77      | 42,98                                |                       |
|                              | 70,00      | 43,75                                |                       |
| 3. 0,5 % SP DOD - 3          | 71,01      | 44,38                                |                       |
|                              | 69,02      | 43,14                                |                       |



Slika 32. Tlačna čvrstoća uzorka starosti 2 dana



Na temelju rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće nakon 2 dana, može se zaključiti da referentna mješavina postiže prosječnu tlačnu čvrstoću od 33,00 MPa, što predstavlja osnovnu vrijednost za usporedbu s ostalim mješavinama. Mješavina s dodatkom od 0,5% superplastifikatora pokazuje blago poboljšanje čvrstoće, s prosječnom vrijednošću od 34,06 MPa, što ukazuje na pozitivan učinak aditiva na razvoj čvrstoće u ranoj fazi. Mješavina s 1% superplastifikatora dodatno povećava tlačnu čvrstoću, postigavši prosječnu vrijednost od 34,18 MPa, što pokazuje da veća količina aditiva doprinosi boljoj zbijenosti i ranom razvoju čvrstoće. S druge strane, mješavine s naknadno dodanim superplastifikatorom (0,5% SP DOD) pokazuju značajno veće tlačne čvrstoće, s prosječnom vrijednošću od 43,02 MPa, što sugerira da naknadno dodavanje aditiva može poboljšati početnu čvrstoću. Istim postupkom ispitivala se tlačna čvrstoća uzoraka nakon 7 dana njegovanja te su rezultati dani u Tablici 14 i Slici 33.

Tablica 14. Tlačna čvrstoća uzorka starosti 7 dana

| TLAČNA ČVRSTOĆA NAKON 7 DANA |            |                                      |                       |
|------------------------------|------------|--------------------------------------|-----------------------|
| UZORAK                       | SILA SLOMA | POJEDINI REZULTAT<br>ISPITNOG UZORKA | SREDNJA<br>VRIJEDNOST |
|                              | (kN)       | (MPa)                                | (MPa)                 |
| 1. REF - 1                   | 66,44      | 41,52                                | 43,67                 |
|                              | 69,94      | 43,72                                |                       |
| 2. REF - 2                   | 69,32      | 43,32                                |                       |
|                              | 70,50      | 44,06                                |                       |
| 3. REF - 3                   | 73,02      | 45,64                                |                       |
|                              | 70,05      | 43,78                                |                       |
| 1. 0,5% SP - 1               | 72,72      | 45,45                                | 45,21                 |
|                              | 77,38      | 48,36                                |                       |
| 2. 0,5% SP - 2               | 67,42      | 42,14                                |                       |
|                              | 44,28      | 44,28                                |                       |
| 3. 0,5% SP - 3               | 73,16      | 45,72                                |                       |
|                              | 72,48      | 45,30                                |                       |
| 1. 1% SP - 1                 | 74,14      | 46,34                                | 47,25                 |
|                              | 78,37      | 48,98                                |                       |
| 2. 1% SP - 2                 | 77,24      | 48,27                                |                       |
|                              | 73,96      | 46,23                                |                       |
| 3. 1% SP - 3                 | 75,91      | 47,45                                |                       |
|                              | 73,92      | 46,20                                |                       |
| 1. 0,5 % SP DOD - 1          | 71,71      | 44,82                                | 41,34                 |
|                              | 66,70      | 41,69                                |                       |
| 2. 0,5 % SP DOD - 2          | 67,81      | 42,38                                |                       |
|                              | 63,84      | 39,90                                |                       |
| 3. 0,5 % SP DOD - 3          | 61,87      | 38,67                                |                       |
|                              | 64,89      | 40,55                                |                       |



Slika 33. Tlačna čvrstoća uzorka starosti 7 dana

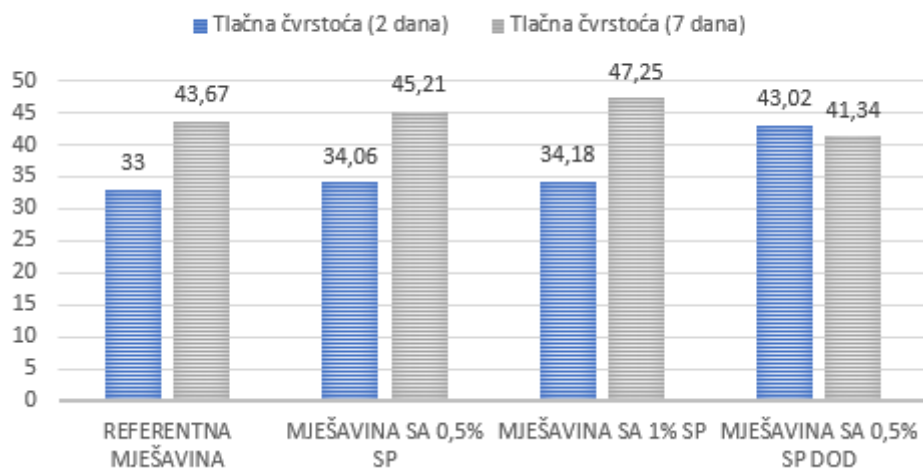
Nakon 7 dana ispitivanja, referentna mješavina ostvaruje prosječnu tlačnu čvrstoću od 43,67 MPa, što pokazuje očekivani porast u odnosu na rezultate nakon 2 dana. Mješavina s dodatkom 0,5% superplastifikatora postiže veću čvrstoću od referentne, s prosječnom vrijednošću od 45,21 MPa, što ukazuje na pozitivan učinak aditiva na razvoj čvrstoće tijekom vremena. Mješavina s 1% superplastifikatora pokazuje najbolji rezultat, dosegnuvši tlačnu čvrstoću od 47,25 MPa, što potvrđuje da veća doza aditiva značajno doprinosi poboljšanju strukture cementnih prizmica. Mješavina s naknadno dodanim superplastifikatorom pokazuje nižu čvrstoću od 41,34 MPa, što sugerira da kasnije dodavanje aditiva nije jednako učinkovito kao njegovo dodavanje u početnoj fazi miješanja.

Na temelju usporedbe tlačnih čvrstoća uzoraka nakon 2 i 7 dana (Tablica 15 i Slika 34), može se zaključiti da sve mješavine s dodatkom superplastifikatora pokazuju veće tlačne čvrstoće u odnosu na referentnu mješavinu. Mješavina s 0,5% superplastifikatora nakon 7 dana ima čvrstoću od 45,21 MPa, što je značajno poboljšanje u odnosu na početnu vrijednost od 34,06 MPa nakon 2 dana. Mješavina s 1% superplastifikatora ostvaruje najveću tlačnu čvrstoću, dosegnuvši 47,25 MPa nakon 7 dana, što ukazuje na najbolji učinak ovog aditiva na razvoj čvrstoće. Mješavina s naknadno dodanim superplastifikatorom (0,5% SP DOD) pokazuje najmanji porast tlačne čvrstoće, s 43,02 MPa nakon 2 dana i 41,34 MPa nakon 7 dana, što sugerira da naknadno dodavanje superplastifikatora nije jednako učinkovito kao njegovo dodavanje u početnoj fazi miješanja. Općenito, dodatak superplastifikatora poboljšava tlačnu čvrstoću, s izraženijim učinkom kod većih doza i ranog miješanja [18].

Tablica 15. Rezultati ispitivanja tlačne čvrstoće

| UZORAK          | TLAČNA ČVRSTOĆA (2 DANA) (MPa) |       |       |       |       |       | PROSJEČNO (2 DANA) (Mpa) | STANDARDNA DEVIJACIJA (2 DANA) | SMANJENJE/POVEĆANJE (%) |
|-----------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------------------------|--------------------------------|-------------------------|
|                 |                                |       |       |       |       |       |                          |                                |                         |
| 1. REF          | 33,06                          | 36,56 | 32,85 | 31,61 | 32,71 | 31,21 | 33,00                    | 1,616                          | /                       |
| 2. 0,5% SP      | 35,07                          | 35,31 | 32,81 | 33,52 | 34,81 | 32,86 | 34,06                    | 1,071                          | 3,212                   |
| 3. 1% SP        | 34,46                          | 35,13 | 32,65 | 33,13 | 33,50 | 36,23 | 34,18                    | 1,698                          | 3,576                   |
| 4. 0,5 % SP DOD | 42,87                          | 41,01 | 42,98 | 43,75 | 44,38 | 43,14 | 43,02                    | 1,095                          | 30,364                  |
| UZORAK          | TLAČNA ČVRSTOĆA (7 DANA) (MPa) |       |       |       |       |       | PROSJEČNO (7 DANA) (Mpa) | STANDARDNA DEVIJACIJA (7 DANA) | SMANJENJE/POVEĆANJE (%) |
|                 |                                |       |       |       |       |       |                          |                                |                         |
| 1. REF          | 41,52                          | 43,72 | 43,32 | 44,06 | 45,64 | 43,78 | 43,67                    | 1,422                          | /                       |
| 2. 0,5% SP      | 45,45                          | 48,36 | 42,14 | 44,28 | 45,72 | 45,30 | 45,21                    | 0,753                          | 3,526                   |
| 3. 1% SP        | 46,34                          | 48,98 | 48,27 | 46,23 | 47,45 | 46,20 | 47,25                    | 1,045                          | 8,198                   |
| 4. 0,5 % SP DOD | 44,82                          | 41,69 | 42,38 | 39,90 | 38,67 | 40,55 | 41,34                    | 2,217                          | -5,335                  |

## USPOREDBA TLAČNIH ČVRSTOĆA



Slika 34. Usporedba tlačnih čvrstoća uzoraka od 2 i 7 dana starosti

## 10. ZAKLJUČAK

Rezultati ispitivanja pokazali su da dodatak superplastifikatora značajno poboljšava svojstva cementnog morta, kako u svježem stanju, tako i nakon očvršćavanja. Mješavine koje su sadržavale 0,5% i 1% superplastifikatora ostvarile su veće tlačne i vlačne čvrstoće u usporedbi s referentnim mješavinama bez dodataka. Ovaj porast čvrstoće izravno je povezan dodavanjem superplastifikatora jer je vodocementni faktor u svim mješavinama držan konstantnim, što je omogućilo bolju zbijenost i homogenu mikrostrukturu cementnog morta. Superplastifikatori su također imali pozitivan utjecaj na obradivost svježeg morta, omogućujući lakšu ugradnju bez potrebe za dodatnim dodavanjem vode. To je ključno za smanjenje rizika od segregacije i pojave pukotina tijekom sušenja i očvršćavanja.

Ispitivanja su pokazala da se većim udjelom superplastifikatora postiže bolja otpornost morta na mehanička naprezanja, dok je gustoća uzoraka bila veća, što doprinosi poboljšanoj trajnosti elemenata. No, važno je napomenuti da naknadno dodavanje superplastifikatora može dovesti do manjeg učinka u usporedbi s dodavanjem tijekom početnog miješanja, što upućuje na važnost pravilnog projektiranja betonske mješavine i načina primjene ovog aditiva. Nadalje, iako je povećanje količine superplastifikatora uglavnom rezultiralo boljim svojstvima morta, postavljanje optimalne količine ključno je za izbjegavanje eventualnih negativnih efekata poput segregacije pojedinog sastojka mješavine uslijed prevelike obradivosti ili potencijalnog smanjenja čvrstoće u dugoročnom periodu. Na temelju ovog rada, može se zaključiti da pravilno doziranje i način primjene superplastifikatora igraju ključnu ulogu u postizanju poboljšanih performansi cementnog morta.

## 11. LITERATURA

- [1] Štirmer N., *Hrvatska tehnička enciklopedija, mrežno izdanje*, Leksikografski zavod Miroslav Krleža, objavljeno 21.06.2024., <https://tehnika.lzmk.hr/beton/>, pristup 23.07.2024.
- [2] Bede Odorčić N., *Općenito o betonu. Sastojci betona*, Predavanje u okviru kolegija Inženjerski materijali, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka 2022.
- [3] Vrbos N., *Dodaci za cementne kompozite*, Nastavni materijal, Sveučilište u Zagrebu, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, Zagreb 2017., [https://www.fkit.unizg.hr/download/repository/DODACI\\_ZA\\_CEMENTNE\\_KOMPOZITE\\_-\\_NASTAVNI\\_TEKST\\_12.04.2017.pdf](https://www.fkit.unizg.hr/download/repository/DODACI_ZA_CEMENTNE_KOMPOZITE_-_NASTAVNI_TEKST_12.04.2017.pdf), pristup 31.07.2024.
- [4] Superplastifikatori nove generacije, <https://korak.com.hr/superplastifikatori-nove-generacije/>, pristup 31.07.2024.
- [5] Mardani A., Tuyan M., Yilmaz G., *Effect of different types of superplasticizer on fresh, rheological and strength properties of self-consolidating concrete*, Construction and Building Materials, Turska, 2013.
- [6] Salem M., Alsadey S., Johari M., *Effect of Superplasticizer Dosage on Workability and Strength Characteristics of Concrete*, IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering, Libia, 2016.
- [7] Bede Odorčić N., *Svojstva svježeg betona. Projektiranje sastava betona*, Predavanje u okviru kolegija Inženjerski materijali, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka 2022.
- [8] Bede Odorčić N., *4. laboratorijska vježba – Fizikalna i mehanička svojstva cementa*, Laboratorijska vježba u okviru kolegija Inženjerski materijali, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka 2022.
- [9] Controls group, <https://controls-group.com/product/vebe-consistometer/>, pristup 05.09.2024.
- [10] Controls group, <https://controls-group.com/product/waltz-container/>, pristup 05.09.2024.
- [11] Bede Odorčić N., *Čvrstoća i zakazivanja betona*, Predavanje u okviru kolegija Inženjerski materijali, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka 2022.
- [12] Bede Odorčić N., *6. laboratorijska vježba – Ispitivanje očvrslunog cementnog morta i betona*, Predavanje u okviru kolegija Inženjerski materijali, Sveučilište u Rijeci, Građevinski fakultet, Rijeka 2022.
- [13] Holcim (Hrvatska) d.o.o., *Proizvodi i usluge*, <https://www.holcim.hr/proizvodi-i-usluge>, pristup 12.08.2024.
- [14] Mapei, *Dynamon SF 16*, <http://www.mapei.com/>, pristup 12.08.2024.

[15] Hrvatski zavod za norme, HRN EN 1015-6:2000, *Metode ispitivanja mortova za zide – 6. dio: Određivanje gustoće svježeg morta*

[16] Hrvatski zavod za norme, HRN EN 1015-3:2000, *Metode ispitivanja mortova za zide – 3. dio: Određivanje konzistencije svježeg morta (stolićem za potresanje)*

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

[18] Čećez M, Šahinagić-Isović M., *Mortovi s dodatkom lokalnih industrijskih nusproizvoda*, Građevinar, Časopis Hrvatskog saveza građevinskih inženjera, 2019.