

Razvoj brzovezujućeg morta od kalcij aluminatnog cementa i litijevog karbonata

Brešan, Tomislava

Master's thesis / Diplomski rad

2021

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:

University of Split, Faculty of Civil Engineering, Architecture and Geodesy / Sveučilište u Splitu, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:123:416258>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2024-07-19**



Repository / Repozitorij:

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



UNIVERSITY OF SPLIT



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

DIPLOMSKI RAD

Tomislava Brešan

Split, 2021.

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

Tomislava Brešan

**Razvoj brzovezujućeg morta od kalcij aluminatnog
cementa i litijevog karbonata**

Diplomski rad

Split, 2021.

SVEUČILIŠTE U SPLITU
FAKULTET GRAĐEVINARSTVA, ARHITEKTURE I GEODEZIJE

STUDIJ: **DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ GRAĐEVINARSTVA**

KANDIDAT: Tomislava Brešan

MATIČNI BROJ (JMBAG): 0083215224

KATEDRA: **Katedra za građevinske materijale**

PREDMET: Građevinski materijali 2

ZADATAK ZA DIPLOMSKI RAD

Tema: Razvoj brzovezujućeg morta od kalcij aluminatnog cementa i litijevog karbonata

Opis zadatka: Zadatak diplomskog rada je razviti brzovezujući mort izrađen od kalcij aluminatnog cementa kao veziva te litijevog karbonata kao ubrzivača vezanja. Potrebno je teorijski obraditi svojstva i primjenu brzovezujućih mortova, te relevantna svojstva aluminatnog cementa i djelovanje litijevog karbonata na njegovo ubrzavanje vezivanja.

U eksperimentalnom radu potrebno je istražiti utjecaj doze litijevog karbonata na vrijeme vezanja, obradljivost i čvrstoću standardnog morta s kalcij aluminatnim cementom. Na temelju prethodne analize potrebno je projektirati sastav brzovezujućih mortova čije je vrijeme vezanja unutar jednog sata, uz upotrebu superplastifikatora i mineralnih dodataka. Sve dobivene rezultate potrebno je analizirati i dati najvažnije zaključke rada.

U Splitu, 01. ožujka 2021.

Voditelj Diplomskog rada:

doc.dr.sc. Goran Baloević

Predsjednik Povjerenstva
za završne i diplomske ispite:
Doc. dr. sc. Ivo Andrić

Razvoj brzovezujućeg morta od kalcij aluminatnog cementa i litijevog karbonata

Sažetak:

Cilj rada je projektirati recepture s kalcij aluminatnim cementom kao vezivom u svrhu dobivanja brzovezujućeg morta. Kako je poznato da litijev karbonat utječe na ubrzavanje početka vezanja, u ovom radu se nastojalo istražiti koja je potrebna količina litijevog karbonata da se vezanje odvije unutar sat vremena od kontakta cementa s vodom. Osim potrebne količine Li_2CO_3 provelo se i istraživanje utjecaja superplastifikatora i mineralnih dodataka na brzinu vezanja. Uspoređena su dobivena svojstva materijala u svježem stanju i 24 sata nakon u očvrslom stanju.

Ključne riječi:

kalcij aluminatni cement, litijev karbonat, brzovezujući mort, superplastifikator, mineralni dodatak, silikatna prašina, leteći pepeo, metakaolin

Development of quick-setting mortar from calcium aluminate cement and lithium carbonate

Abstract:

Main goal of the thesis was to design recipe with calcium aluminate cement as binder in order to get quick-setting mortar. It's commonly known that lithium carbonate accelerates start of setting, so this thesis tried to find out which quantity of Li_2CO_3 is needed so that setting finishes one hour from first contact cement's with water. Besides that, research was done about how superplasticisers and mineral admixtures for concrete affect speed of setting. Properties of material in fresh condition were compared to the ones 24 hours after, in hardened condition.

Keywords:

calcium aluminate cement, lithium carbonate, quick-setting mortar, superplasticiser, mineral admixtures, silica fume, fly ash, metacaolin

SADRŽAJ:

1. UVOD	1
2. OPĆENITO	2
2.1. Mort.....	3
2.2. Kalcij aluminatni cement.....	6
2.3. Litijev karbonat	9
3. PROJEKTIRANJE MORTA.....	11
3.1. Korišteni materijali.....	11
3.1.1. Kalcij aluminatni cement - ISTRRA 50.....	11
3.1.2. Voda	13
3.1.3. Standardni pijesak	13
3.1.4. Prirodni agregat-klasični pijesak	15
3.1.5. Litijev karbonat	16
3.1.6. Superplastifikator-MasterGlenium ACE 430	17
3.1.7. Mineralni dodaci.....	18
Silikatna prašina	18
Metakaolin.....	19
Leteći pepeo	20
3.2. Korištene metode ispitivanja	21
3.2.1. Standardni Vicatov aparat	21
3.2.2. Modificirani Vicatov aparat	23
3.2.3. Stolić za potresanje.....	24
3.2.4. Metoda ultrazvuka.....	24
3.2.5. Ispitivanje savojne čvrstoće.....	27
3.2.6. Ispitivanje tlačne čvrstoće	28
4. EKSPERIMENTALNI DIO.....	30
4.1. Određivanje standardne konzistencije kalcij aluminatnog cementa	30
4.2. Ispitivanje paste pod utjecajem različitih doza litijevog karbonata.....	32
4.3. Standardni mort s dodatkom litijevog karbonata.....	37
4.4. Ispitivanje morta pod utjecajem superplastifikatora i mineralnih dodataka	45
5. ZAKLJUČAK	53
6. LITERATURA.....	54
7. PRILOZI.....	57

1. UVOD

Brzovezujući, reparaturni mort odlikuje ekstremno visokim čvrstoćama. Pogodan je za popravke, poravnanja neravnih površina, zatvaranje šupljina i pora. Posebice je pogodan za brzu ugradnju i korištenje saniranog dijela već nakon par sati.

Istraživanjem svojstava kalcij aluminatnog cementa (CAC) u ovom radu se nastoji dobiti mješavina kojoj će vrijeme vezanja biti unutar jednog sata uz što bolju obradivost i čvrstoću. Da bi ostvarili tražene rezultate potrebno je dobro izbalansirati količine dodataka, uz široki spektar kombinacija.

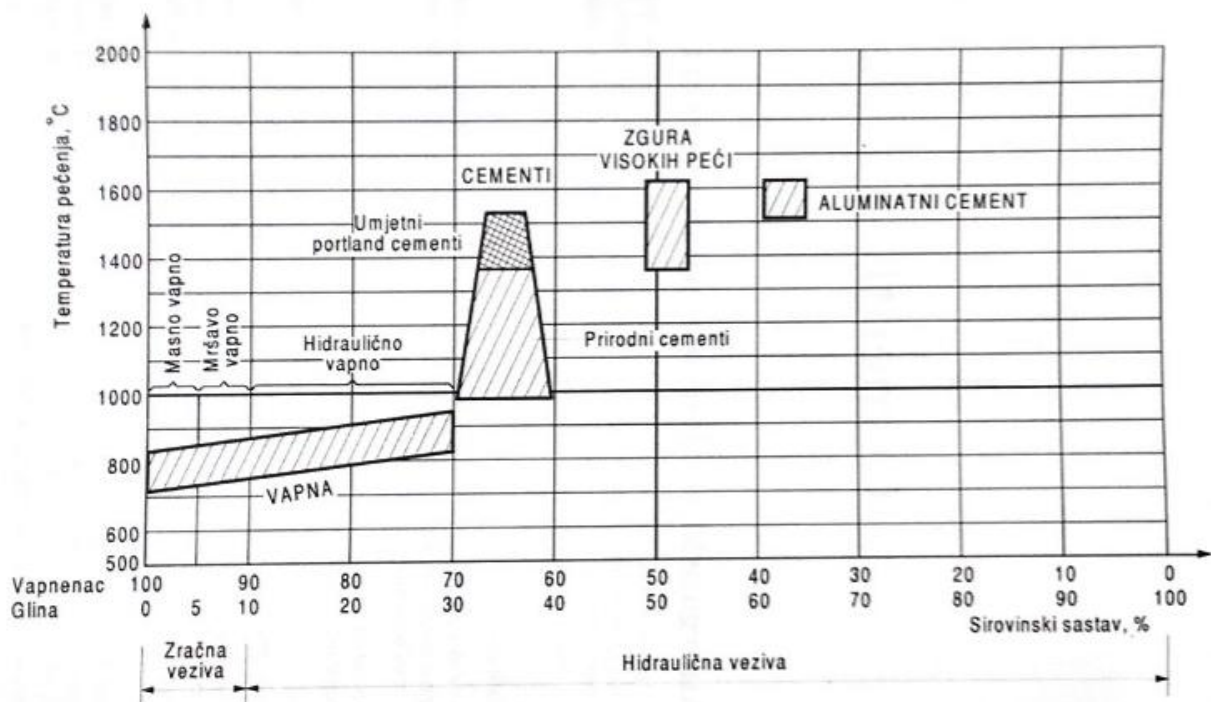
Nakon određivanja standardne konzistencije vrši se ispitivanje kako različite doze litijevog karbonata (Li_2CO_3) utječu na vezanje paste. Ovisno o prethodno dobivenim rezultatima projektiran je standardni mort (ispitan na različite količine litijevog karbonata) i mort s prirodnim agregatom (ispitan na različite količine litijevog karbonata, superplastifikatora i mineralnih dodataka).

U eksperimentalnom dijelu rada prikazane su recepture za svaku mješavinu kao i rezultati ispitivanja uzoraka u svježem stanju na vrijeme vezanja i obradljivost te u očvrslom stanju na brzinu ultrazvuka te savojnu i tlačnu čvrstoću. Dobiveni rezultati prikazani su dijagramima uz komentar uočenog ponašanja mješavine kao i međusobna usporedba mješavina.

2. OPĆENITO

Pečenjem sirovina na visokim temperaturama u strogo kontroliranim uvjetima dobivamo vezivne materijale koji pomiješani s vodom ili nekim drugim sredstvom, nakon kemijske reakcije, dobiju svojstva krutog tijela. Proces koji se odvija naziva se vezanje. Svojstva veziva, a time i vrsta dobivenog veziva, ovisna su o dva temeljna parametra čiju ovisnost vidimo na slici 1.:

- temperaturi pečenja
- kemijskom sastavu sirovine [2].



Slika 1. Sirovinski sastav i temperatura pečenja veziva [2]

2.1. Mort

Mort je vezni materijal koji se dobije miješanjem osnovnog veziva, vode i agregata. Ovisno o namjeni dijelimo ih na mortove za zidanje, žbukanje, fugiranje, sanacijske mortove te mortove za injektiranje. Primjenjuju se za zidanje svih vrsta zidova od kamena, građevinske keramike i različitih elemenata od lakih i običnih betona. Pored toga, primjenjuju se i za žbukanje zidova (u jednom ili više slojeva), kao spojno sredstvo za lijepljenje različitih vrsta ploča i pločica, kao mortovi za izradu podloga i košuljica za podove itd. U novije vrijeme mortovi se također primjenjuju i kod spajanja elemenata od kojih se izvode montažne betonske konstrukcije, a također i kao materijali za izvođenje različitih vrsta injektiranja (za injektiranje šupljina i pukotina u stijenskoj masi, tlu, betonskim konstrukcijama i sl., za ispunjavanje kanala za prolaz čeličnih kablova kod konstrukcija od prednapregnutog betona itd.) [3].

Ovisno o zahtijevanim karakteristikama cementnog morta potrebno je pažljivo odrediti omjere sastojaka za njegovu uporabu. Prema našim standardima, sastav morta se određuje polazeći od uvjeta definiranih u projektu objekta na kome će se dati mort primijeniti: tehnički propisi za mortove, zahtijevana debljina sloja i predviđena konzistencija.

Omjeri miješanja cementa i pijeska kreću se od 1:1 do 1:4, dok se voda dodaje prema potrebi, ovisno o željenoj konzistenciji smjese morta. U ovakvim slučajevima vodo-cementni faktor se obično kreće između 0.4 i 0.5.

U vezi sa spomenutim, postupak određivanja sastava morta se može u općem slučaju podijeliti u tri etape: projektiranje mješavine, eksperimentalna provjera karakteristika uz eventualne korekcije sastava i konačno utvrđivanje sastava.



Slika 2. Mort

Agregat prisutan u mortovima je najčešće sa zrnima krupnoće do 4 (mm). Ograničavanje sadržaja glinovitih i vrlo sitnih čestica u agregatu je neophodno zbog toga što ovi sastojci, zbog vrlo velike specifične površine zrna zahtijevaju veliku količinu vode, čime u negativnom smislu utječu na fizičko-mehanička svojstva morta. Pored toga, ukoliko ove čestice obavijaju zrna pijeska, adhezija između pijeska i veziva će biti smanjena, što će također utjecati na pogoršanje fizičko-mehaničkih karakteristika. Vrlo sitne čestice utječu i na proces očvršćavanja veziva, pošto su u stanju da okruže ("zarobe") zrna veziva, da ih time blokiraju i onemogućavaju njihovu vezivnu aktivnost.

Dodaci su tvari koje se dodaju u svježu mješavinu u malim količinama i svojim djelovanjem mijenjaju svojstva morta. Razlikuju se različite vrste dodataka kao što su plastifikatori, superplastifikatori, stabilizatori, dodaci za vodonepropusnost, usporivači i ubrzivači vezanja, ubrzivači očvršćavanja, dodaci za bolje injektiranje itd.. Za kvalitetu morta je bitno da proizvođač ispita utjecaj aditiva na mort kako bi se odredila optimalna doza aditiva.

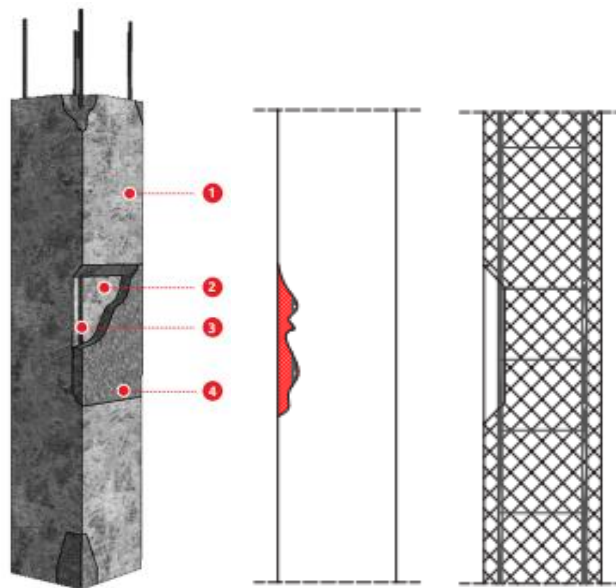
Svojstva morta ovise o načinu pravljenja, vezivu te o ugradbi i njegovanju morta, a smije se izmiješati samo ona količina morta koja se može ugraditi prije početka vezanja, s time da se održava potrebna konzistencija. Ovi dodaci se primjenjuju u količinama od nekoliko posto u odnosu na masu veziva. Stoga se u praksi, ukoliko se želi dobiti mort određenih mehaničkih karakteristika, svim navedenim faktorima mora posvetiti odgovarajuća pažnja.

Ubrzivači utječu na redoslijed otapanja glavnih minerala cementa, te sudjeluju u formiranju konačnih produkata hidratacije. Europski standardi za aditive dijele ubrzivače na dvije vrste i to na ubrzivače vezanja i ubrzivače očvršćavanja [2].

U ovom radu je ispitan utjecaj litijevog karbonata na brzinu vezanja u svrhu dobivanja brzovezujućeg, reparaturnog morta za sanacijske radove. Osim što utječe na brzinu vezanja, litijev karbonat je pokazao da ubrzava i razvoj čvrstoće i to već 24 sata nakon izrade uzoraka.

Mortovi za sanacijske radove pogodni su za popravke, zatvaranje šupljina, izravnavanja i obrade nosivih i nenosivih zidova, stropova i stupova od opeke, kamena te mješovitog ziđa. Primjenjuju se i za konstruktivna ojačavanja oštećenih zidanih elemenata u svrhu jednolike raspodjele mehaničkih opterećenja, ali i sanaciju betonskih konstrukcija gdje mort nije

izložen statičkom opterećenju. Primjenjujemo ih u svrhu obnove potresom oštećenih objekata i ojačanja konstrukcije na seizmičko djelovanje.



Slika 3. Vizualizacija sanacije lokalnog oštećenja AB konstrukcije [29]

(1. AB stup; 2. uklonjen oštećeni beton; 3. očišćena i zaštićena armatura; 4. reparaturni mort)

Prije same sanacije konstrukcije potrebno je utvrditi postojeće stanje, buduću namjenu konstrukcije te raspoloživo vrijeme i uvjete izvođenja sanacije. Na primjeru sanacije reparaturnim mortom sa slike 3. u postupak primjene treba slijediti dolje navedene korake:

- ukloniti sve slabovezne dijelove do čvrste i nosive podloge
- temeljito očistiti vidljivu armaturu i zaštititi antikoroziivnim premazom
- podlogu impregnirati
- nanijeti u propisanoj debljini reparaturni mort [29]

Konzistencija smjese morta ovisi od nizu faktora: vrsti, količini i granulometrijskom sastavu agregata, vrsti i količini veziva, količini vode, količini prisustva aditiva, postupku spravljanja i dr. Međutim, ovo svojstvo prije svega ovisi od vodovezivnom faktoru.

S obzirom na to da se u većini slučajeva smjesa morta na podlogu nanosi bez intenzivnijeg zbijanja, konzistencija morta je najčešće tekuća ili plastična. Konzistencija morta treba biti takva da nakon njegovog nanošenja na određenu podlogu, a u ovisnosti o primijenjenom

načinu nanošenja, u optimalnoj mjeri bude osigurano popunjavanje svih oblika neravnomyjnosti date podloge (udubljenja, pukotine i dr.), što je osnovni uvjet da se ostvari potrebna ravnomjernost veze mort-podloga.

Međutim, ukoliko se prilikom ugrađivanja morta primjenjuju postupci mehaničkog zbijanja, konzistencija smjese može biti i "suvlja", tj. mogu se koristiti i smjese većeg viskoziteta. Pored ovoga, smjesa morta treba biti takvog sastava da se u potpunosti isključi mogućnost pojave izdvajanje vode i segregacija čestica veziva i agregata, kao i mogućnost gubitka veće količine vode uslijed kapilarnog upijanja od strane podloge. Ako nastupi bilo koji od ovih slučajeva, doći će do osjetnog pada mnogih fizičko-mehaničkih karakteristika očvrsllog morta.

2.2. Kalcij aluminatni cement

Aluminatni cement proizvodi se finim mljevenjem aluminatnog cementnog klinkera koji se pretežno sastoji od monokalcijeva aluminata ($\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$), a proizvodi se slično kao i portlandcementni klinker pečenjem smjese aluminatnih i vapnenih sirovina, ali u drugačijem omjeru, odnosno pečenjem vapnenca i boksita na temperaturama od 1500 do 1600 °C [26].

U tehnološkom procesu unutar rotacijske peći dolazi do sintetiranja granula materijala, tj. dolazi do spajanja oksida u cementne minerale.

U tablici 1. prikazana je usporedba količina glavnih oksida izražena u postocima za portland cement i aluminatni cement, a osim glavnih oksida javljaju se i sporedni oksidi kojih u cementu ima najčešće nekoliko postotaka. Po sastavu, ova dva cementa se bitno razlikuju.

Tablica 1. Kemijski sastav portland cementa i aluminatnog cementa

Kem. oznaka glavnih oksida	Skraćena oznake oksida (koristi se u kemiji silikata)	Portland cement	Aluminatni cement
Al_2O_3	A	2 – 8 %	40 – 45 %
CaO	C	54 – 68 %	30 – 35 %
SiO_2	S	20 – 25 %	4 – 10 %
Fe_2O_3	F	2 – 5 %	5 – 15 %

Aluminatni cement za razliku od portland cementa već nakon 12 do 24 sata postiže veliku čvrstoću (i do 80 % konačne čvrstoće). Međutim, primjena mu je ograničena jer prebrzo oslobađa veliku količinu topline hidratacije, koja u masivnom betonu uzrokuje pojavu prekomjernih temperaturnih naprezanja i pucanja betona.

Smjesa aluminatnog cementa i portlandskog cementa, u količini 20 do 80 % jednog od njih, trenutno vezuje i očvršćava formirajući defektnu strukturu vrlo male čvrstoće pa zbog toga treba paziti da ova dva betona ne dođu u dodir u svježem stanju. Beton s aluminatnim cementom može doći u dodir s betonom izrađenim s portland cementom starim najmanje 3 do 7 dana, a beton s portland cementom može doći u dodir s betonom s aluminatnim cementom starim najmanje 24 sata [26].

Prikladan je za neke sanacijske radove, za privremene i nekonstruktivne betonske elemente. Posebno je važna njegova primjena za izradu mortova i betona izloženih kemijski agresivnim tvarima i najvišim temperaturama ali isto tako i kada je potreban nagli prirast čvrstoće i kod niskih temperatura [1]. Na temperaturama od 800 do 1000 °C raspadaju se kemijske veze hidrata pa se betonu s aluminatnim cementom smanjuje čvrstoća. No, aluminatni cement je otporan na visoke temperature, što se pripisuje prevođenju hidrauličke veze pri visokim temperaturama u keramičku. Zbog toga se aluminatni cement najviše i primjenjuje za izradu betona izloženih požaru, koji su u eksploataciji izloženi visokim temperaturama bez vlage. Uz upotrebu specijalnih agregata, uspješno odolijeva i temperaturama do 1800 °C (vatrootporni betoni) [26].

Iako je znatno skuplji, izravno ne konkurira u bilo kakvoj primjeni gdje betoni izrađeni od portland cementa zadovoljavaju tražena svojstva.

Ipak, betoni na bazi ovih cemenata imaju vrlo visoke performanse u specifičnim primjenama. Izraz "visoke performanse" često se izjednačava, s velikom čvrstoćom, iako postoji sve veći naglasak na trajnosti. Međutim, ovo gledište čvrsto je povezano s idejom da se beton koristi samo za izgradnju zgrada i građevina.

Iako danas postoje alternativne domene u kojima se beton može natjecati s drugim materijalima (kao što su metal, plastika ili kombinacije više njih kako bi se postigle visoke razine performansa), postoje primjene u kojima jedinstvena svojstva kalcij aluminatnog cementa omogućuju upotrebu u teškim, tj. strogim okruženjima u kojima su često u

konkurenciji necementni materijali. Takvi betoni visokih performansa proširuju raspon primjene za cementne materijale.

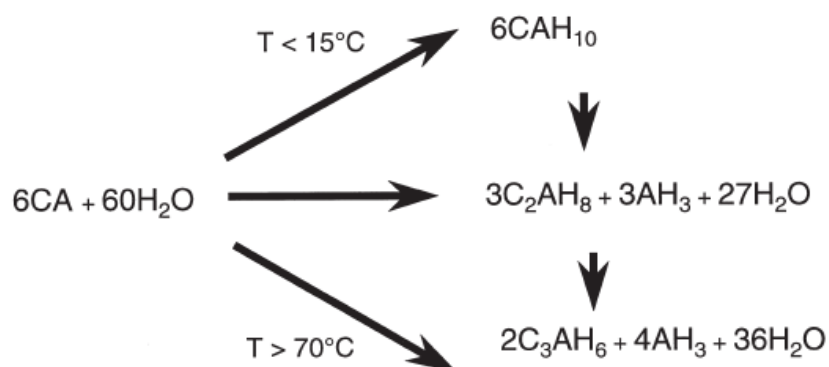
Hidratacija kalcij aluminatnog cementa

Suprotno hidrataciji portland cementa (koja ima manje izraženu ovisnost o temperaturi), hidratacija kalcij aluminatnog cementa jako ovisi o temperaturi, te ovisno o njoj dobivamo morfološki i strukturno različite proizvode hidratacije koji kontinuirano mijenjaju svojstva materijala. Bitno je dobro poznavanje toplinskih svojstva u ranim fazama hidratacije. Podaci o toplinskim svojstvima kalcij aluminatnog cementa posebno su zanimljivi zbog visoke razine stvaranje topline u reakciji hidratacije i rezultirajuće visoke temperature gradijenta u materijalu. Tijekom hidratacije kalcij aluminatnog cementa velika količina (tipično 70–90%) ukupne topline oslobađa se u kratkom razdoblju (prva 24 sata), što može uzrokovati značajno povećanje temperature materijala.

Kalcij aluminatni cement sadrži CaO i Al_2O_3 kao glavne okside, s ili bez malo silicijevog dioksida. Oni se kombiniraju kako bi dali mono-kalcijev aluminat (CA), koji reagira s vodom za dobivanje kalcij aluminatnog hidrata.

U reakciji s vodom nastaju hidrati koji ovise o temperaturi hidratacije, kako je prikazano na slici 4.

Na nižim temperaturama CAH_{10} je prvi formirani hidrat, na srednjim temperaturama C_2AH_8 i AH_3 , i pri višim temperaturama C_3AH_6 i AH_3 .



Slika 4. Reakcije kalcij aluminatnog cementa s vodom

Stabilne faze su C_3AH_6 i AH_3 , a ostale faze će se neizbježno pretvoriti u njih brzinom koja ovisi o temperaturi i vlažnosti. C_3AH_6 ima najveću gustoću kalcij aluminatnog hidrata, što rezultira većom poroznošću na određenom stupnju hidratacije. Međutim, reakcija pretvorbe također dovodi do oslobađanja vode, koja je dostupna za daljnje reakcije preostalog materijala koji ne sadrži vodu.

Omjer vode i cementa, te količina glavnih minerala u kalcij aluminatnom cementu su glavne varijable zato što se slobodna voda oslobađa promjenom reakcije (metastabilni hidrati sadrže više vode od stabilnih), što pridonosi daljnjoj hidrataciji nehidratiziranih cemenata koji dalje popunjavaju poroznost.

Prema tome, štetan učinak na svojstva kalcij aluminatnog cementa može se dogoditi smanjenjem w/c omjera. U svrhu poboljšanja obradivosti uslijed niskog w/c omjera koriste se superplastifikatori.

Materijali na bazi kalcij aluminatnog cementa koji postavljeni u roku od nekoliko minuta postižu visoku ranu čvrstoću lako se mogu dobiti dodavanjem litijevog karbonata.

Naglom porastu čvrstoće aluminatnog cementa ne prethodi ubrzanje procesa vezanja. Dapače, početak vezanja je kasniji nego za portland cemente, a kraj vezanja uslijedi brže. Dakle, aluminatni cement spada u brzoočvršćavajuće, a ne u brzovezujuće cemente [1].

2.3. Litijev karbonat

Ubrzivači utječu na redoslijed otapanja glavnih minerala cementa, te sudjeluju u formiranju konačnih produkata hidratacije. Mehanizam djelovanja ubrzivača na hidrataciju cementnih minerala veoma je složen i ima mnogo aspekata [2].

Litij je kemijski element koji pripada skupini alkalijskih metala. Njegov kation (Li^+) ima veliku gustoću naboja, mali radijus, veliku polarizabilnost i hidratacijski plašt koji litijevim solima omogućava veću kemijsku aktivnost u usporedbi s drugim solima koje se obično koriste za cementne paste, poput $NaCl$ i $CaCl_2$. Litijeve soli su poznate po poboljšanju efekta alkalno-silikatne reakcije dugi niz godina.

Kad se soli litija dodaju u cementnu pastu ili beton, značajno utječe na svojstva. Osobito na vrijeme vezanja, razvoj rane čvrstoće i količinu proizvoda hidratacije.

U literaturi je malo podataka o utjecaju litijevih iona na proces hidratacije kalcij aluminatnog cementa. Neka istraživanja sugeriraju da učinci litijevih soli na svojstva cementne paste ili betona ovise o kategorijama cementa i litijevih soli, pa čak i sadržaj litijevih soli u cementnoj pasti. Neka druga istraživanja pokazuju da soli litija mogu reagirati s produktom cementne hidratacije i tvore litijev aluminat hidrat, koji djeluje kao osnova za više stabilnije proizvode hidratacije, što rezultira poboljšanjem svojstava betona.

Vrijeme vezanja kalcij aluminatnog cementa uz utjecaj različitih iona raste u sljedećem poretku:

Kationi: $\text{Li}^+ \ll \text{Na}^+ < \text{uzorak bez ubrzivača} < \text{K}^+ \leq \text{Ca}^{2+} < \text{Mg}^{2+} < \text{Sr}^{2+} < \text{NH}_4^+$

Anioni: $\text{OH}^- \ll \text{uzorak bez ubrzivača} < \text{Cl}^- < \text{NO}_3^- < \text{Br}^- < \text{CH}_3\text{COO}^-$

Mnoge anorganske soli utječu na vezivanje kalcij aluminatnog cementa u koncentracijama od 0.1 do 0.5 % masenog udjela cementa. Učinak na vrijeme vezanja uvelike se razlikuje od uočenoga kod portland cementa.

Općenito, litijeve soli poput Li_2CO_3 , LiOH , LiCl i LiNO_3 najučinkovitije su i naširoko korišteni ubrzivači za kalcij aluminatni cement [27].

3. PROJEKTIRANJE MORTA

3.1. Korišteni materijali

3.1.1. Kalcij aluminatni cement - ISTR A 50

Ovaj podnaslov je sažet prema tehničkom listu cementa ISTR A 50.

ISTR A 50 udovoljava zahtjevima standarda HRN EN 14647 [5] za kalcij aluminatne cimente te se kontrolira sukladno zahtjevima standarda HRN EN 14647 [5]. Proizvodi se taljenjem odabranih sirovina (boksita i vapnenca) u posebnim pećima. Nakon hlađenja, klinker se melje u kugličnom mlinu.



Slika 5. Cement ISTR A 50, tvornica CALUCEM d.o.o.

Sljedeći podaci u tablici 2. predstavljaju tipične vrijednosti u kontroli kvalitete proizvodnje koja se provodi u tvornici Calucem d.o.o. u Puli.

Tablica 2. Kemijski sastav cementa ISTR A 50 (%)

SiO ₂	≤ 6
Al ₂ O ₃	50-55
Fe ₂ O ₃	≤ 3.0
CaO	≤ 40
MgO	≤ 1.5
SO ₃	≤ 0.4

ISTRA 50 sadrži uglavnom mono-kalcijev aluminat (CA). Ta mineralna faza je odgovorna za postizanje visokih ranih čvrstoća. Kada se miješa s vodom, ISTRA 50 stvara kalcij-aluminatne hidrate kao produkte hidratacije.

Tablica 3. Mineralne faze cementa ISTRA 50

Glavna mineralna faza:	CA > 60
Sporedne mineralne faze:	C ₂ AS, CT, C ₁₂ A ₇

Tablica 4. Tehničke značajke cementa ISTRA 50

Ostatak na situ pri:	90 mm < 3%
Finoća (Blaine):	4100-4700 cm ² /g
Nasipna gustoća:	1.0 g/cm ³
Specifična gustoća:	3.0-3.1 g/cm ³
Vatrostalnost oko:	1440 °C

Rezultati testiranja vremena vezivanja prikazani su u tablici 5. Ispitivanje se provelo na mortu kako bi se opisalo ponašanje cementa ISTRA 50 u obradljivim smjesama. Za prikazane rezultate koristi se smjesa koja sadrži CEN-standardni pijesak i vodo-cementi faktor 0.4, a testiranje se provodi na temelju standarda HRN EN 14647 [5].

Tablica 5. Rezultati testiranja vremena vezanja cementa ISTRA 50

Početak vezanja	2:00 - 5:00 h
Kraj vezanja	Max. 120 min nakon početka vezivanja
Potreba za vodom	27 ± 2%

Nakon vezivanja, čvrstoća se razvija iznimno brzo. ISTRA 50 je cement s iznimno visokim ranim tlačnim čvrstoćama. Nakon jednog dana, tlačna čvrstoća je veća od one kojom se odlikuju visoko kvalitetni Portland cementi CEM I 52.5 R nakon 28 dana.

Tablica 6. Razvoj čvrstoće (N/mm²)

Vrijeme	6 h	1 d
Tlačna čvrstoća	>18	>60

Testovi se provode na prizmama 40x40x160 (mm) sukladno standardu HRN EN 14647, a koji sadrži CEN- standardni pijesak i vodo-cementni faktor 0.4.

3.1.2. Voda

Za izradu uzoraka korištena je demineralizirana voda laboratorijske temperature kako bi se izbjegao utjecaj potencijalno otopljenih tvari u vodi na rezultate ispitivanja.

3.1.3. Standardni pijesak

Ovaj podnaslov je sažet prema tehničkom listu za standardni pijesak CEN (ISO standardni pijesak).

Prilikom ispitivanja (paste i morta) primjenjuju se mješavine u kojima pijesak igra vrlo značajnu ulogu. Da bi utjecaj pijeska kod svih ovakvih ispitivanja predstavljao određenu konstantu, odnosno da bi se ispitivanja uvijek vršila pod istim uvjetima, koristi se pijesak standardiziranih karakteristika- tzv. standardni pijesak.

Standardni pijesak CEN (ISO standardni pijesak) je prirodni pijesak, koji je silicijev, posebno u svojim najfinijim frakcijama. Čestice su općenito izometrijske i zaobljenog oblika. Suši se, prosijava i priprema u modernoj radionici koja nudi svako jamstvo u pogledu kvalitete i postojanosti.

Pijesak je pakiran u polietilenske vrećice od kojih svaka sadrži $1\,350 \pm 5$ g.

Mjereno prosijavanje je u skladu je sa zahtjevima EN 196-1 i ISO 679: 2009 [6].

Tablica 7. Mjereno prosijavanje

Square mesh Size (mm)	Cumulative (%) retained
0.08	99 ± 1
0.16	87 ± 5
0.50	67 ± 5
1.00	33 ± 5
1.60	7 ± 5
2.00	0

Tablica 8. Fizička i kemijska svojstva

Agregatno stanje:	čvrsto
SiO ₂	> 95 %
Oblik:	kristalni
Oblik zrna:	zaobljeni
Boja:	bijela
Miris:	bez mirisa
Specifična temperatura za promjene fizičkog stanja:	-Temperatura taljenja: 1610 ° C -Temperatura vrenja: 2230 ° C
Temperatura raspadanja:	nema
Eksplozivna svojstva:	nije primjenjivo
Zapremina mase:	- apsolutna: 2.63 g/m ³ - prividna: 1.6 g/cm ³



Slika 6. Standardni pijesak CEN (ISO standardni pijesak)

3.1.4. Prirodni agregat-klasični pijesak

Rezultati prikazani u tablici 9. dobiveni su na temelju određivanja granulometrijskog sastava na uzorku pijeska iz tvornice Beton Trogir d.o.o..

Pijesak spada u skupinu prirodno nevezanih stijena, tj. materijala koji se dobivaju prirodnim usitnjavanjem (drobljenjem i raspadanjem) stijenske mase. Granulometrijski sastav agregata dobiva se postupkom prosijavanja, pri čemu se koristi određen broj sita s unaprijed određenim veličinama otvora. Odabrana sita postavljaju se u poretku da se smanjuju idući prema dole. Materijal se sipa od gore, na sito s maksimalnom veličinom otvora, pa se sve zajedno izlaže potresima uslijed kojih dolazi do prosijavanja. Nakon isteka vremena koji je predviđen za prosijavanje, mjerenjem se utvrđuju mase agregata koje su se zadržale na pojedinim sitima.

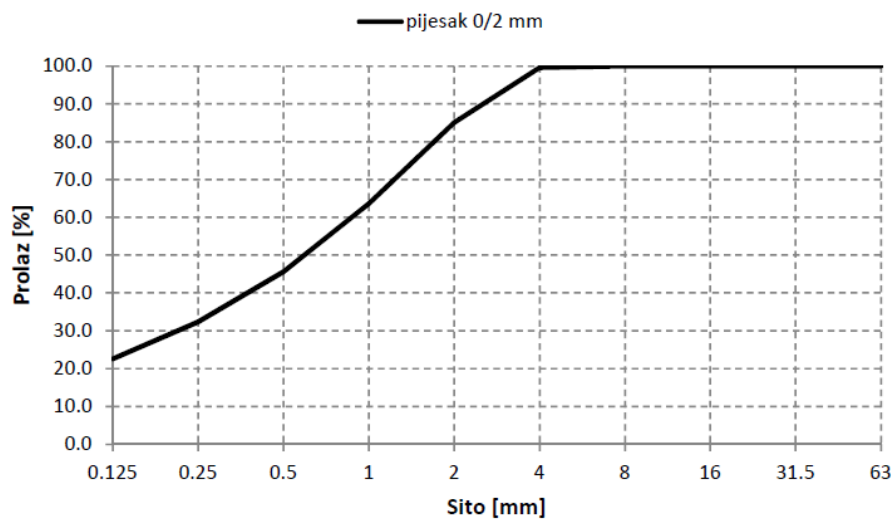
Tablica 9. Rezultati prosijavanja

Sito	Ostatak	Prolaz	Ostatak	Prolaz
(mm)	(g)	(g)	(%)	(%)
63	0.0	815.8	0.0	100.0
31.5	0.0	815.8	0.0	100.0
16	0.0	815.8	0.0	100.0
8	0.0	815.8	0.0	100.0
4	3.2	812.6	0.4	99.6
2	118.5	694.1	14.9	85.1
1	174.7	519.4	36.3	63.7
0.5	147.1	372.3	54.4	45.6
0.25	108.1	264.2	67.6	32.4
0.125	79.9	184.3	77.4	22.6
<0.135	184.3	-	-	-
Ukupno	815.8			

Početno (g)	Razlika (g)	Odstupanje	Ref. (%)	Ocjena
819.1	3.3	0.0	<1	Zadovoljava

Modul finoće: MF 2.510

Koeficijent zrnatosti: KF 3.490



Slika 7. Grafički prikaz granulometrijskog sustava

3.1.5. Litijev karbonat

Izmjerenu količinu litijevog karbonata u svrhe ispitivanja treba prethodno otopiti u vodi koja se koristi za izradu cementne paste ili morta kako bi se otopina pravilno rasporedila u cementnoj mješavini.



Slika 8. Korišteni litijev karbonat u svrhu ispitivanja

Proizvođač: Kemika, Zagreb

Tablica 10. Specifikacija

Sadržaj	≥ 99 %
Sastojci netopljivi u razrijeđenoj klorovodičnoj kiselini	≤ 0.01 %
Kloridi (Cl)	≤ 0.002 %
Nitrati (NO ₃)	≤ 0.001 %
Sulfati (SO ₄)	≤ 0.005 %
Kalcij (Ca)	≤ 0.005 %
Kalij (K)	≤ 0.005 %
Magnezij (Mg)	≤ 0.001 %
Natrij (Na)	≤ 0.005 %
Teški metali (kao Pb)	≤ 0.001 %
Željezo (Fe)	≤ 0.001 %

3.1.6. Superplastifikator-MasterGlenium ACE 430

Ovaj podnaslov je sažet prema tehničkom listu superplastifikatora MasterGlenium ACE 430.

GLENium ACE 430 je inovativan proizvod druge generacije superplastifikatora na bazi polikarboksilata. Uslijed brzog prijanjanja molekula na čestice cementa, kontroliranog s djelotvornim učinkom raspršivanja, povećana površina zrna cementa je izložena reakciji s vodom. Kao rezultat ovog učinka, moguće je postići ranije razvijanje hidratacijske topline, brzo razvijanje proizvoda hidratacije i kao posljedicu, veće čvrstoće nakon kratkog vremena.

Preporučena doza: 0.3 % do 1.0 % na masu cementa.

MasterGlenium ACE 430 dodaje se nakon min. 80% vode za miješanje. Ne smije se dozirati u u suhoj smjesi.

Proizvođač: BASF Performance Products, Austrija

Tablica 11. Tehnički podaci

Aktivna komponenta:	polikarboksilat
Sadržaj suhe tvari:	30.0 ± 1.5 %
Sadržaj klorida:	< 0.01 %
Ekvivalent Na ₂ O	< 1.0 %
Gustoća	1.06 ± 0.02 kg/ltr.
pH vrijednost	5.5 ± 1.5
Boja i oblik	tekućina smeđe boje

3.1.7. Mineralni dodaci

Dodaju se radi poboljšanja mehaničkih i/ili trajnosnih svojstava, smanjenja topline hidratacije, poboljšanja obradljivosti, estetskog izgleda [23].

Silikatna prašina

Fine silikatne prašine u sastavu pridonose boljoj koheziji, otpornosti segregaciji, te reduciraju izdvajanje vode u fazi očvršćivanja i povećavaju čvrstoću i svojstva trajnosti.

Proizvođač: BASF Performance Products



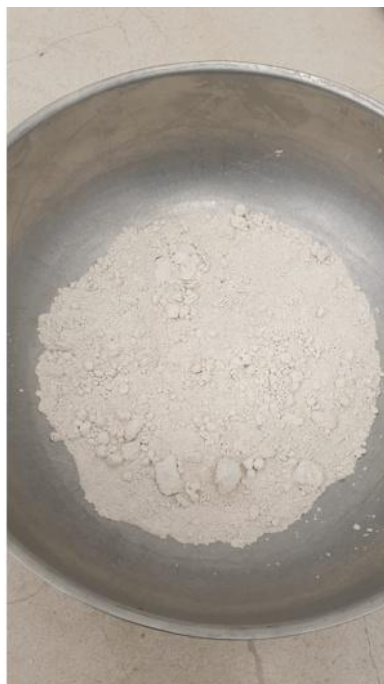
Slika 9. Upotrijebljena silikatna prašina u svrhu ispitivanja

Tablica 12. Tehničke specifikacije MEYCO® MS 610

Struktura materijala:	zgusnuta mikrosilika
Boja:	siva
Gustoća:	0.55 – 0.70 kg/ltr.
Količina klora (EN 480-10)	< 0.1 %
Specifična površina (finoća):	> 15000 m ² /kg
SiO ₂ omjer:	> %85
CaO omjer:	> %1
SO ₃ omjer:	< %2
0.045 < omjer čestica	< %40
Indeks aktivnosti:	< %95
Specifična težina:	2300 kg/m ³

Gore navedene vrijednosti date su za +23 ° C i 50% relativne vlažnosti.

Metakaolin



Slika 10. Upotrijebljen metakolin u svrhu ispitivanja

Tablica 13. Tehničke karakteristike Metaver™ N

Specifična gustoća:	2.6 g/cm ³
Raspodjela veličine čestica:	d ₅₀ ~ 3.4-4.5 mm d ₉₅ ~ 12-18 mm
Specifična površina (Blaine):	ca. 22 000 cm ² /g
Specifična površina (BET):	ca. 18 m ² /g
Boja:	bijela
Bjelina (dr. Lange):	ca. 87

Posebna značajka Metaver™ N je njegova sposobnost vezanja velike količine slobodnog vapna u obliku stabilne CSH-faze. Brzina i količina ove reakcije može se kontrolirati drugim dodacima i odgovarajućim metodama.

Metaver™ N se lako miješa i daje mekanu plastičnu konzistenciju koja je laka za rad. Zbog distribucije veličine čestica ne dolazi do velikog povećanja potražnje za vodom.

Metaver™ N pokazao je svoje prednosti u situacijama u kojima se snaga, gustoća i otpornost traže.

Proizvođač: NEWCHEM, Švicarska

Leteći pepeo

Leteći pepeo je fini prah, dobiven kao nusprodukt u termoelektranama koje imaju pogon na ugljen. Kemijski sastav pepela ovisi o vrsti ugljena koji se koristi kao gorivo. Upotrebom letećeg pepela poboljšava se obradivost, smanjuje se toplina hidratacije te se smanjuje sadržaj cementa, a samim time i cijena proizvoda. Međutim prevelika količina ovog dodatka može uzrokovati toliku kohezivnost cementne paste da ona ne teče. Jedan dio letećeg pepela djeluje kao punilo, dok drugi dio djeluje kao vezivo [23].



Slika 11. Upotrijebljen leteći pepeo u svrhu ispitivanja

Korišten je leteći pepeo iz obližnje termoelektrane, ispitana svojstva prikazana su u tablici 14.

Tablica 14. Ispitana svojstva

Specifična površina:	5 118 g/cm ³
Ostatak na situ 0.045 mm:	5.8 %

3.2. Korištene metode ispitivanja

Konkretna ispitivanja vrše se prije početka, tijekom i nakon završetka procesa vezanja, na specijalno izrađenim uzorcima za svrhu ispitivanja razvoja brzovezujućeg morta. Dobiveni rezultati na ispitanim uzorcima mogu varirati te pokazati različite vrijednosti zbog stohastičkog karaktera te se za rezultat ispitivanja uzima srednja vrijednost.

Ispitivanje uzoraka može se podijeliti u dvije grupe: na ispitivanja s razaranjem i ispitivanja bez razaranja. Postoji i mogućnost kombiniranja ovih dviju metoda.

3.2.1. Standardni Vicatov aparat

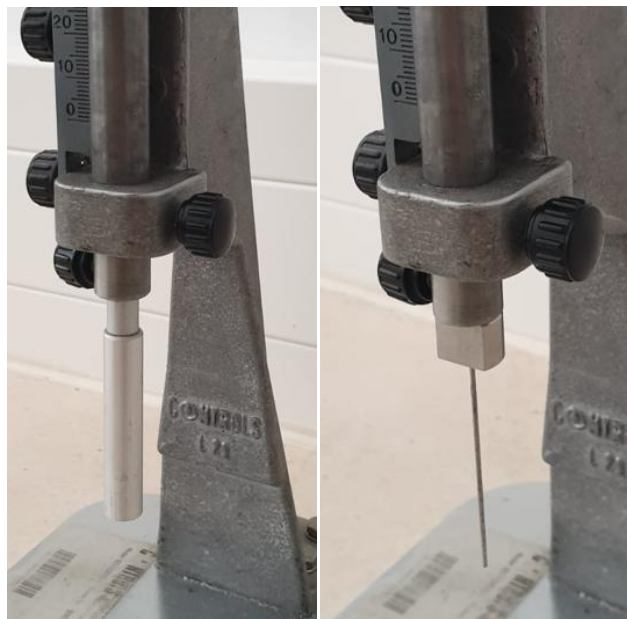
Određivanje konzistencije i vremena početka i kraja vezanja cementne paste vrši se Vicatovim aparatom, mjerenjem otpornosti prodiranja valjka/igle u cementnu pastu. Ispitivanje se provodi u skladu s normom HRN EN 196-3 [7].



Slika 12. Vicatov aparat

Dobivena smjesa se nakon završenog procesa miješanja postavlja u kalup u sloju debljine oko 20 (mm), te se zbiva s 15 udaraca jednoliko raspoređenih po cijeloj površini. Zatim se napuni kalup tako da se prelije smjesom te se ponavlja postupak zbivanja kao i za prvi sloj. Nakon zbivanja izravna se površina kalupa da smjesa bude u ravnini s kalupom. Kalup je u obliku cilindričnog prstena unutarnjeg promjera 76 ± 0.5 (mm), dubine 40 ± 1 (mm).

Ispitivanje standardne konzistencije provodi se pomoću Vicatovog aparata sa standardnim valjkom (promjer 10 mm, normirane težine). Sonda s valjkom postavi se u centar posude na površinu paste i zakoči se vijkom. Vijak se zatim, otpusti tako da valjak slobodno, vlastitom težinom, prodre u pastu. Ako se valjak, nakon 30 sekundi, zaustavi na 5-7 (mm) iznad staklene podloge, tada je cementna pasta standardne konzistencije. Ukoliko dobiveni rezultat ne zadovoljava tražene zahtjeve miješa se nova pasta u kojoj se korigira količina vode te se navedeni postupak ponavlja. Količina vode kod koje je postignuta standardna konzistencija treba se zabilježiti u postocima.



Slika 13. Vicatov valjak (lijevo); Vicatova igla (desno)

Na Vicatov aparat se, umjesto valjka, postavi igla za provođenje ispitivanja vremena vezanja. Igla se postavi na gornju površinu uzorka cementne paste i zaustavi. Nakon par sekundi igla se pušta da prodire u cementnu pastu i nakon 30 sekundi se bilježi dubina prodiranja. Postupak se ponavlja, sve dok se igla ne zaustavi na udaljenosti 3-5 (mm) od staklene podloge.

Vrijeme koje je proteklo od nultog vremena do trenutka kada se igla zaustavila na navedenoj vrijednosti zabilježava se kao početak vezivanja cementa. Zatim se prsten s pastom pažljivo okrene, te se ispitivanje nastavlja. Krajem vezivanja se smatra vrijeme koje je proteklo od nultog vremena do trenutka kada igla ne prodire u cementnu pastu više od 0.5 (mm) [24].

3.2.2. Modificirani Vicatov aparat

Glavna razlika između standardnog i modificiranog Vicatovog aparata je u debljini Vicatove igle za mjerenje vremena vezanja morta. Iglu od 1 mm, zamjenjuje igla od 2 ± 0.05 mm od nehrđajućeg čelika, a ispitivanje se ponavlja sve dok se igla ne zaustavi na udaljenosti od 10 (mm) od površine uzorka.

Ispitivanje se provodi u skladu s normom AASHTO T 185, ASTM C 359 [8].



Slika 14. Modificirana Vicatova igla

3.2.3. Stolić za potresanje



Slika 15. Stolić za potresanje

Na stoliću za potresanje prema EN 1015-3 [9] ispituje se obradljivost po principu mjerenja veličine rasprostiranja (D), koja se dobije nakon potresanja uzorka morta na potresom stolu.

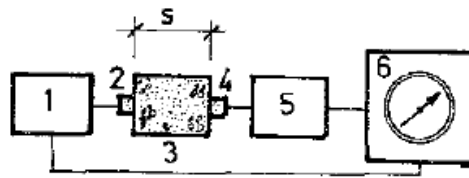
Dobiveni mort se sipa u šuplju posudu konusnog oblika postavljen na potresnom stolu koji je prethodno ovlažen. Nakon sipanja morta, konus se uklanja i počinje se s potresanjem. Princip potresanja se sastoji od 15 potresa u 15 sekundi, pri čemu brzina iznosi jedan potres u sekundi. Uslijed potresanja dolazi do rasprostiranja uzorka, a veličina rasprostiranja dobiva se kao aritmetička sredina u dva okomita smjera.

3.2.4. Metoda ultrazvuka

Pod pojmom ultrazvuk, podrazumijevamo vibracije iste prirode kao i zvuk, ali vrlo visokih frekvencija koje ljudsko uho nije u stanju registrirati. [3]

Shema uređaja za ispitivanje ultrazvuka prikazana je na slici 16., dok je na slici 17. prikazana konkretna aparatura koja se koristila za ispitivanje u ovom radu.

Ispitivanje se provodi u skladu s normom HRN EN 12504-4 [10].



Slika 16. Shema uređaja za ispitivanje ultrazvuka

Na slici 16. je vidljivo da se uređaj sastoji od generatora impulsa (1) i odašiljača (2) kojim se ultrazvučni impuls "uvodi" u uzorak (materijal) koji se ispituje (3). Odašiljanjem impulsa kroz uzorak, dolazi do prijenosa uzdužnih (longitudinalnih) valova, a zatim dolazi do prijemnika ultrazvuka (4) gdje se mehanički impulsi pretvaraju u električne. Pojačivač (5) i indikator vremena (6) omogućavaju dobivanje vremena prolaza ultrazvučnog vala kroz promatrani uzorak [3].

Svojstvo indikatora vremena je digitalno očitano u mikrosekundama (μs).



Slika 17. Uređaj za ispitivanje ultrazvuka (proizvođač Controls)

Poznavajući duljinu puta uzorka (L) koji je ultrazvuk prešao kretajući se kroz promatrani uzorak, kao i izmjereno vrijeme trajanja ovog kretanja (t), može se izračunati brzina ultrazvuka:

$$v = \frac{L}{t} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right]$$

Brzina prolaza ultrazvuka ovisi o fizičko-mehaničkim svojstvima materijala, kao i o geometrijskim karakteristikama uzorka. Ukoliko se radi o tijelima s veoma izraženom

heterogenošću pri rasprostiranju ultrazvučnih valova dolazi do pojave odbijanja, prelamanja i difrakcije.

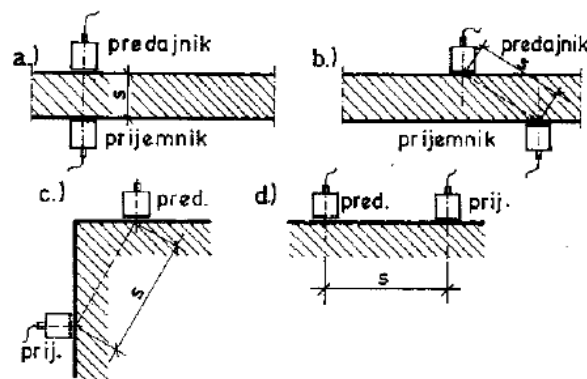
Kako je poznata brzina ultrazvuka v , korištenjem datih formula izračunava se dinamički modul elastičnosti E_D i zapreminska masa ρ .

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

$$\rho = \frac{m}{V} \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right]$$

Kako su formule u određenoj međuzavisnosti, sve je u funkcionalnoj vezi sa strukturnim karakteristikama, poroznošću, čvrstoćom i nizom drugih svojstava materijala.

Raspored postavljanja odašiljača i prijemnika na međusobnoj udaljenosti L , moguće je na različitim mjestima kako je prikazano na slici 18., pa se u vezi s tim može govoriti o direktnom (a), poludirektnom (b i c) i indirektnom (površinskom) (d) prijenosu ultrazvuka [3].



Slika 18. Položaji ispitivanja ultrazvuka

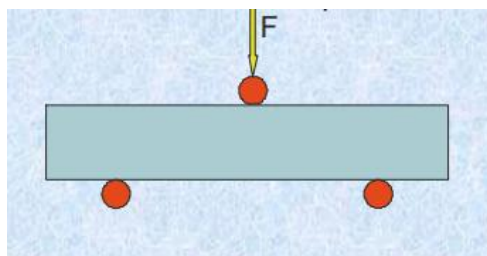
Direktni prijenos ultrazvuka osigurava najveću točnost dobivanjem valova koji poprimaju oblik pravca okomit na površinu prijemnika, kontakt između senzora i uzorka ostvaren je preko gela.

3.2.5. Ispitivanje savojne čvrstoće



Slika 19. Uređaj za ispitivanje savojne čvrstoće

Prizme koje su prethodno ispitane metodom ultrazvuka potrebno je ispitati i na savijanje. Čvrstoća na savijanje jedan je od glavnih pokazatelja dobro projektiranog morta, uzevši u obzir da je vlačna čvrstoća i kod morta i kod betona višestruko manja od tlačne. Metoda savijanja ustvari donju zonu izlaže vlačnom naprezanju i upravo je to kritično područje na kojemu se prvo događa pucanje [3].



Slika 20. Shema ispitivanja savojne čvrstoće

Prizma se postavlja po dužini u uređaj na kojemu je postavljen nastavak za ispitivanje savijanja. Prizma se oslanja na dva linijska oslonca s donje strane, a s gornje se, također pomoću oslonca koji se nalazi na sredini, prizma opterećuje silom. Kontakti na mjestima dva donja oslonca i na gornjem osloncu kojim se nanosi sila moraju biti linijskog karaktera. Sila se postupno povećava sve do trenutka sloma.

Ispitivanje se vrši prema normi HRN EN 12390-5 [11] koja određuje savojnu čvrstoću očvrsllog morta, a uzorci se izrađuju i njeguju u skladu s normom HRN EN 12390-2 [12].

3.2.6. Ispitivanje tlačne čvrstoće

Nakon ispitivanja na savijanje, svaka prizma je podijeljena na dva dijela. Te polovice se postavljaju u uređaj za ispitivanje na tlak. Radi se o istom uređaju kao i za savijanje, s tim da su im nastavci zamijenjeni. Za razliku od nastavka za savijanje gdje su oslonci linijski, ovdje se uzorak stavlja između dvije pločice i opterećuje tlačnom silom.

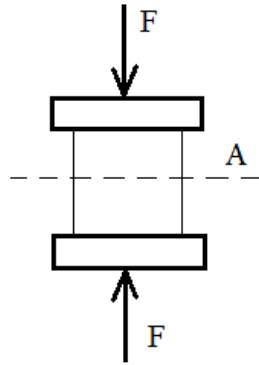
Polovice prizama su postavljene po dužini i počinje se nanositi tlačno opterećenje sve do trenutka sloma. Rezultat su čvrstoća i sila u trenutku sloma.

Ispitivanje se provodi u skladu s normom HRN EN 196-1 [13].



Slika 21. Uređaj za ispitivanje tlačne čvrstoće

Preciznost preše, ravnost pritisnih ploča i drugo propisuje se standardom. Ispitivanje se mora vršiti u području između 0.2 i 0.8 kapaciteta preše. Ispitno tijelo mora biti u vodom zasićenom stanju, a površine se obrišu. Najprije se izmjeri masa i sve dimenzije ispitnog tijela te izračuna volumna masa. Tlak se povećava brzinom od 1.5 MPa/s do loma uzorka i u tom trenutku se registrira sila F [2].



Slika 22. Shema ispitivanja tlačne čvrstoće

Rezultat ispitivanja je čvrstoća na pritisak svakog uzorka posebno i iznosi: $f_c = \frac{F}{A}$

F- sila u trenutku loma (kN)

A- površina poprečnog presjeka u sredini ispitnog tijela (mm²)

4. EKSPERIMENTALNI DIO

U eksperimentalnom dijelu rada nastoji se isprojektirati receptura koja će uz kratku odgodu vezanja postići dobru obradljivost i visoku čvrstoću.

Kada se odredi standardna konzistencija od kalcij aluminatnog cementa i vode, ispitivat će se kako različite količine litijevog karbonata utječu na pastu. Da bi ostvarili zadovoljavajuće nam rezultate potrebno je dobro izbalansirati količinu dodatka kako na pastu tako i kasnije na mortu.

Ovisno o dobivenim rezultatima dalje se ide u projektiranje morta sa standardnim pijeskom i prirodnim agregatom (klasični pijesak).

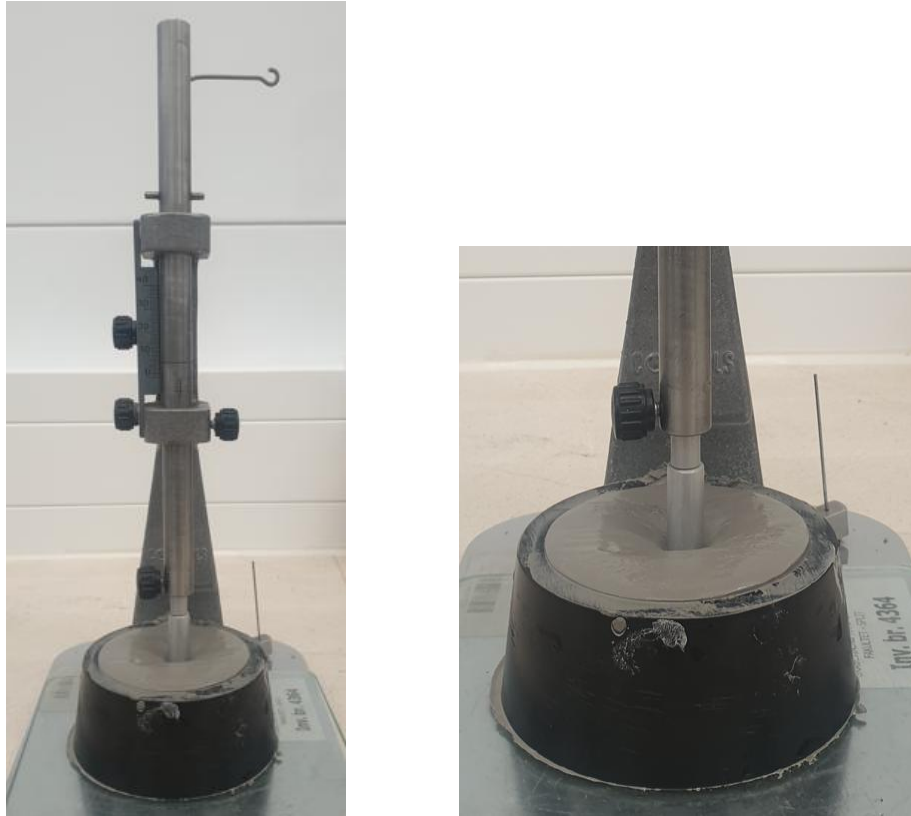
Recepture standardnog morta kao dodatak imaju samo litijev karbonat, čije će količine varirati ovisno o dobivenim svojstvima prethodno ispitane mješavine.

Na recepturama morta s prirodnim agregatom (klasični pijesak) istraživat će se kako odnosi litijevog karbonata, superplastifikatora i mineralnih dodataka utječu na tražena svojstva.

4.1. Određivanje standardne konzistencije kalcij aluminatnog cementa

Određivanje standardne konzistencije paste izrađene od kalcij aluminatnog cementa (podnaslov 3.1.1.) i demineralizirane vode se vrši pomoću Vicatovog postupka (podnaslov 3.2.1.) te uvelike ovisi o količini vode.

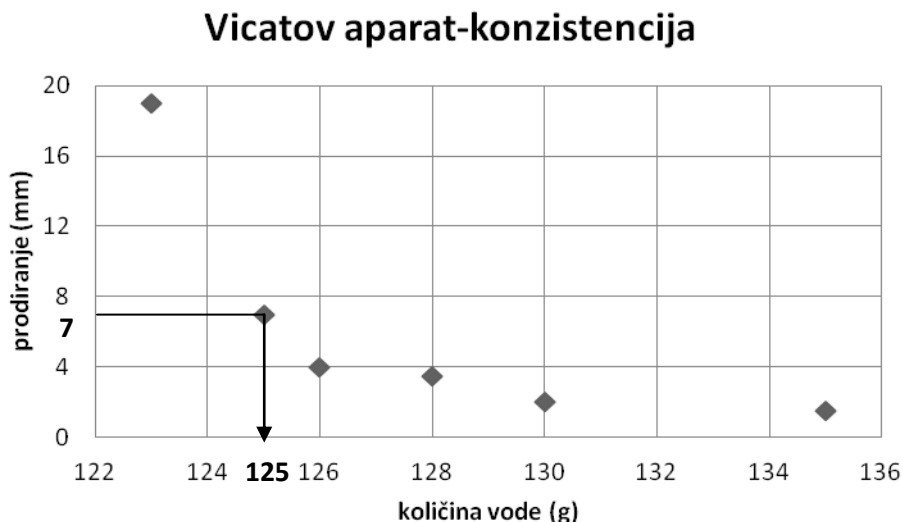
Cementna pasta standardne konzistencije je u stanju minimuma pora, što je posljedica maksimalnih sila privlačenja među česticama cementa i vode. U tom stanju vrlo male promjene u količini vode značajno mijenjaju konzistenciju cementne paste [14].



Slika 23. Vicatov valjak

Tablica 15. Prikaz rezultata određivanja cementne paste standardne konzistencije

broj mješavine	cement (g)	voda (g)	postotak vode (%)	vrijeme kontakta (h)	vrijeme ispitivanja (h)	rezultat (mm)
1	500	135	27	10:21	10:27	1.5
2	500	130	26	10:36	10:43	2
3	500	128	25.6	10:55	11:00	3.5
4	500	126	25.2	11:08	11:13	4
5	500	123	24.6	11:20	11:25	19
6	500	125	25	11:33	11:37	7



Slika 24. Prikaz rezultata određivanja konzistencije

Sve mješavine su dobivene istim postupkom u kontroliranim laboratorijskim uvjetima, miješanjem u miješalici 1.5 (min) na sporom programu potom 1.5 (min) na brzom programu miješanja.

Kako je vidljivo iz rezultata prikazanih u tablici 15. prvih pet mješavina je odbačeno zbog ili previše vode u pasti (mješavine 1, 2, 3 i 4) ili premalo vode u pasti (mješavina 5).

U ispitanim situacijama kada je postotak vode iznad 25 %, valjak prodire previše duboko u pastu te rezultati ne upadaju u raspon 5-7 (mm) kako je to određeno prema normi za Vicatov aparat. Suprotno tomu, za pastu (mješavina 5) gdje je postotak vode manji od 25 % valjak se zaustavlja već na 19 (mm) stoga je i ta mješavina odbačena.

Na temelju dobivenih rezultata može se uočiti već prije spomenut utjecaj količine vode u pasti, a kako posljednja receptura (mješavina 6) zadovoljava normu, uzeta je kao odgovarajuća (etalonska) mješavina.

4.2. Ispitivanje paste pod utjecajem različitih doza litijevog karbonata

Kako trenutno ne postoji velik broj radova o utjecaju litijevog karbonata na ubrzavanje vezanja kalcij aluminatnog cementa, nastoji se istržiti kako različite količine litijevog karbonata utječu na vrijeme vezanja.

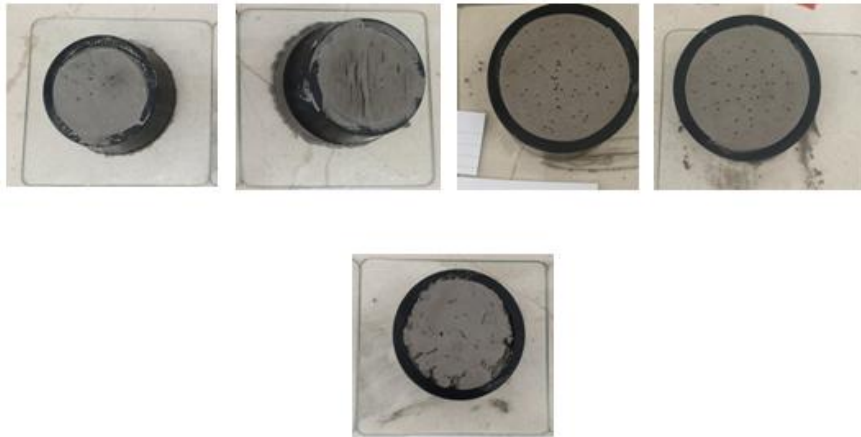


Slika 25. Kern ACJ-NM/ABS-N analitička vaga

Nakon određivanja cementne paste standardne konzistencije, istražen je utjecaj doze litijevog karbonata (podnaslov 3.1.5.) na vezanje. Točnost vaganja količine materijala, kao i pravilna priprema uzorka od velike je važnosti da bi se mogla jamčiti visoka točnost dobivenih rezultata. Ispitane su četiri mješavine s različitim dozama litijevog karbonata izmjerene na analitičkoj vagi prikazanoj na slici 25.

Tablica 16. Receptura

	ETALON	L1	L2	L3	L4
cement (g)	500	500	500	500	500
voda (g)	125	125	125	125	125
litijev karbonat (%)	/	0.005	0.0065	0.008	0.01
litijev karbonat (g)	/	0.0250	0.0325	0.0400	0.0500



Slika 26. Dobiveni uzorci paste (s lijeva na desno E, L1, L2, L3, L4) za određivanje vremena vezanja Vicatovim aparatom

Za početak ispitivanja odabrane su dvije granične količine litijevog karbonata, a ostale dvije su odabrane ovisno o dobivenim rezultatima vremena vezanja prethodno spomenutih. Rezultati ispitivanja prikazani su u tablici 17.



Slika 27. Ispitivanje vremena vezanja paste Vicatovom iglom

Tablica 17. Prikaz dobivenih rezultata vremena vezanja

	ETALON	L1	L2	L3	L4
litijev karbonat (%)	/	0.005	0.0065	0.008	0.01
početak vezanja (min)	270	90	44	29	20
kraj vezanja (min)	290	120	91	64	45

Ispitivanje se vrši u propisanim laboratorijskim uvjetima s iglom promjera 1 (mm) na Vicatovom aparatu.

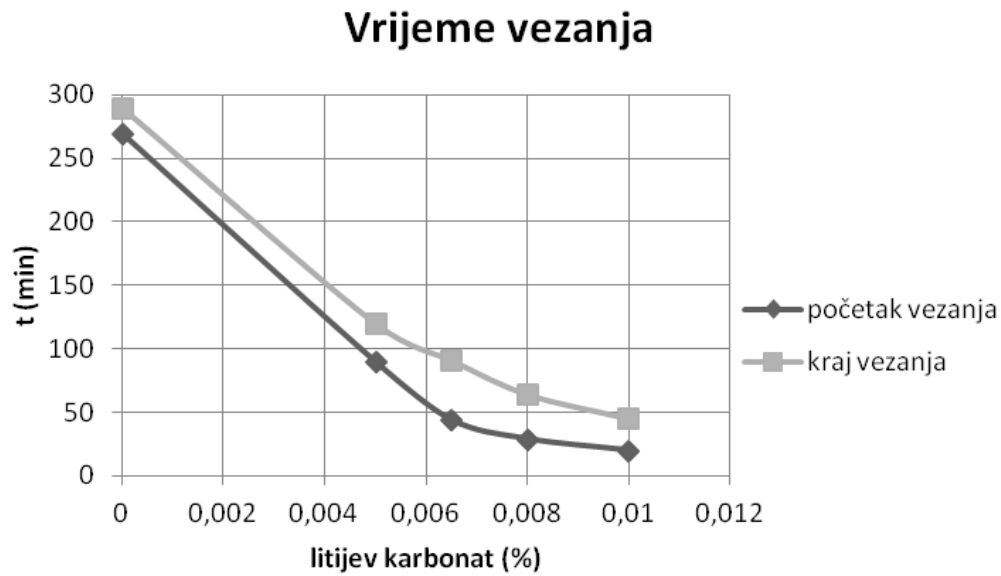
Prilikom ispitivanja etalonske mješavine (mješavina bez litijevog karbonata) dobiveno vrijeme početka vezanja je 270 (min) od kontakta cementa s vodom, što je dosta dugo. Spomenuto vrijeme početka vezanja je potrebno skratiti, a kako na to reagira mješavina s dodatkom litijevog karbonata određene su početne količine od 0.005 % (L1) i 0.01% (L4) s kojima je nastavljeno ispitivanje.

Projektirana receptura L1 smanjila je vrijeme početka vezanja za 180 (min) u odnosu na etalonsku mješavinu. Iz priloženoga vidimo da litijev karbonat utječe na odgodu vezanja paste, ali da 0.005 % litijevog karbonata ima odgodu vezanja tek za 90 (min).

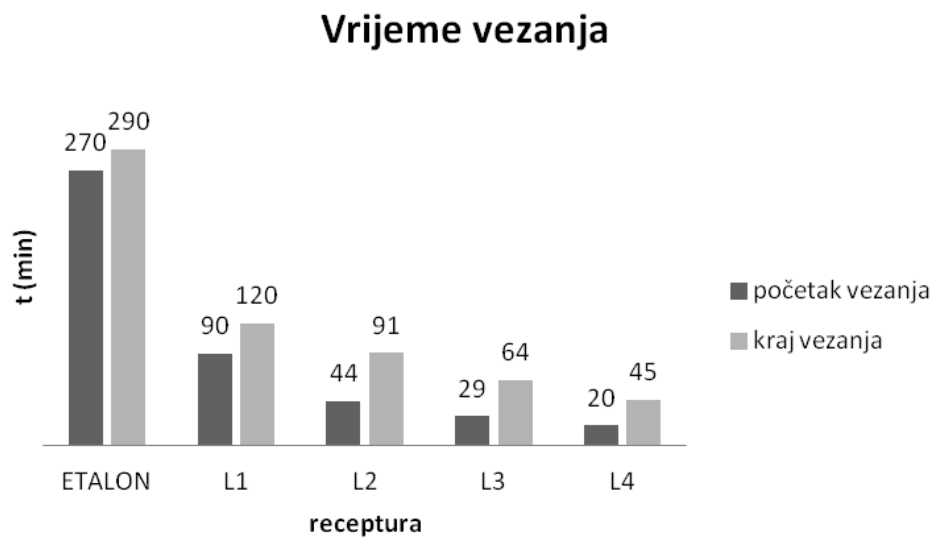
Za razliku od mješavine L1, mješavina L4 ima odgodu vezanja na samo 20 (min). Zaključujemo da ukoliko idemo s još većim količinama litijevog karbonata od 0.01 % došlo bi do još bržeg vezanja paste, što povlači slabiju obradljivost, ujedno i teže miješanje i ugradnju u kalupe. Sukladno tomu, određene su recepture L2 i L3.

Vrijeme odgode vezanja mješavine L2 je 44 (min), a mješavine L3 je 29 (min). Iz dobivenih rezultata je zaključeno da količina od 0.008 % litijevog karbonata na 500 (g) cementa daje najbliže vrijeme traženom vremenu vezanja. Kraj vezanja mješavine L3 je 64 (min) nakon kontakta cementa i vode. Osim postignute tražene odgode vezanja, postignuta je i slabija obradljivost paste.

Grafički prikaz rezultata vremena vezanja ovisno o količini litijevog karbonata je prikazan na slikama 28. i 29.



Slika 28. Dijagram vremena vezanja ovisno o količini litijevog karbonata



Slika 29. Grafički prikaz vremena vezanja za pojedinu recepturu

4.3. Standardni mort s dodatkom litijevog karbonata

Mort je vezni materijal koji se dobiva miješanjem osnovnog veziva (u ovom slučaju kalcij aluminatnog cementa), vode i agregata/pijeska.

Receptura izrađenih uzoraka u svrhu ovog ispitivanja prikazana je u tablici 18., a za ispitivanje je korišten kalcij aluminatni cement, standardni pijesak (podnaslov 3.1.3.), demineralizirana voda te promjenjive količine litijevog karbonata. Receptura je određena kako nalaže norma EN 14647:2005 [5].

Nakon pripreme i vaganja materijala, litijev karbonat se otapa u količini od 200 (g) vode. Prethodno spomenuta otopina, zajedno sa cementom kreće na automatsko miješanje u miješalici koja ima opciju da sama nakon nekog vremenskog perioda doda standardni pijesak. Dobiveni mort se ispita na obradljivost, a potom se postavlja na vibracijski stol u 3 kalupa oblika prizme dimenzija 40x40x160 (mm). Nakon čuvanja uzoraka 24 sata u propisanim uvjetima vrši se ispitivanje prizmi u očvrslom stanju. Ispitivanje ultrazvuka te čvrstoće na savijanje i tlak se odvija na sva tri prizme te se kao mjerodavan rezultat uzima srednja vrijednost od dobivenih rezultata.

Tablica 18. Receptura

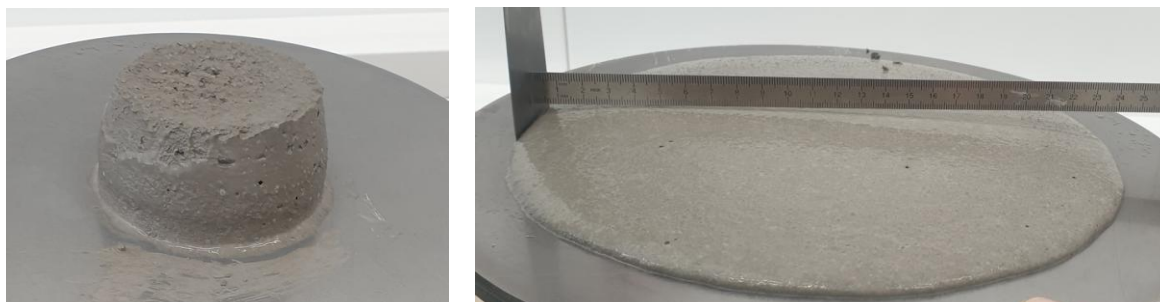
	ETALON	L1	L2	L3	L4
cement (g)	500	500	500	500	500
voda (g)	200	200	200	200	200
standardni pijesak (g)	1350	1350	1350	1350	1350
litijev karbonat (%)	/	0.005	0.0065	0.008	0.01
litijev karbonat (g)	/	0.0250	0.0325	0.0400	0.0500

U sljedećim tablicama prikazani su rezultati ispitivanja za etalonsku mješavinu i četiri recepture s litijevim karbonatom.

Tablica 19. Rezultati ispitivanja obradljivosti

	ETALON	L1	L2	L3	L4
D1 (mm)	240	190	160	140	125
D2 (mm)	235	190	160	140	125
D _{sr} (mm)	237.5	190	160	140	125

U tablici 19. prikazani su rezultati obradljivosti morta. Vidljivo je smanjivanje obradljivosti kako se povećava doza litijevog karbonata. Tako najbolju obradivost ima etalonska mješavina (slika 30.) koja ne sadrži litijev karbonat, a najmanju mješavina koja sadrži 0.01 % litijevog karbonata (L4). Mort treba imati određeni stupanj obradljivosti da ga je što lakše ugraditi. Zaključak je da što je veća doza litijevog karbonata to se više ukrućuje mješavina te automatski imamo teže obradljiv mort. Na sljedećim slikama prikazano je stanje koje potkrepljuje navedene rezultate.



Slika 30. Obradljivost uzorka ETALON



Slika 31. Obradljivost uzorka L1



Slika 32. Obradljivost uzorka L2



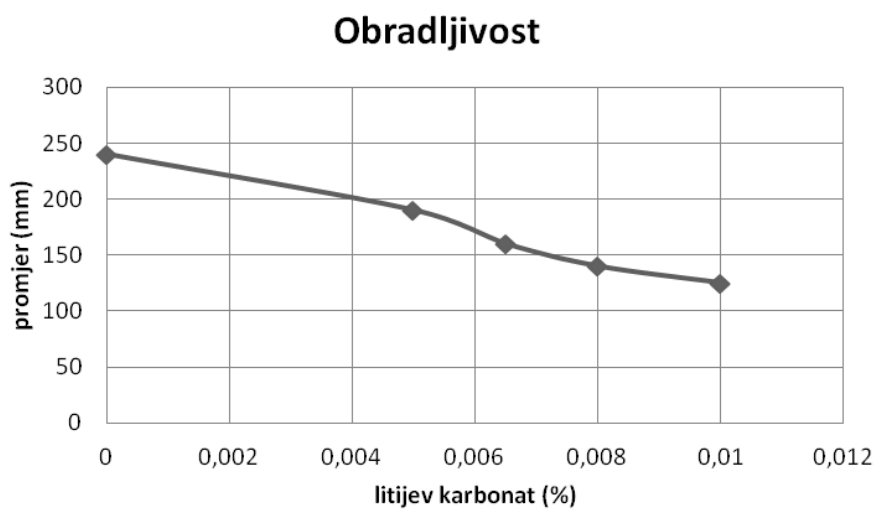
Slika 33. Obradljivost uzorka L3



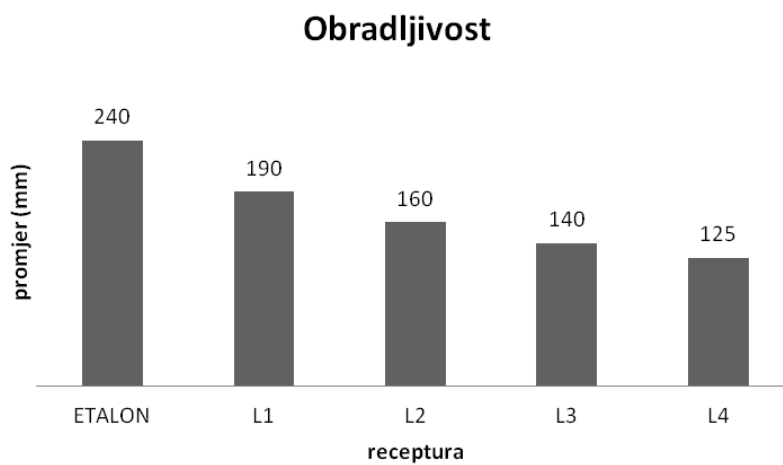
Slika 34. Obradljivost uzorka L4



Slika 35. Ugrađeni mort



Slika 36. Ovisnost obradljivosti o litijevom karbonatu



Slika 37. Grafički prikaz obradljivosti za pojedinu recepturu

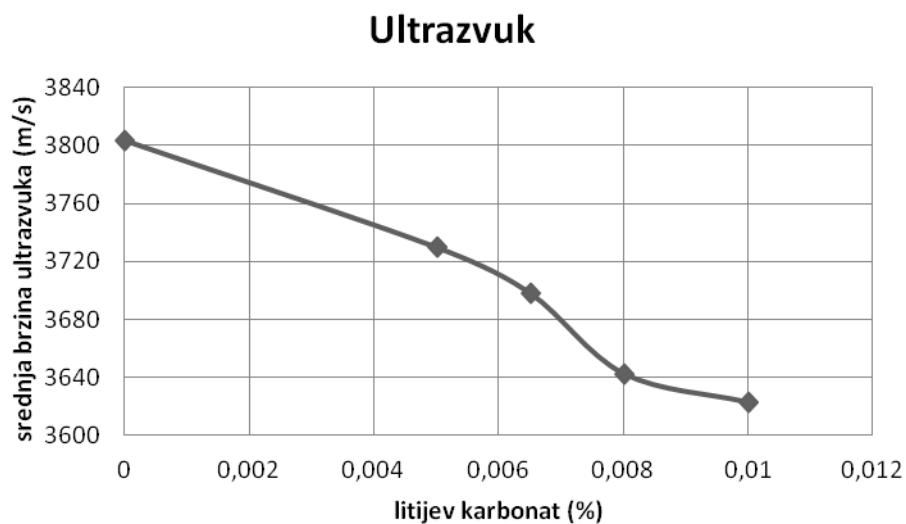
Tablica 20. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja

	ETANOL	L1	L2	L3	L4
v_{sr} (m/s)	3 803.72	3 729.86	3 698.12	3 642.59	3 622.77
$E_{d,sr}$ (MPa)	32 657.9	30 502.67	29 736.41	29 048.83	28 679.55
$f_{sav,sr}$ (MPa)	8.18	8.16	8.23	8.11	7.31
$f_{tlak,sr}$ (MPa)	75.87	65.39	63.38	58.22	55.85



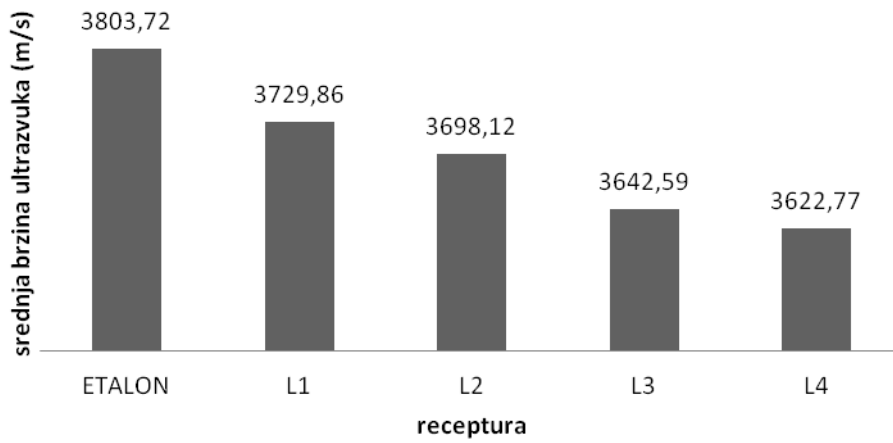
Slika 38. Ispitivanje ultrazvuka

Vidljivo je da je kod uzorka L4 koji ima najveću dozu od 0.01 % litijevog karbonata brzina ultrazvuka najmanja. Mort je bolji što je veća brzina ultrazvuka, tako da u vidu brzine ultrazvuka povećanjem doze litijevog karbonata pada i kvaliteta morta.



Slika 39. Ovisnost brzine ultrazvuka o litijevom karbonatu

Ultrazvuk



Slika 40. Grafički prikaz brzine ultrazvuka za pojedinu recepturu



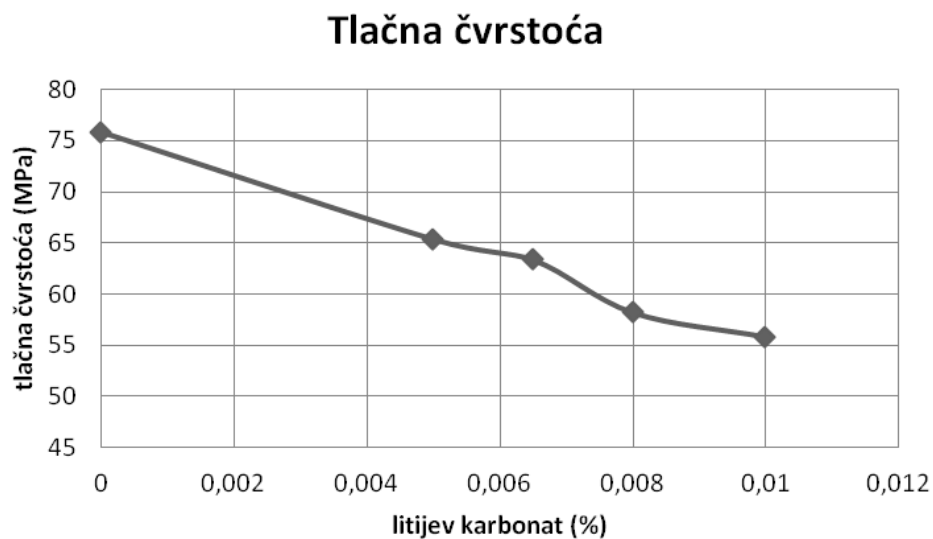
Slika 41. Uzorci nakon ispitivanja čvrstoće

Utjecaj litijevog karbonata bitno utječe na tlačnu čvrstoću, iz dobivenih rezultata na uzorcima ispitanih 24 sata nakon izrade vidljivo je kako povećanjem doze litijevog karbonata imamo pad tlačne čvrstoće po linearnoj zakonitosti. Startna vrijednost tlačne čvrstoće na etalonskom uzorku je 75.87 (MPa), a s dozom od 0.01 % (L4) vrijednost čvrstoće je pala za otprilike 20 (MPa).

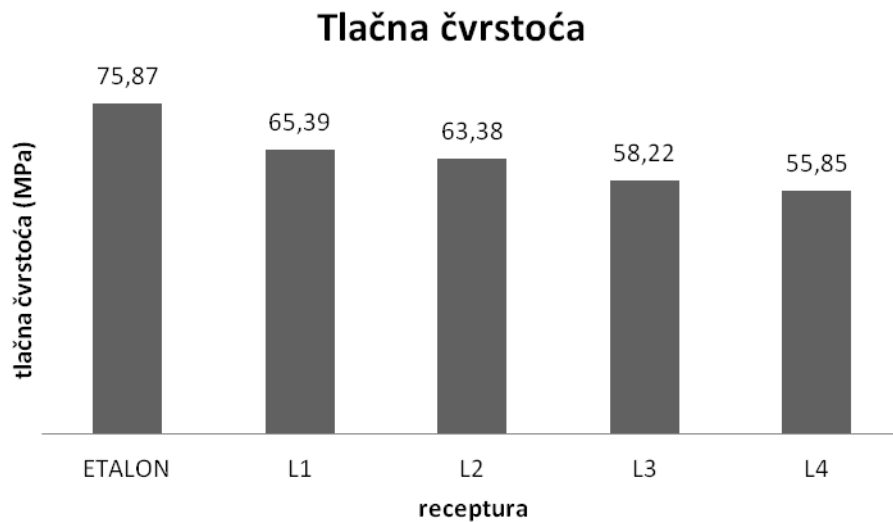
Relativno gledajući uzorak L4 sadrži 73.61 % čvrstoće u odnosu na uzorak L1. Znači da se dogodio pad čvrstoće od 26.39 % kada idemo na maksimalnu dozu (L4).

Uzorci L3 i L4 su pokazali manju tlačnu čvrstoću od propisane u tehničkom listu kalcij aluminatnog cementa, a to je da tlačna čvrstoća mora biti veća od 60 MPa na uzorcima starima 24 sata.

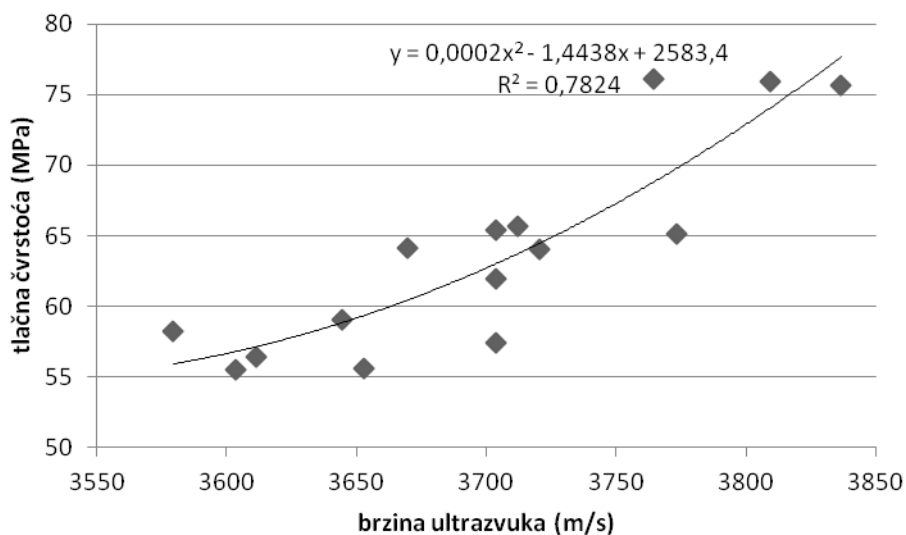
Analizirajući uzorke L1 i L2 vidimo da su ostvarene tlačne čvrstoće relativno blizu. Uzorak L2 sadrži 96.93 % čvrstoće u odnosu na uzorak L1. Znači da se čvrstoća smanjila za 2.01% kada idemo na dozu od 0.0065 % litijevog karbonata (L2).



Slika 42. Ovisnost tlačne čvrstoće o litijevom karbonatu



Slika 43. Grafički prikaz tlačne čvrstoće za pojedinu recepturu



Slika 44. Ovisnost tlačne čvrstoće i brzine ultrazvuka

Na slici 44. prikazano je u kakvoj su ovisnosti tlačna čvrstoća i brzina ultrazvuka za sve mješavine. Ovisnost se aproksimirala funkcijom polinoma četvrtog stupnja pri čemu korelacija iznosi 0.7824.

U prilogu su prikazani cjeloviti radni formulari za svaki uzorak posebno iz kojih su dobivene prikazane srednje vrijednosti u tablici 20.

4.4. Ispitivanje morta pod utjecajem superplastifikatora i mineralnih dodataka

U prethodnom podnaslovu analizirani su uzorci standardnog morta s različitim dozama litijevog karbonata. U narednoj fazi projektiranja morta koristi se klasični pijesak frakcije 0-2 (mm) (podnaslov 3.1.4.), superplastifikator (podnaslov 3.1.6.) te mineralni dodaci (silikatna prašina, metakaolin i leteći pepeo; podnaslov 3.1.7.).

Superplastifikatorom se poboljšava obradljivost. Ukoliko je vidljiv značajan pad obradljivosti, obradljivost treba kompenzirati sa superplastifikatorom. Kako se superplastifikatorom može poremetiti željeno vrijeme vezanja, radi se više varijacija uzoraka da se ispita kako se različite količine superplastifikatora i mineralnih dodataka manifestiraju na njih i na ove karakteristike.

Tablica 21. Receptura

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
cement (g)	600	600	600	540	540	540
voda (g)	300	300	300	330	330	330
pijesak 0-2 mm (g)	1800	1800	1800	1800	1800	1800
litijev karbonat (g)	0.0600	0.1200	0.0600	0.0540	0.0540	0.0540
litijev karbonat (%)	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
superplastifikator (g)	3.0	3.0	4.8	3.0	3.0	3.0
superplastifikator (%)	0.5	0.5	0.8	0.5	0.5	0.5
mineralni dodatak (g)	/	/	/	60 (S.P.)	60 (M.)	60 (L.P.)
mineralni dodatak (%)	/	/	/	10	10	10

Mješavina T1 uzeta je kao referentna mješavina, sve ostale recepture isprojektirane na temelju dobivenih rezultata svake prethodne. Vodocementni faktor za sve mješavine je 0.5, a količina agregata je 3 puta masa cementa.

Receptura T2 je ispitana na duplu količinu litijevog karbonata u odnosu na T1, dok je recepturi T3 povećana količina superplastifikatora u odnosu na T1.

Recepture T4, T5 i T6 ispitane su s mineralnim dodacima. Količina mineralnih dodataka je 10% količine cementa.

U sljedećim tablicama prikazani su rezultati ispitivanja.

Tablica 22. Prikaz dobivenih rezultata vremena vezanja

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
početak vezanja (min)	27	3	49	64	65	54
kraj vezanja (min)	43	23	59	88	73	76

Ispitivanje vremena vezanja se vrši u propisanim laboratorijskim uvjetima s iglom od nehrđajućeg čelika promjera 2 (mm) na modificiranom Vicatovom aparatu.

Tablica 23. Rezultati ispitivanja obradljivost

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
D1 (mm)	175	110	> 300	255	270	> 300
D2 (mm)	175	110	> 300	250	270	> 300
D _{sr} (mm)	175	110	> 300	252.5	270	> 300

Na mješavinama T1, T2 i T3 ispitano je kako promjene količine litijevog karbonata i superplastifikatora utječu na svojstva. Ovisno o dobivenim rezultatima vremena vezanja i obradljivosti (na mješavini T1) svaka sljedeća mješavina ima korigirane vrijednosti u svrhu dobivanja što boljih i zadovoljavajućih rezultata.

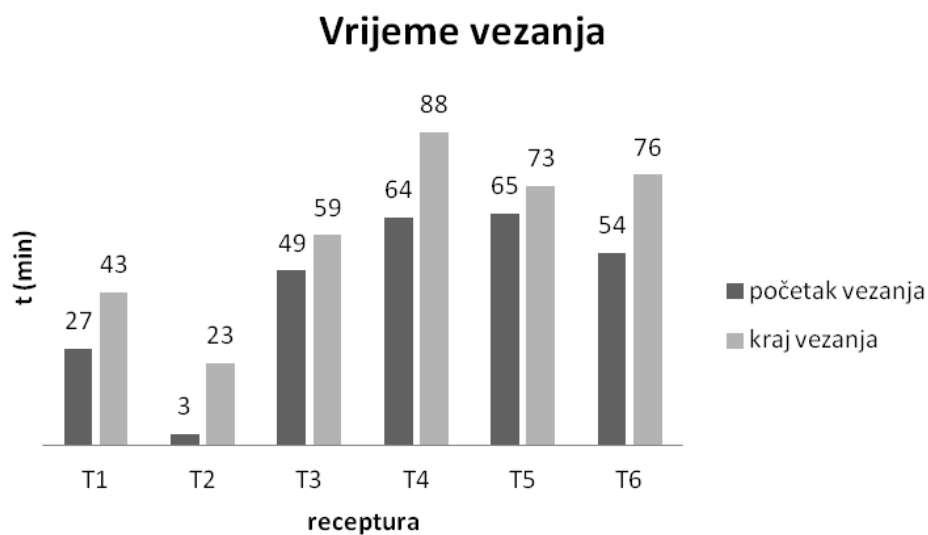
Prilikom ispitivanja mješavine T1 vrijeme odgode vezanja je 27 (min) od kontakta cementa s vodom, gdje je doza litijevog karbonata 0.01 % i superplastifikatora 0.5 %.

Kako znamo da litijev karbonat ubrzava vezanje, a superplastifikator ima odgodu vezanja napravljena je usporedba uzorka T1 s povećanom dozom litijevog karbonata na 0.02 % (dupla količina). Uzorak T2 ima odgodu vezanja na samo 3 (min), a kraj vezanja već za 23 (min). Razastiranje ovog uzorka je tek 110 (mm), mješavinu je teško ugraditi zbog brzog ukrućivanja te automatski imamo teže obradljiv mort.

Kako su spomenuti rezultati uzorka T2 loši u vidu obradljivosti i brzine vezanja odbacuje se daljnje moguće povećavanje doze litijevog karbonata te je projektiran uzorak T3 kojem je povećana doza superplastifikatora na 0.8 %, a količina litijevog karbonata je vraćena na 0.01% . Dobiveni mort je vrlo rijedak, na stoliću za potresanje se prelio što nam ukazuje na to da mu je obradljivost veća od 300 (mm). U kalupe nije odmah ugrađen već je sačekano par minuta. Vrijeme odgode vezanja je 49 (min) kako je i očekivano s obzirom na to da se koristila veća doza superplastifikatora pa je ujedno i odgoda vezanja veća. Ova receptura se može koristiti u svrhe samozbijajućeg morta.

Na mješavinama T4, T5 i T6 je ispitano kako različiti mineralni dodaci utječu na svojstva morta. Za sve slučajeve projektirana je receptura od 0.01 % litijevog karbonata, 0.5 % superplastifikatora i 10 % mineralnog dodatka.

Rezultati odgode vezanja na mješavinama T4 i T5 su slični za razliku od rezultata na mješavini T6 koji sadrži leteći pepeo. Vrijeme odgode vezanja mješavine T6 je 54 (min) što je manje za oko 10 (min) od mješavina T4 i T5. Najbolju obradivost ima mješavina T4 koja sadrži silikatnu prašinu, a mješavina T6 ima rijetku konzistenciju kao i prethodno spomenuta mješavina T3.



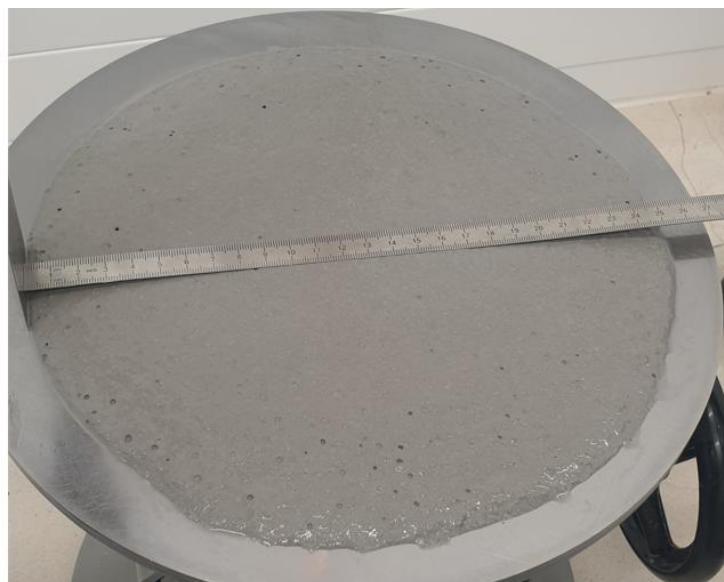
Slika 45. Grafički prikaz početka i kraja vezanja uzoraka za pojedinu recepturu



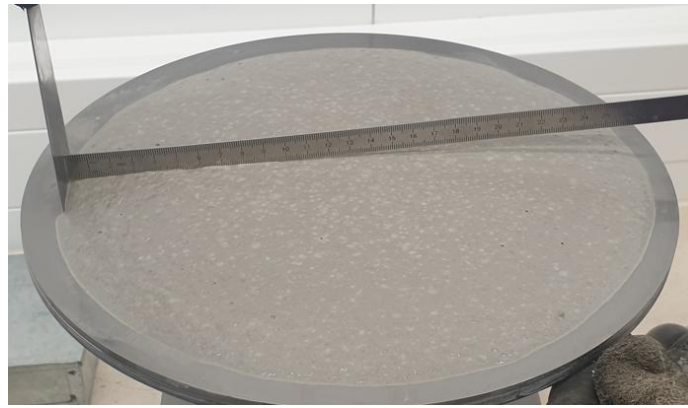
Slika 46. Obradljivost uzorka T1



Slika 47. Obradljivost uzorka T2



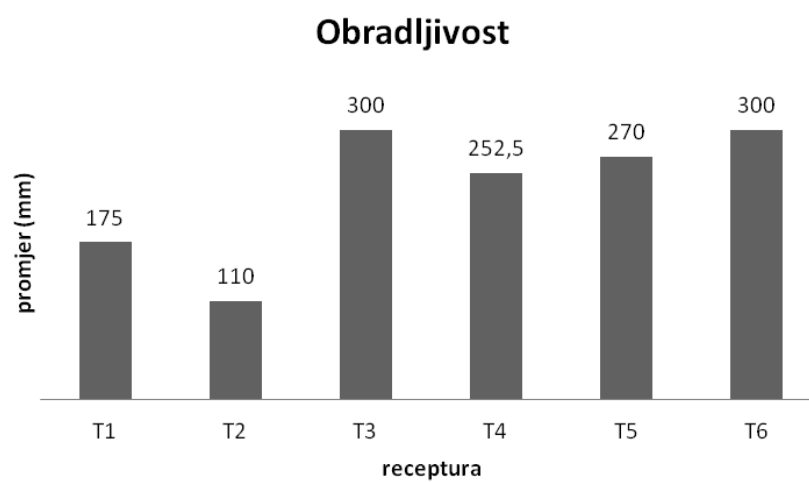
Slika 48. Obradljivost uzorka T4



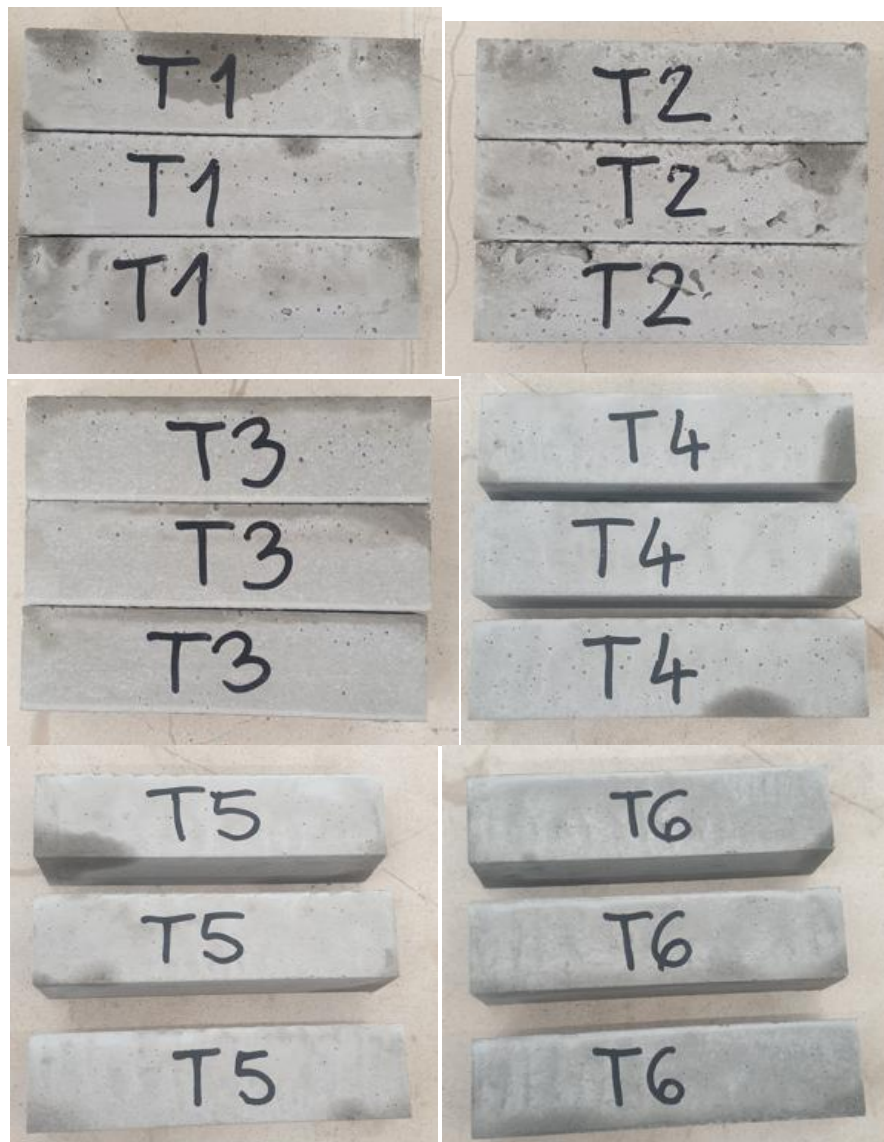
Slika 49. Obradljivost uzorka T5



Slika 50. Obradljivost uzorka T6



Slika 51. Grafički prikaz ispitivanja obradljivosti za pojedinu recepturu



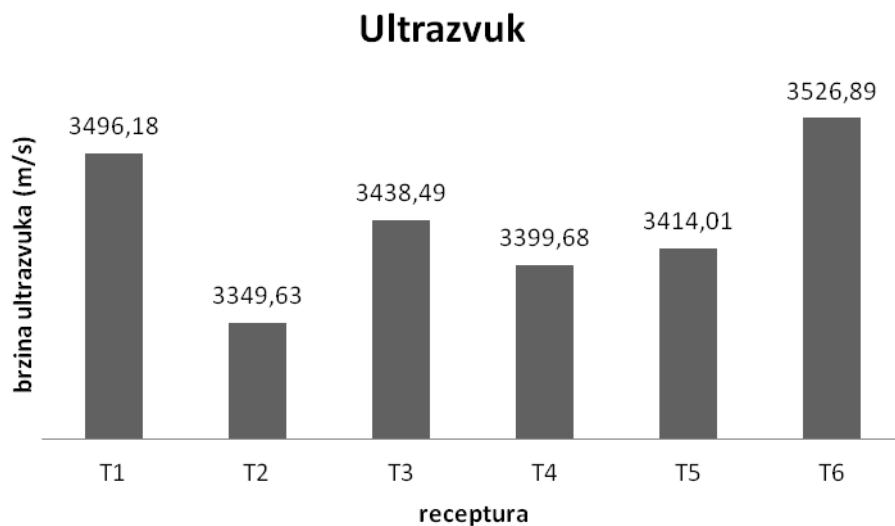
Slika 52. Uzorci spremni za ispitivanje

Tablica 24. Srednje vrijednosti rezultata ispitivanja

	T1	T2	T3	T4	T5	T6
v_{sr} (m/s)	3 496.18	3 349.63	3 438.49	3 399.68	3 414.01	3 526.89
$E_{d,sr}$ (MPa)	26 049.36	23 929.35	25 797.08	24 476.73	25 066.5	26 845.88
$f_{sav,sr}$ (MPa)	7.04	6.73	7.3	6.57	7.37	6.95
$f_{tlak,sr}$ (MPa)	57.27	49.03	62.67	47.21	54.44	53.39

Usporedbom rezultata ultrazvuka na uzorcima T1, T2 i T3 vidimo da uzorak T1 ima najveću brzinu ultrazvuka (3496.18 m/s). Očito je da se povećavanjem doze litijevog karbonata i superplastifikatora smanjuje brzina ultrazvuka.

Uzorak T6 koji kao mineralni dodatak sadrži leteći pepeo ima najveću brzinu ultrazvuka od 3526.89 (m/s) što znači da je u vidu ultrazvuka najbolji mort.



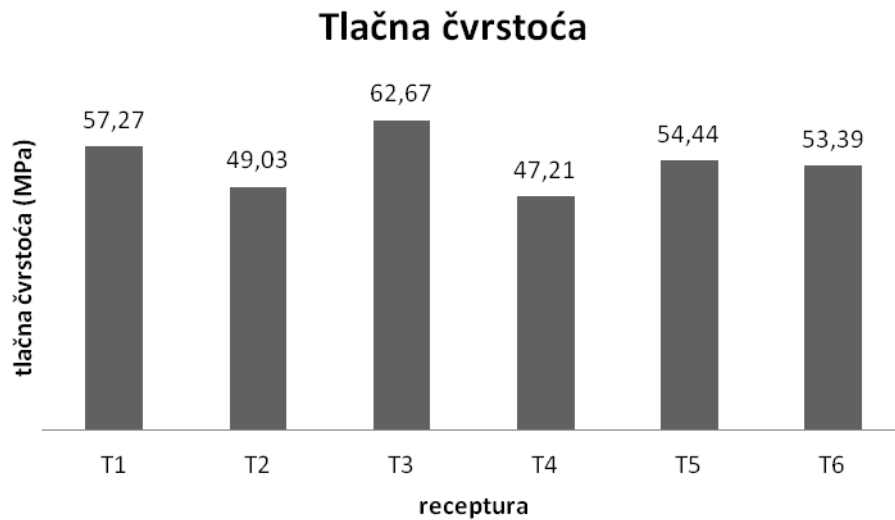
Slika 53. Grafički prikaz ispitivanja brzine ultrazvuka za pojedinu recepturu

Relativno gledajući uzorak T2 sadrži 85.61 % čvrstoće u odnosu na uzorak T1. Znači da se dogodio pad čvrstoće od 14.39 % povećanjem doze litijevog karbonata za duplo. Ovaj uzorak je imao odgodu vezanja od 3 (min) te slabu obradljivost, a i tlačna čvrstoća mu je podbacila.

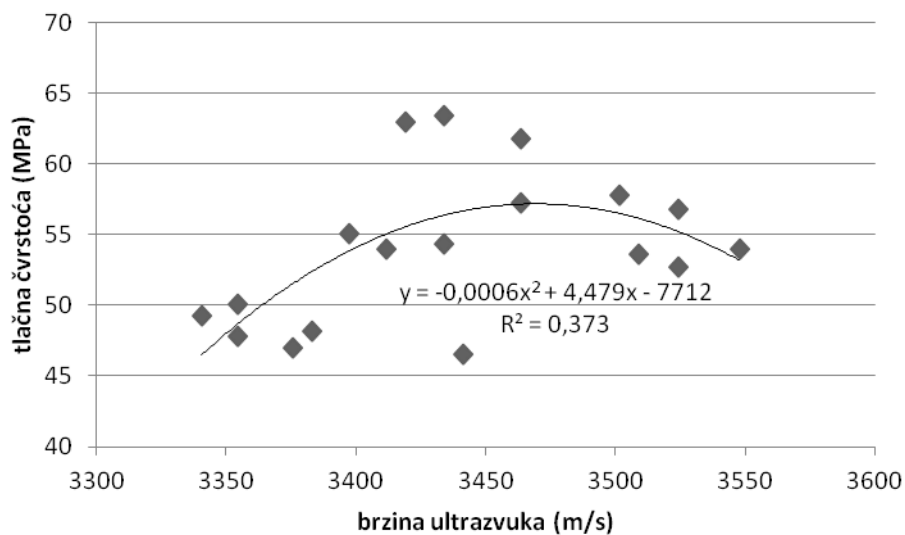
Najveću čvrstoću od 62.67 (MPa) nakon 24 sata dosegao je uzorak T3 kojem je povećana doza superplastifikatora na 0.8 %.

Razmatrajući rezultate na uzorcima s mineralnim dodacima, najveću čvrstoću (54.44 %) ima uzorak T5 od metakaolina. Iako su mješavine T4 i T5 na ispitivanjima obradljivosti i vremenu vezanja imale približne rezultate, u ispitivanjima čvrstoće uzorak T4 (od silikatne prašine) ima pad čvrstoće za 15.31 % u odnosu na uzorak T5.

Vrijednost čvrstoće uzorka T6 je 53.39 % što je blizu čvrstoći uzorka T5.



Slika 54. Grafički prikaz ispitivanja tlačne čvrstoće za pojedinu recepturu



Slika 55. Ovisnost tlačne čvrstoće i brzine ultrazvuka

Na slici 55. prikazano je u kakvoj su ovisnosti tlačna čvrstoća i brzina ultrazvuka za sve mješavine. Ovisnost se aproksimirala funkcijom polinoma četvrtog stupnja pri čemu korelacija iznosi samo 0.373.

U prilogu su prikazani cjeloviti radni formulari za svaki uzorak posebno iz kojih su dobivene prikazane srednje vrijednosti u tablici 24.

5. ZAKLJUČAK

Ispitana fizička i mehanička svojstva materijala jako variraju promjenom samo jednog parametra. Da bi ostvarili željene rezultate potrebno je dobro izbalansirati količine korištenog materijala.

Na rezultatima ispitivanja standardnog morta vidljivo je kako povećanjem doze litijevog karbonata dolazi do ubrzavanja vezanja ali uz pad obradljivosti, brzine ultrazvuka i tlačne čvrstoće.

To se vidi na usporedbi uzoraka ETALON i L4. Kraj vezanja uzorka L4 koji sadrži maksimalnu dozu (0.01 %) litijevog karbonata se odvio već 45 (min) od kontakta cementa s vodom. Obradljivost je jako loša (suha smjesa teška za ugradbu), a na ispitivanju čvrstoće uzorak ima najmanju čvrstoću od svih ispitanih uzoraka za razliku od uzorka ETALON koji ne sadrži litijev karbonat, a ima najbolju obradivost i najveću čvrstoću ali početak vezanja tek nakon 4 i pol sata.

Dodavanjem superplastifikatora poboljšava se obradljivost, ali superplastifikator usporava vezanje. Kako na mort utječu različiti omjeri litijevog karbonata i superplastifikatora neke od kombinacija s mineralnim dodacima vidimo na uzorcima izrađenima od standardnog pijeska.

Najveću čvrstoću od 62.67 (MPa) nakon 24 sata dosegao je uzorak T3 koji ujedno sadrži i najveću dozu superplastifikatora (0.8 %). Osim što je postigao najveću čvrstoću, pokazao se dobar i u vidu traženog vremena vezanja te obradljivosti.

Relativno gledajući uzorak T1 sadrži 91.38 % čvrstoće u odnosu na uzorak T3. Znači da se dogodio porast čvrstoće od 8.62 % povećavanjem doze superplastifikatora.

6. LITERATURA

- [1] Ukrainczyk, V. (1994.): Beton, Zagreb
- [2] Krstulović, P. (2000.): Svojstva i tehnologija betona, Split
- [3] Muravljov, M. (1995.): Građevinski materijali, Građevinski fakultet Beograd, Beograd, Srbija
- [4] Neville, A. M. (1981.): Properties of concrete, Pitman publishing, Marshfield, Mass. USA
- [5] Kalcijev aluminatni cement -- Sastav, specifikacije i kriteriji sukladnosti (EN 14647:2005/AC:2006)
- [6] Standard sand CEN EN 196-1
- [7] Metode ispitivanja cementa -- 3. dio: Određivanje vremena vezivanja i postojanosti volumena (EN 196-3:2016)
- [8] Modified Vicat apparatus (AASHTO T 185, ASTM C 359)
- [9] Metode ispitivanja mortova za ziđe -- 3. dio: Određivanje konzistencije svježeg morta (stolićem za potresanje) (EN 1015-3:1999/A1:2004)
- [10] Ispitivanje betona -- 4. dio: Određivanje brzine ultrazvučnog impulsa (EN 12504-4:2004)
- [11] Ispitivanje očvrnuloga betona -- 5. dio: Čvrstoća ispitnih uzoraka na savijanje (EN 12390-5:2019)
- [12] Ispitivanje očvrnuloga betona -- 2. dio: Izrada i njega ispitnih uzoraka za ispitivanja čvrstoće (EN 12390-2:2019)
- [13] Metode ispitivanja cementa -- 1. dio: Određivanje čvrstoće (EN 196-1:2005)
- [14] Scrivener, K. L., Cabiron, J. L., Letourneux, R. (1999.): High-performance concretes from calcium aluminate cements, Laboratoire Central de Recherche, France
- [15] Ukrainczyk, N. (2015.): Effect of polycarboxylate superplasticiser on properties of calcium aluminate cement mortar, Faculty of Chemical Engineering and Technology, University of Zagreb, Croatia

- [16] Ukrainczyk^a, N., Dabić^b, P., Matusinović^a, T. (2010.): Model procesa hidratacije aluminatnog cementa, Fakultet kemijskog inženjerstva i tehnologije, ^aSveučilište u Zagrebu, Kemijsko-tehnološki fakultet, ^bSveučilište u Splitu, Hrvatska
- [17] Ukrainczyk, N., Matusinović, T. (2010.): Thermal properties of hydrating calcium aluminate cement pastes, Faculty of Chemical Engineering and Technology, University of Zagreb, Croatia
- [18] Coppola^{1,2}, L., Coffetti^{1,2}, D., Crotti^{1,2}, E., Dell'Aversano³, R., Gazzaniga¹, G., Pastore^{1,2} T. (2019.): Influence of Lithium Carbonate and Sodium Carbonate on Physical and Elastic Properties and on Carbonation Resistance of Calcium Sulphoaluminate-Based Mortars, ¹ Department of Engineering and Applied Sciences, University of Bergamo, Italy; ² UdR "Materials and Corrosion", Italy; ³ Department of Engineering, University of Campania "Luigi Vanvitelli"
- [19] Niziurska^a, M., Małolepszy^b, J., Malata^b, G. (2015.): The influence of lithium carbonate on phase composition of calcium aluminate cement paste, ^a Institute of Ceramics and Buildings Materials, Kraków; ^b AGH University of Science and Technology, Kraków
- [20] Goetz-Neunhoeffler, F.: Hydration Kinetic of Calcium Aluminate Cement with Calcium Sulfate Hemihydrate in Presence of Li and Tartaric Acid, Department of Mineralogy, University of Erlangen-Nuremberg, Germany
- [21] Han^{1,2}, W., Sun^{1,3}, T., Li¹, X., Shui³, Z., Chen⁴, J., Sun⁴, M. (2018.): Influence of Lithium Carbonate on C3A Hydration, ¹Key Laboratory of Roadway Bridge and Structure Engineering, ²School of Civil Engineering and Architecture, ³State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, ⁴School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan, China
- [22] Radelja, I. (2015.): Utjecaj različitih razredba drobljenog agregata na svojstva poroznog betona, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split
- [23] Lovrić, M. (2016.): Utjecaj punila od betonskog otpada na svojstva samozbijajućeg betona, Fakultet građevinarstva, arhitekture i geodezije, Split
- [24] Bjelić, N. (2009.): Praćenje transformacije cementnih kompozita iz pseudo-viskozno u kruto stanje elastičnim valovima, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb
- [25] Špišić, A. (2012.): Mort u građevinarstvu, Institut IGH d.d., Zagreb

[26] Bjegović, D., Stirmer, N. (2015.): Teorija i tehnologija betona, Građevinski fakultet, Sveučilište u Zagrebu, Zagreb

[27] Myrdal, R.(2007.): Accelerating admixtures for concrete, Trondheim, Norway: SINTEF-Building and Infrastructure

[28] Ukrainczyk, N., Vrbos, N. (2011.): Influence of metal chloride salts on calcium aluminate cement hydration, Faculty of Chemical Engineering and Technology, University of Zagreb, Croatia

[29] Dostupno na: <https://crocee.grad.hr/event/1/attachments/14/27/Samoborka.pdf>
(Pristupljeno 4.9.2021.)

7. PRILOZI



Oznaka recepture: ETALON

Datum izrade: 7.4.2021.

Datum ispitivanja: 8.4.2021.

Ispitivanje gustoće i brzine ultrazvuka

uzorak	Masa (g)	b (mm)	h (mm)	L (mm)	ρ (kg/dm ³)	t_{uzv} (μ s)	v (m/s)	Ed (MPa)
prizma 1	604,8	40	40	160	2362,50	42,0	3809,52	32470,5
prizma 2	611,4	40	40	160	2388,28	42,5	3764,71	32057,2
prizma 3	614,1	40	40	160	2398,83	41,7	3836,93	33446,0

srednja brzina ultrazvuka $v_{sr} = 3803,72$ (m/s)

srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{d,sr} = 32657,9$ MPa

Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće

Ispitivanje na savijanje				Ispitivanje na pritisak			
uzorak	Sila (kN) savijanje	Savojna čvrstoća f_{sav} (MPa)	Sred.vrij. f_{sav}	uzorak	Sila (kN) tlak	Tlačna čvrstoća f_{tlak} (MPa)	Sred.vrij. f_{tlak}
1		7,70	8,18	1a	122,03	76,27	75,87
				1b	120,85	75,53	
2		8,52		2a	122,49	76,56	
				2b	120,92	75,58	
3	3,55	8,31		3a	120,51	75,32	
				3b	121,51	75,94	

Ispitala: Tomislava Brešan



Oznaka recepture: L1

Datum izrade: 7.4.2021.

Datum ispitivanja: 8.4.2021

Ispitivanje gustoće i brzine ultrazvuka

uzorak	Masa (g)	b (mm)	h (mm)	L (mm)	ρ (kg/dm ³)	t_{uzv} (μ s)	v (m/s)	Ed (MPa)
prizma 1	589,6	40	40	160	2303,13	43,1	3712,30	30059,5
prizma 2	592,9	40	40	160	2316,02	42,4	3773,58	31233,9
prizma 3	595,4	40	40	160	2325,78	43,2	3703,70	30214,6

srednja brzina ultrazvuka $v_{sr} = 3729,86$ (m/s)

srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{d,sr} = 30502,67$ (MPa)

Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće

Ispitivanje na savijanje				Ispitivanje na pritisak			
uzorak	Sila (kN) savijanje	Savojna čvrstoća f_{sav} (MPa)	Sred.vrij. f_{sav}	uzorak	Sila (kN) tlak	Tlačna čvrstoća f_{tlak} (MPa)	Sred.vrij. f_{tlak}
1	3,57	8,36	8,16	1a	104,73	65,46	65,39
				1b	105,52	65,95	
2	3,35	7,84		2a	102,65	64,16	
				2b	105,65	66,03	
3	3,54	8,29		3a	104,47	65,29	
				3b	103,08	65,43	

Ispitala: Tomislava Brešan



Oznaka recepture: L2

Datum izrade: 7.4.2021.

Datum ispitivanja: 8.4.2021

Ispitivanje gustoće i brzine ultrazvuka

uzorak	Masa (g)	b (mm)	h (mm)	L (mm)	ρ (kg/dm ³)	t_{uzv} (μ s)	v (m/s)	Ed (MPa)
prizma 1	589,2	40	40	160	2301,56	43,6	3669,72	29353,9
prizma 2	588,4	40	40	160	2298,44	43,0	3720,93	30137,9
prizma 3	585,6	40	40	160	2287,50	43,2	3703,70	29717,3

srednja brzina ultrazvuka $v_{sr} = 3698,12$ (m/s)

srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{d,sr} = 29736,41$ (MPa)

Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće

Ispitivanje na savijanje				Ispitivanje na pritisak			
uzorak	Sila (kN) savijanje	Savojna čvrstoća f_{sav} (MPa)	Sred. vrij. f_{sav}	uzorak	Sila (kN) tlak	Tlačna čvrstoća f_{tlak} (MPa)	Sred. vrij. f_{tlak}
1	3,66	8,57	8,23	1a	102,45	64,03	63,38
				1b	102,80	64,25	
2	3,60	8,43		2a	102,79	64,24	
				2b	102,14	63,84	
3	3,29	7,70		3a	98,43	61,52	
				3b	99,83	62,39	

Ispitala: Tomislava Brešan



Oznaka recepture: L3

Datum izrade: 8.4.2021.

Datum ispitivanja: 9.4.2021.

Ispitivanje gustoće i brzine ultrazvuka

uzorak	Masa (g)	b (mm)	h (mm)	L (mm)	ρ (kg/dm ³)	t_{uzv} (μ s)	v (m/s)	Ed (MPa)
prizma 1	591,5	40	40	160	2310,55	43,2	3703,70	30016,8
prizma 2	590,4	40	40	160	2306,25	44,7	3579,42	27983,9
prizma 3	593,1	40	40	160	2316,80	43,9	3644,65	29145,9

srednja brzina ultrazvuka $v_{sr} = 3642,59$ (m/s)

srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{d,sr} = 29048,83$ (MPa)

Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće

Ispitivanje na savijanje				Ispitivanje na pritisak			
uzorak	Sila (kN) savijanje	Savojna čvrstoća f_{sav} (MPa)	Sred.vrij. f_{sav}	uzorak	Sila (kN) tlak	Tlačna čvrstoća f_{tlak} (MPa)	Sred.vrij. f_{tlak}
1	3,54	8,08	8,11	1a	94,26	58,91	58,22
				1b	89,43	55,89	
2	3,29	7,70		2a	92,27	57,65	
				2b	94,01	58,76	
3	3,65	8,55		3a	96,65	60,41	
				3b	92,30	57,67	

Ispitala: Tomislava Brešan



Oznaka recepture: L4

Datum izrade: 8.4.2021.

Datum ispitivanja: 9.4.2021.

Ispitivanje gustoće i brzine ultrazvuka

uzorak	Masa (g)	b (mm)	h (mm)	L (mm)	ρ (kg/dm ³)	t_{uzv} (μ s)	v (m/s)	Ed (MPa)
prizma 1	589,5	40	40	160	2302,73	44,3	3611,74	28448,1
prizma 2	590,3	40	40	160	2305,86	43,8	3652,97	29140,8
prizma 3	592,2	40	40	160	2313,28	44,4	3603,60	28449,7

srednja brzina ultrazvuka $v_{sr} = 3622,77$ (m/s)

srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{d,sr} = 28679,55$ (MPa)

Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće

Ispitivanje na savijanje				Ispitivanje na pritisak			
uzorak	Sila (kN) savijanje	Savojna čvrstoća f_{sav} (MPa)	Sred.vrij. f_{sav}	uzorak	Sila (kN) tlak	Tlačna čvrstoća f_{tlak} (MPa)	Sred.vrij. f_{tlak}
1	2,98	6,98	7,31	1a	89,37	55,86	55,85
				1b	91,27	57,04	
2	3,19	7,47		2a	86,90	54,31	
				2b	91,04	56,90	
3	3,20	7,49		3a	90,96	56,85	
				3b	86,66	54,16	

Ispitala: Tomislava Brešan



Oznaka recepture: T1

Datum izrade: 12.5.2021.

Datum ispitivanja: 13.5.2021.

Ispitivanje gustoće i brzine ultrazvuka

uzorak	Masa (g)	b (mm)	h (mm)	L (mm)	ρ (kg/dm ³)	t_{uzv} (μ s)	v (m/s)	Ed (MPa)
prizma 1	574,3	40	40	160	2243,36	45,7	3501,09	26042,5
prizma 2	577,5	40	40	160	2255,86	45,4	3524,23	26534,9
prizma 3	576,3	40	40	160	2251,17	46,2	3463,20	25570,6

srednja brzina ultrazvuka $v_{sr} = 3496,18$ (m/s)

srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{d,sr} = 26049,36$ (MPa)

Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće

Ispitivanje na savijanje				Ispitivanje na pritisak			
uzorak	Sila (kN) savijanje	Savojna čvrstoća f_{sav} (MPa)	Sred.vrij. f_{sav}	uzorak	Sila (kN) tlak	Tlačna čvrstoća f_{tlak} (MPa)	Sred.vrij. f_{tlak}
1	2,89	6,77	7,04	1a	91,44	57,15	57,27
				1b	93,39	58,37	
2	2,93	6,86		2a	90,22	56,39	
				2b	91,53	57,21	
3	3,20	7,49		3a	87,16	54,48	
				3b	96,01	60,01	

Ispitala: Tomislava Brešan



Oznaka recepture: T2

Datum izrade: 12.5.2021.

Datum ispitivanja: 13.5.2021.

Ispitivanje gustoće i brzine ultrazvuka

uzorak	Masa (g)	b (mm)	h (mm)	L (mm)	ρ (kg/dm ³)	t_{uzv} (μ s)	v (m/s)	Ed (MPa)
prizma 1	576,1	40	40	160	2250,39	47,7	3354,30	23979,4
prizma 2	576,8	40	40	160	2253,13	47,9	3340,29	23808,5
prizma 3	576,6	40	40	160	2252,34	47,7	3354,30	24000,2

srednja brzina ultrazvuka $v_{sr} = 3349,63$ (m/s)

srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{d,sr} = 23929,35$ (MPa)

Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće

Ispitivanje na savijanje				Ispitivanje na pritisak			
uzorak	Sila (kN) savijanje	Savojna čvrstoća f_{sav} (MPa)	Sred.vrij. f_{sav}	uzorak	Sila (kN) tlak	Tlačna čvrstoća f_{tlak} (MPa)	Sred.vrij. f_{tlak}
1	2,92	6,84	6,73	1a	79,95	49,97	49,03
				1b	80,32	50,20	
2	2,85	6,67		2a	78,73	49,21	
				2b	78,73	49,21	
3	2,85	6,67		3a	75,47	47,17	
				3b	77,44	48,40	

Ispitala: Tomislava Brešan



Oznaka recepture: T3

Datum izrade: 12.5.2021.

Datum ispitivanja: 13.5.2021.

Ispitivanje gustoće i brzine ultrazvuka

uzorak	Masa (g)	b (mm)	h (mm)	L (mm)	ρ (kg/dm ³)	t_{uzv} (μ s)	v (m/s)	Ed (MPa)
prizma 1	588,3	40	40	160	2298,05	46,6	3433,48	25656,9
prizma 2	590,9	40	40	160	2308,20	46,2	3463,20	26218,5
prizma 3	590,1	40	40	160	2305,08	46,8	3418,80	25515,9

srednja brzina ultrazvuka $v_{sr} = 3438,49$ (m/s)

srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{d,sr} = 25797,08$ (MPa)

Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće

Ispitivanje na savijanje				Ispitivanje na pritisak			
uzorak	Sila (kN) savijanje	Savojna čvrstoća f_{sav} (MPa)	Sred.vrij. f_{sav}	uzorak	Sila (kN) tlak	Tlačna čvrstoća f_{tlak} (MPa)	Sred.vrij. f_{tlak}
1	3,13	7,33	7,30	1a	98,21	61,38	62,67
				1b	104,52	65,33	
2	3,19	7,47		2a	96,55	60,34	
				2b	101,06	63,16	
3	3,03	7,09		3a	97,02	60,64	
				3b	104,29	65,18	

Ispitala: Tomislava Brešan



Oznaka recepture: T4

Datum izrade: 13.5.2021.

Datum ispitivanja: 14.5.2021.

Ispitivanje gustoće i brzine ultrazvuka

uzorak	Masa (g)	b (mm)	h (mm)	L (mm)	ρ (kg/dm ³)	t_{uzv} (μ s)	v (m/s)	Ed (MPa)
prizma 1	571,9	40	40	160	2233,98	47,4	3375,53	21406,8
prizma 2	573,2	40	40	160	2239,06	46,5	3440,86	25105,9
prizma 3	572,1	40	40	160	2234,77	47,3	3382,66	24217,4

srednja brzina ultrazvuka $v_{sr} = 3399,68$ (m/s)

srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{d,sr} = 24476,73$ (MPa)

Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće

Ispitivanje na savijanje				Ispitivanje na pritisak			
uzorak	Sila (kN) savijanje	Savojna čvrstoća f_{sav} (MPa)	Sred.vrij. f_{sav}	uzorak	Sila (kN) tlak	Tlačna čvrstoća f_{tlak} (MPa)	Sred.vrij. f_{tlak}
1	2,68	6,30	6,57	1a	76,04	47,33	47,21
				1b	74,49	46,596	
2	2,91	6,81		2a	72,27	45,17	
				2b	76,59	47,87	
3	2,81	6,60		3a	75,91	47,44	
				3b	78,18	48,86	

Ispitala: Tomislava Brešan



Oznaka recepture: T5

Datum izrade: 13.5.2021.

Datum ispitivanja: 14.5.2021.

Ispitivanje gustoće i brzine ultrazvuka

uzorak	Masa (g)	b (mm)	h (mm)	L (mm)	ρ (kg/dm ³)	t_{uzv} (μ s)	v (m/s)	Ed (MPa)
prizma 1	580,0	40	40	160	2265,63	46,6	3433,48	25294,9
prizma 2	582,1	40	40	160	2273,83	46,9	3411,51	25062,8
prizma 3	581,9	40	40	160	2273,05	47,1	3397,03	24841,8

srednja brzina ultrazvuka $v_{sr} = 3414,01$ (m/s)

srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{d,sr} = 25066,50$ (MPa)

Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće

Ispitivanje na savijanje				Ispitivanje na pritisak			
uzorak	Sila (kN) savijanje	Savojna čvrstoća f_{sav} (MPa)	Sred.vrij. f_{sav}	uzorak	Sila (kN) tlak	Tlačna čvrstoća f_{tlak} (MPa)	Sred.vrij. f_{tlak}
1	3,14	7,35	7,37	1a	85,96	53,73	54,44
				1b	87,82	54,89	
2	3,13	7,33		2a	85,50	53,44	
				2b	87,20	54,49	
3	3,17	7,42		3a	85,14	53,21	
				3b	90,98	56,86	

Ispitala: Tomislava Brešan



Oznaka recepture: T6

Datum izrade: 13.5.2021.

Datum ispitivanja: 14.5.2021.

Ispitivanje gustoće i brzine ultrazvuka

uzorak	Masa (g)	b (mm)	h (mm)	L (mm)	ρ (kg/dm ³)	t_{uzv} (μ s)	v (m/s)	Ed (MPa)
prizma 1	584,9	40	40	160	2284,77	45,1	3547,67	27233,6
prizma 2	582,3	40	40	160	2274,61	45,4	3524,23	26755,4
prizma 3	582,9	40	40	160	2276,95	45,6	3508,77	26548,6

srednja brzina ultrazvuka $v_{sr} = 3526,89$ (m/s)

srednja vrijednost dinamičkog modula elastičnosti $E_{d,sr} = 26845,88$ (MPa)

Ispitivanje savojne i tlačne čvrstoće

Ispitivanje na savijanje				Ispitivanje na pritisak			
uzorak	Sila (kN) savijanje	Savojna čvrstoća f_{sav} (MPa)	Sred.vrij. f_{sav}	uzorak	Sila (kN) tlak	Tlačna čvrstoća f_{tlak} (MPa)	Sred.vrij. f_{tlak}
1	3,02	7,07	6,95	1a	82,79	51,74	53,39
				1b	89,69	56,06	
2	2,87	6,72		2a	82,80	51,75	
				2b	85,81	53,63	
3	3,02	7,07		3a	84,33	52,71	
				3b	87,14	54,46	

Ispitala: Tomislava Brešan