

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
za gradbeništvo
in geodezijo



Jamova cesta 2
1000 Ljubljana, Slovenija
<http://www3.fgg.uni-lj.si/>

DRUGG – Digitalni repozitorij UL FGG
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

To je izvirna različica zaključnega dela.

Prosimo, da se pri navajanju sklicujete na bibliografske podatke, kot je navedeno:

Merlin, G., 2016. Vpliv kemijskih in mineralnih dodatkov na reološke lastnosti svežih cementnih malt. Diplomski nalogi. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan Bosiljkov, V., somentor Hočevnar, A.): 60 str.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5779/>

Datum arhiviranja: 3-10-2016

University
of Ljubljana
Faculty of
Civil and Geodetic
Engineering



Jamova cesta 2
SI – 1000 Ljubljana, Slovenia
<http://www3.fgg.uni-lj.si/en/>

DRUGG – The Digital Repository
<http://drugg.fgg.uni-lj.si/>

This is original version of final thesis.

When citing, please refer to the publisher's bibliographic information as follows:

Merlin, G., 2016. Vpliv kemijskih in mineralnih dodatkov na reološke lastnosti svežih cementnih malt. B.Sc. Thesis. Ljubljana, University of Ljubljana, Faculty of civil and geodetic engineering. (supervisor Bokan Bosiljkov, V., co-supervisor Hočevnar, A.): 60 pp.

<http://drugg.fgg.uni-lj.si/5779/>

Archiving Date: 3-10-2016

Univerza
v Ljubljani

Fakulteta za
*gradbeništvo in
geodezijo*



Jamova 2
1000 Ljubljana, Slovenija
telefon (01) 47 68 500
faks (01) 42 50 681
fgg@fgg.uni-lj.si

**VISOKOŠOLSKI ŠTUDIJSKI
PROGRAM GRADBENIŠTVO
SMER OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

GREGOR MERLIN

**VPLIV KEMIJSKIH IN MINERALNIH DODATKOV NA
REOLOŠKE LASTNOSTI SVEŽIH CEMENTNIH MALT**

Diplomska naloga št.: 573/SOG

**INFLUENCE OF CHEMICAL AND MINERAL
ADMIXTURES ON RHEOLOGICAL PROPERTIES OF
FRESH CEMENT MORTARS**

Graduation thesis No.: 573/SOG

Mentorica:

prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Somentor:

dr. Andraž Hočevar

Ljubljana, 13. 09. 2016

STRAN ZA POPRAVKE

Stran z napako

Vrstica z napako

Namesto

Naj bo

IZJAVE

Spodaj podpisani/-a študent/-ka _____, vpisna številka _____, avtor/-ica pisnega zaključnega dela študija z naslovom:

IZJAVLJAM

1. *Obkrožite eno od variant a) ali b)*
 - a) da je pisno zaključno delo študija rezultat mojega samostojnega dela;
 - b) da je pisno zaključno delo študija rezultat lastnega dela več kandidatov in izpolnjuje pogoje, ki jih Statut UL določa za skupna zaključna dela študija ter je v zahtevanem deležu rezultat mojega samostojnega dela;
2. da je tiskana oblika pisnega zaključnega dela študija istovetna elektronski obliki pisnega zaključnega dela študija;
3. da sem pridobil/-a vsa potrebna dovoljenja za uporabo podatkov in avtorskih del v pisnem zaključnem delu študija in jih v pisnem zaključnem delu študija jasno označil/-a;
4. da sem pri pripravi pisnega zaključnega dela študija ravnal/-a v skladu z etičnimi načeli in, kjer je to potrebno, za raziskavo pridobil/-a soglasje etične komisije;
5. soglašam, da se elektronska oblika pisnega zaključnega dela študija uporabi za preverjanje podobnosti vsebine z drugimi deli s programsko opremo za preverjanje podobnosti vsebine, ki je povezana s študijskim informacijskim sistemom članice;
6. da na UL neodplačno, neizključno, prostorsko in časovno neomejeno prenašam pravico shranitve avtorskega dela v elektronski obliki, pravico reproduciranja ter pravico dajanja pisnega zaključnega dela študija na voljo javnosti na svetovnem spletu preko Repozitorija UL;
7. da dovoljujem objavo svojih osebnih podatkov, ki so navedeni v pisnem zaključnem delu študija in tej izjavi, skupaj z objavo pisnega zaključnega dela študija.

V/Na: _____

Datum: _____

Podpis študenta/-ke:

BIBLIOGRAFSKO–DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

| | |
|-------------------------|--|
| UDK: | 532.135:691.54(043.2) |
| Avtor: | Gregor Merlin |
| Mentorica: | prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad. |
| Somentor: | dr. Andraž Hočevar, univ. dipl. inž. grad. |
| Naslov: | Vpliv kemijskih in mineralnih dodatkov na reološke lastnosti svežih cementnih malt |
| Tip dokumenta: | Diplomska naloga – visokošolski študij |
| Obseg in oprema: | 60 str., 9 pregl., 34 sl., 32 graf. |
| Ključne besede: | Reološke lastnosti svežih cementnih malt, vpliv dodatkov, vodocementno razmerje, razlez, reometer ConTec Viscometer 5, strižna napetost na meji tečenja, plastična viskoznost |

Izveček

Glavni namen diplomskega dela je bil preučiti vpliv kemijskih in mineralnih dodatkov na reološke lastnosti sveže cementne malte, tako imenovane malte CEM. Recepture maltnih mešanic smo pripravili na podlagi betonskih mešanic, z uporabo metode betonu ekvivalentne malte (metoda CEM).

Meritve smo izvajali v Konstrukcijsko-prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo Univerze v Ljubljani. Reološke parametre smo merili z reometrom ConTec Viscometer 5, ter z vzporednimi meritvami razleza malte na stresalni mizici.

Zamešali in testirali smo 26 različnih mešanic, ki jih lahko razvrstimo v 8 skupin. Vse mešanice so vsebovale agregat, cement in vodo. Mešanice se razlikujejo po vsebnosti kemijskih in mineralnih dodatkov, vrsti cementa in vodocementnem razmerju. Mineralni dodatki, s katerimi smo zamenjali del cementa, so bili mikrosilika, tuf in mleta granulirana plavžna žindra. Kemijska dodatka, ki smo ju uporabili v študiji, sta bila superplastifikator in aerant. Uporabili smo tudi dva različna cementa. Rezultate meritev smo prikazali v obliki reografov in grafikonov, ki prikazujejo odvisnost strižne napetosti na meji tečenja ali razleza malte od deleža posamezne sestavine, katere vpliv smo ugotavljali. Preiskave smo izvajali takoj po zamešanju malte ter po preteku 20 min, 40 min in 60 min.

BIBLIOGRAPHIC–DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 532.135:691.54(043.2)
Author: Gregor Merlin
Supervisor: Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph. D.
Co-advisor: Andraž Hočevar, Ph. D.
Title: Influence of chemical and mineral admixtures on rheological properties of fresh cement mortars
Document type: Graduation Thesis – Higher professional studies
Notes: 60 p., 9 tab., 34 fig., 32 graph.
Key words: Rheological properties of fresh cement mortars, admixtures influence, water-to-cement ratio, spread, Rheometer ConTec Viscometer 5, yield value, plastic viscosity

Abstract

The main purpose of the thesis was study of influence of chemical admixtures and mineral additives on the rheological properties of fresh cement mortar, so called CEM mortar. Composition of particular mortar mixture was determined from composition of relevant concrete mixture, by concrete equivalent mortar method (CEM method).

All the measurements were performed in laboratory of the Faculty of Civil and Geodetic Engineering of University of Ljubljana. The rheological parameters were measured using a rheometer ConTec Viscometer 5 and by parallel measurements of mortar flow value on flow table.

Research on the concrete, comparison between concrete and mortar mixtures and evaluation of CEM method were carried out within the thesis and doctoral dissertation. 26 different mortar compositions, which can be classified into 8 groups, were mixed and tested. All mixtures contained aggregate, cement and water. The mixtures differ by the content of chemical admixtures and mineral additives, type of cement and water to cement ratio. Mineral additives, which replaced part of the cement, were microsilica, tuff and ground granulated blast furnace slag. Chemical admixtures used in the study were superplasticizer and air entraining agent. We used also two different type of cement. Test results are presented in reographs and graphs that show relationship between yield value or flow value and content of studied mortar constituent. The tests were carried out immediately after the mixing of mortar was completed and 20 min, 40 min and 60 min after the mixing completion.

ZAHVALA

Za pomoč in strokovno podporo pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorici prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov, univ. dipl. inž. grad. ter somentorju dr. Andražu Hočevanju, univ. dipl. inž. grad. Hvala tudi drugim sodelavcem Katedre za preskušanje materialov in konstrukcij za gostoljubje, prijaznost in pomoč v času opravljanja preiskav.

Zahvalil bi se vsem sošolcem, v času študija smo postali pravi prijatelji.

Največjo zahvalo pa namenjam svojim staršem in mojim najbližjim, bratu, ženi Moniki in sinu Aljažu. Nikoli ni zmanjkalo vzpodbudnih besed. Hvala za razumevanje skozi vsa študijska leta.

KAZALO VSEBINE

| | |
|--|-----------|
| STRAN ZA POPRAVKE..... | I |
| IZJAVE | II |
| BIBLIOGRAFSKO–DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK | III |
| BIBLIOGRAPHIC–DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT | IV |
| ZAHVALA | V |
| | |
| 1 UVOD | 1 |
| | |
| 2 BETON | 2 |
| 2.1 Splošno o betonu..... | 2 |
| 2.2 Materiali za pripravo betona..... | 2 |
| 2.2.1 Cement..... | 2 |
| 2.2.1.1 Proizvodnja cementa | 3 |
| 2.2.1.2 Sestava cementa | 4 |
| 2.2.1.3 Sestava in označevanje cementa | 5 |
| 2.2.2 Agregati..... | 7 |
| 2.2.2.1 Vpliv agregata na lastnosti betona | 7 |
| 2.2.2.2 Kakovost agregata..... | 10 |
| 2.2.2.3 Vlažnost agregata..... | 10 |
| 2.2.3 Voda..... | 11 |
| 2.2.4 Dodatki | 11 |
| 2.2.5 Kemijski dodatki..... | 11 |
| 2.2.5.1 Superplastifikator | 12 |
| 2.2.5.2 Aerant..... | 13 |
| 2.2.5.3 Stabilizator | 13 |
| 2.2.6 Mineralni dodatki..... | 14 |
| 2.2.6.1 Žindra | 15 |
| 2.2.6.2 Mikrosilika..... | 16 |
| 2.2.6.3 Tuf | 16 |
| | |
| 3 REOLOGIJA | 18 |
| 3.1 Uvod v reologijo..... | 18 |
| 3.2 Viskometrija | 18 |
| 3.3 Strižne deformacije | 20 |
| 3.4 Klasifikacija tekočin..... | 20 |
| 3.4.1 Newtonska tekočina..... | 20 |
| 3.4.2 Nenevtonske tekočine, časovno neodvisne..... | 21 |
| 3.5 Binghamov model tekočine..... | 23 |
| | |
| 4 VPLIV POSAMEZNIH SESTAVIN BETONA NA REOLOGIJO | 25 |
| 4.1 Vpliv vode na reološke lastnosti..... | 25 |
| 4.2 Vpliv cementa na reološke lastnosti..... | 26 |
| 4.3 Vpliv aeranta na reološke lastnosti | 26 |
| 4.4 Vpliv plastifikatorja in superplastifikatorja na reološke lastnosti..... | 27 |
| 4.5 Vpliv mikrosilike na reološke lastnosti | 27 |
| 4.6 Vpliv žindre na reološke lastnosti | 28 |

| | | |
|-------------|--|-----------|
| 4.7 | Vpliv tufa na reološke lastnosti | 28 |
| 4.8 | Vpliv agregata na reološke lastnosti | 28 |
| 5 | REOMETRI | 29 |
| 5.1 | Koaksialni valjasti reometer | 29 |
| 5.2 | Reometri z vzporednima ploščama | 30 |
| 5.3 | Mešalni reometri z rotorjem | 30 |
| 5.3.1 | ICAR RHEOMETER | 31 |
| 5.3.2 | TWO – POINT RHEOMETER | 31 |
| 5.3.3 | IBB RHEOMETER | 32 |
| 6 | EKSPERIMENTALNI DEL | 33 |
| 6.1 | Uvod | 33 |
| 6.2 | Metoda CEM (Concrete Equivalent Mortar) | 33 |
| 6.3 | Uporabljeni materiali in sestave mešanic | 34 |
| 6.3.1 | Cement | 34 |
| 6.3.2 | Agregat | 35 |
| 6.3.3 | Voda | 36 |
| 6.3.4 | Kemijski dodatki | 36 |
| 6.3.4.1 | Superplastifikator | 36 |
| 6.3.4.2 | Aerant | 36 |
| 6.3.4.3 | Stabilizator | 36 |
| 6.3.5 | Mineralni dodatki | 37 |
| 6.3.5.1 | Mikrosilika | 37 |
| 6.3.5.2 | Tuf | 37 |
| 6.3.5.3 | Mleta granulirana plavžna žindra | 37 |
| 6.4 | Mešanje malt | 38 |
| 6.4.1 | Sestave mešanic | 38 |
| 6.5 | Preiskave | 40 |
| 6.5.1 | Uvod | 40 |
| 6.5.2 | Razlez | 41 |
| 6.5.3 | Meritve z reometrom | 41 |
| 7 | ANALIZA REZULTATOV | 44 |
| 7.1 | Vpliv kemijskih dodatkov | 44 |
| 7.1.1 | Vpliv vrste cementa in količine superplastifikatorja | 44 |
| 7.1.2 | Vpliv količine aeranta | 46 |
| 7.1.3 | Vpliv stabilizatorja | 48 |
| 7.1.4 | Vpliv spreminjanja V/C-razmerja | 50 |
| 7.2 | Vpliv mineralnih dodatkov | 51 |
| 7.2.1 | Vpliv zamenjave cementa z žindro | 51 |
| 7.2.2 | Vpliv zamenjave cementa z mikrosiliko | 52 |
| 7.2.3 | Vpliv zamenjave cementa s tufom | 54 |
| 8 | ZAKLJUČEK | 56 |
| VIRI | | 58 |

KAZALO PREGLEDNIC

| | | |
|----------------|--|----|
| Preglednica 1: | Spojine, ki tvorijo cementni klinker | 4 |
| Preglednica 2: | Cementni minerali v klinkerju | 5 |
| Preglednica 3: | Trdnostni razredi..... | 6 |
| Preglednica 6: | Kemijska sestava žindre | 15 |
| Preglednica 8: | Karakteristike kemijskih dodatkov in oznake..... | 37 |
| Preglednica 9: | Sestava mešanic cementnih malt | 39 |

KAZALO SLIK

| | | |
|-----------------|---|----|
| Slika 1: | Shematski prikaz proizvodnje cementa | 3 |
| Slika 2: | Diagram razvoja trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerja..... | 5 |
| Slika 3: | Označevanje cementa, skladno s standardom SIST EN 197-1 | 6 |
| Slika 4: | Prikaz sejanja agregata | 8 |
| Slika 5: | Mejne krivulje območij primernosti agregata | 9 |
| Slika 6: | Stopnje količine vlage v agregatu..... | 10 |
| Slika 7: | Obremenjeno telo (x, y, z)..... | 19 |
| Slika 8: | Obremenjeno telo in deformacija | 19 |
| Slika 9: | Obnašanje toka Newtonskih tekočin | 21 |
| Slika 10: | Obnašanje toka psevdoplastične tekočine | 21 |
| Slika 11: | Disperzija delcev psevdoplastične tekočine pri mirovanju in visoki strižni hitrosti . | 22 |
| Slika 12: | Obnašanje toka dilatirane tekočine | 22 |
| Slika 13: | Obnašanje toka materialov s strižno napetostjo na meji tečenja | 23 |
| Slika 14: | Relacija med navorom T (uporom proti striženju) in strižno napetostjo τ | 24 |
| Slika 15: | Reograf – diagram SNMT in plastične viskoznosti | 25 |
| Slika 16: | Vpliv vode – reograf | 25 |
| Slika 17: | Vpliv cementa – reograf | 26 |
| Slika 18: | Vpliv aeranta – diagram SNMT in plastične viskoznosti | 26 |
| Slika 19: | Vpliv plastifikatorja in superplastifikatorja – reograf | 27 |
| Slika 20: | Vpliv mikrosilike – reograf | 27 |
| Slika 21: | Vpliv oblike zrn agregata – reograf..... | 28 |
| Slika 22: | Reometer ConTec Viscometer 5 | 29 |
| Slika 23 levo: | Cemagref IMB | 30 |
| Slika 24 desno: | Viscometer 3 | 30 |
| Slika 25: | BRTHEOM reometer..... | 30 |
| Slika 26: | ICAR rheometer..... | 31 |
| Slika 27 levo: | TWO-POINT Rheometer detajl rezil in glavne osi..... | 31 |
| Slika 28 desno: | TWO-POINT Rheometer prikaz celotne naprave..... | 31 |
| Slika 28: | IBB Rheometer | 32 |
| Slika 29 levo: | ConTec Rheometer – 4SCC..... | 32 |
| Slika 30 desno: | Fresh Concrete Rheometer BT2 | 32 |
| Slika 31: | Mleta granulirana plavžna žindra (levo) in tuf (desno) | 38 |
| Slika 32: | Mešalec HOBART A200, ki smo ga uporabljali v okviru preiskav | 38 |
| Slika 33: | Oprema za preizkus z razlezom na stresalni mizici za malte..... | 41 |
| Slika 34: | Potek preizkusa z reometrom | 43 |

KAZALO GRAFIKONOV

| | | |
|-------------------------|--|-----------|
| Grafikon 1: | Zrnavostna krivulja agregata 0/2 | 35 |
| Grafikon 2: | SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža superplastifikatorja za MR1 (CEM 2) | 44 |
| Grafikon 3: | Vpliv količine superplastifikatorja na razlez v odvisnosti od časa za MR1 (CEM 2)..... | 45 |
| Grafikon 4: | SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža superplastifikatorja za ML1 (CEM 1)..... | 45 |
| Grafikon 5: | Vpliv količine superplastifikatorja na razlez v odvisnosti od časa za ML1 (CEM 1)..... | 45 |
| Grafikoni 6, 7, 8 in 9: | Vpliv vrste cementa in količine superplastifikatorja na obdelovalnost malte po času $t = 0$ min (zgoraj levo), $t = 20$ min (zgoraj desno), $t = 40$ min (spodaj levo) in $t = 60$ min (spodaj desno)..... | 46 |
| Grafikon 10: | SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža aeranta | 47 |
| Grafikon 11: | Povečan prikaz SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža aeranta (naraščajoči delež aeranta) | 47 |
| Grafikon 12: | Vpliv količine aeranta na SNMT (τ_0)..... | 48 |
| Grafikon 13: | Vpliv količine aeranta na razlez malte v času $t = 0, 20, 40$ in 60 min | 48 |
| Grafikon 14, 15: | SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža aeranta (levo) in povečan prikaz (desno) | 49 |
| Grafikon 16: | Vpliv količine stabilizatorja na razlez malte v času $t = 0, 20, 40$ in 60 min..... | 49 |
| Grafikon 17: | Vpliv količine gostilca na SNMT (τ_0)..... | 49 |
| Grafikon 18, 19: | <i>SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od V/C-razmerja (levo) in povečan prikaz (desno)</i> | <i>50</i> |
| Grafikon 20: | Vpliv V/C-razmerja na obdelavnost malte v času $t = 0, 20, 40$ in 60 min..... | 50 |
| Grafikon 21: | Vpliv V/C-razmerja na SNMT (τ_0)..... | 51 |
| Grafikon 22, 23: | SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od povečevanja deleža žindre (levo) in povečan prikaz (desno)..... | 51 |
| Grafikon 24: | Vpliv zamenjave cementa z žindro na razlez malte | 52 |
| Grafikon 25: | Vpliv zamenjave cementa z žindro na reološke lastnosti malte..... | 52 |
| Grafikon 26, 27: | SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od povečevanja deleža mikrosilike (levo) in povečan prikaz (desno)..... | 53 |
| Grafikon 28: | Vpliv zamenjave cementa z mikrosiliko na razlez malte | 53 |
| Grafikon 29: | Vpliv zamenjave cementa z mikrosiliko na reološke lastnosti malte..... | 53 |
| Grafikon 30: | SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od povečevanja deleža tufa | 54 |
| Grafikon 31: | Vpliv zamenjave cementa s tufom na razlez malte | 55 |
| Grafikon 32: | Vpliv zamenjave cementa s tufom na reološke lastnosti malte | 55 |

KRATICE

SNMT – Strižna napetost na meji tečenja

CEM – Betonu ekvivalentna malta (angl. »concrete equivalent mortar«)

V/C razmerje – Vodocementno razmerje

SIST – Slovenski inštitut za standardizacijo

»Ta stran je namenoma prazna.«

1 UVOD

Gradbeniki se dnevno srečujemo z maltami in betoni. Beton je osnovni in najpogosteje uporabljen material pri gradnji na našem področju. Uporabljamo ga za vse vrste objektov: za stanovanjske ali nestanovanjske stavbe, gradbene inženirske objekte, kot so objekti transportne infrastrukture, cevovodi, komunikacijska omrežja in elektroenergetski vodi, za kompleksne industrijske objekte ter druge inženirske objekte. Sama priprava betona je relativno enostavna, bolj zahtevna pa je lahko določitev njegove sestave. Danes znamo sprojektirati veliko vrst betona glede na postavljene zahteve, ki vključujejo tlačno trdnost, stopnjo izpostavljenosti, vgradljivost ipd. Zaradi vse bolj zahtevne gradnje pa je zahtevnejši tudi celotni proces od priprave betona do končnega izdelka. Betoni se danes vgrajujejo v različne opazne sisteme raznih oblik in velikosti, po odstranitvi opaža pa nas morajo prepričati s svojimi lastnosti in z izgledom.

Prav zato mi je bil naslov diplomske naloge izredno zanimiv. Danes si pomagamo s celo paleto različnih mineralnih ali kemijskih dodatkov, s katerimi izboljšujemo bistvene lastnosti betona. Tudi vgradljivost betona je zelo pomembna, pa ne samo zaradi doseganja boljših lastnosti samega betona, ampak tudi zaradi dela na samih gradbiščih. Kot sem omenil, so opaži raznih oblik in dimenzij, betonu pa se pred vgradnjo po navadi dodajajo prevelike količine vode, kar pomeni večje V/C-razmerje in posledično manjša končna trdnost, vse zaradi lažje vgradnje, saj beton bolj »teče«. Uporaba dodatkov izboljša vgradljivost in ohranja ali celo poveča trdnost. Lastnosti svežega betona lahko dosegamo po svojih željah ravno z uporabo dodatkov.

Reološke lastnosti smo določili na CEM maltah, kar pomeni »concrete equivalent mortar« oziroma betonu enakovredna malta. Gre za metodo, po kateri smo iz recepture za beton izračunali recepturo za malto. Lastnosti sveže CEM malte naj bi bile podobne lastnostim betona, iz katerega smo CEM malto določili. Zato naj bi bile CEM malte primerne za študij vpliva različnih dodatkov na lastnosti betona v svežem stanju. Meritve smo opravili na reometru ConTecViscometer 5, ki je naprava za meritve reoloških lastnosti, in sicer na 26 različnih sestavah malt. Malte so vsebovale različne mineralne ali kemijske dodatke.

Cilj preiskav je bil ugotoviti vpliv posameznih sestavin CEM malte na njene lastnosti v svežem stanju. Vsaka mešanica je bila preskušana v štirih časovnih intervalih v razmiku 20 minut. V vsakem času smo meritve ponovili trikrat. Ob vsaki meritvi reoloških lastnosti smo vzporedno opravili tudi preizkus razleza mešanice.

Analizo rezultatov meritev smo opravili na osmih skupinah CEM malt, ki so se med seboj razlikovale v vrsti cementa, vrsti superplastifikatorja, vsebnosti aeranta, vodocementnem razmerju, vsebnosti stabilizatorja, žindre, mikrosilike ali tufa. Analizirali smo vpliv teh parametrov na strižno napetost na meji tečenja, plastično viskoznost in razlez CEM malte.

2 BETON

Prvi približki današnjega betona se pojavljajo že v obdobju Rimljanov. Izdelali so ga iz peska, apna, pucolana in zdrobljene opeke. Poznali so tudi že škodljive primesi in osnovne lastnosti različnih vrst peska. Angleški izraz za beton - »concrete« - izhaja iz latinske besede *concrecere*, kar pomeni »zrasti skupaj« oziroma »združiti se«, zato izraz zelo lepo opiše beton kot gradbeni material. Za pionirja analize lastnosti pucalana velja John Smeaton, toda njegov beton je bil odvisen od vrste vulkanskega materiala. Prava doba betona se je začela šele leta 1824, ko je anglež Joseph Aspdin odkril, da z žganjem apnenca in glin pri okrog 1500 stopinjah Celzija pridobimo cement. Patent za izdelavo umetnega kamna (patent št. 5,022 za »An Improvement in the Modes of Producing Artificial Stone«) je zaščitil z imenom »Portlandski cement«. Sredi 19. stoletja pa sta Francoza Lambot in Monier okoli jeklene mreže vlivala beton za izdelavo cvetličnih korit in tako veljata za pionirja armiranega betona [1,2].

2.1 Splošno o betonu

Beton je kompozit, sestavljen iz različnih sestavin, ki se zaradi hidratacije cementa povežejo v strjeno homogeno strukturo. Danes poznamo veliko vrst betonov, ki se med seboj razlikujejo po vezivu in različnih dodatkih, s katerimi reguliramo lastnosti betona. Splošno je beton zmes:

- veziva (cement),
- agregata,
- vode,
- kemijskih in mineralnih dodatkov.

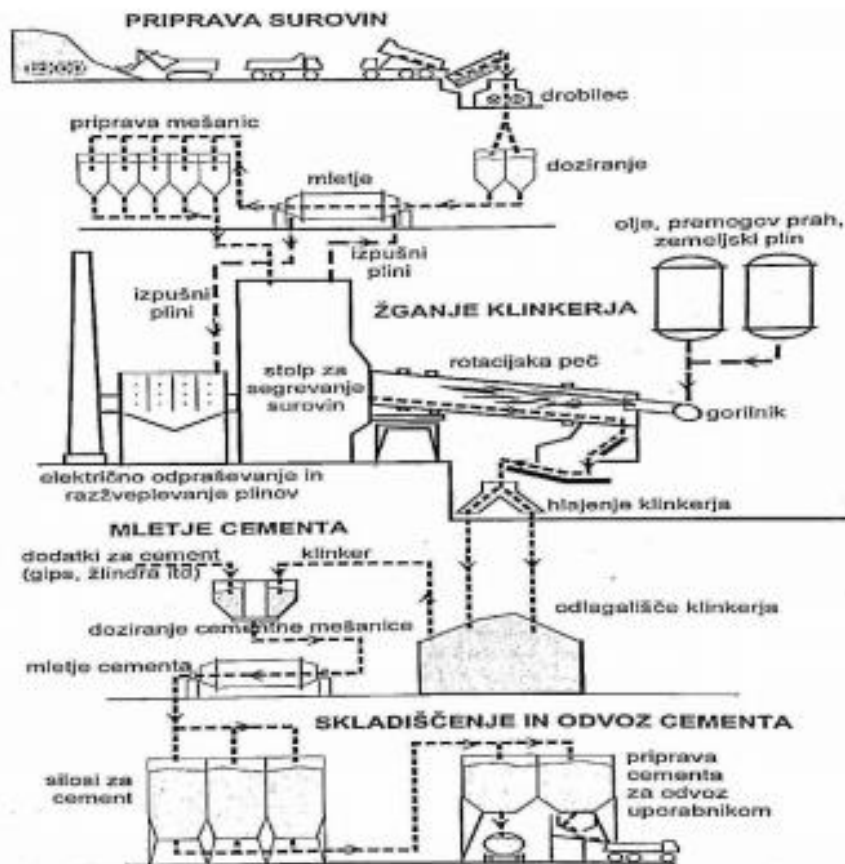
Beton je danes, zaradi svojih lastnosti in uporabnosti, najpogosteje uporabljen material, saj ga je moč vlivati v najrazličnejše oblike, dosega pa visoke tlačne trdnosti [3].

2.2 Materiali za pripravo betona

2.2.1 Cement

Cement je silikatno hidravlično vezivo, pridobljeno iz mineralov, ki jih vsebujejo lapor, apnenec in glina. Pri dodajanju vode (hidratacija) nastane židka cementna pasta, ki reagira, veže in se strdi v cementni kamen. V betonu predstavlja bistveni material, ki za enkrat še nima alternative [3, 4].

2.2.1.1 Proizvodnja cementa



Slika 1: Shematski prikaz proizvodnje cementa [3]

Proizvodnjo cementa razdelimo v štiri sklope:

- pridobivanje surovin,
- priprava surovin,
- žganje cementnega klinkerja,
- mletje klinkerja, brez ali z mineralnimi dodatki.

Proizvodnja cementa se torej začne s pridobivanjem surovine v kamnolom. Osnovne surovine so:

- apnenec,
- glina,
- lapor (naravna kombinacija apnenca in gline).

Pridobljene surovine je potrebno drobiti, mleti in transportirati v silose. Potrebno jih je kemijsko analizirati, da lahko ugotovimo mineralno strukturo in jo po potrebi dopolnujemo z manjkajočimi minerali. Zaradi pomanjkanja laporja se mešanica pripravlja iz apnenca in gline, vsebovati pa mora 75 % do 78 % CaCO_3 . Apnenec največkrat najdemo v kombinaciji z dolomitom ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), ki vsebuje MgO , kar je v cementnem klinkerju nezaželeno. Gline prispevajo okside SiO_2 , Al_2O_3 in Fe_2O_3 . Mešanici največkrat dodajamo piritne ogorke (Fe_2O_3), boksit (Al_2O_3), kremenčev pesek (SiO_2), žgano apno (CaO). Po pravem razmerju surovin sledi mletje (suho ali mokro) v surovinsko moko. Velikost delcev surovinske moke je manjša od $250\ \mu\text{m}$, kar je pomembno za kvaliteto žganja v peči. Surovinska moka se

skladišči v silosih, kjer poteka homogeniziranje oziroma vpihovanje zraka v dva dela silosa. Z vpihavanjem zraka se surovinska moka dobro premeša – homogenizira [3, 4].

Žganje in ohlajanje klinkerja potekata v treh korakih:

- izmenjevalec toplote,
- rotacijska peč,
- hladilec klinkerja.

Pred vstopom v peč se surovinska moka segreva v izmenjevalcu toplote. Skozi izmenjevalec toplote se protitočno gibljejo dimni plini, segrevanje pa posledično pomeni krajši čas samega žganja, saj je pred vstopom moka že dekarbonizirana. Dekarbonizacija je kemični postopek, kjer se zaradi temperature iz apnenca izloča CO₂, pri tem pa nastaja žgano apno. Po prehodu skozi štiri ciklone izmenjevalca toplote moka nadaljuje pot v rotacijsko peč.

Rotacijska peč ima obliko valja/cevi, znotraj je obložena z ognjevarnim materialom. Poteka v rahlem nagibu in tako ob vrtenju omogoča pomikanje materiala. Premer valja je do 5 m, vrti pa se s hitrostjo do dveh obratov na minuto. V sami peči dosežemo temperaturo materiala do okrog 1450 stopinj Celzija. V prvi fazi segrevamo do 1300 stopinj, v drugi med 1300 in 1500 stopinj, v tretji pa material ohlajamo. Moka med 100 in 600 stopinjami odda tako prosto kot kristalno vezano vodo, z višanjem temperature do okrog 850 stopinj Celzija pa pride do razpada apnenca na CO₂ in CaO. Dekarbonizacija surovinske moke poteče pred njenim vstopom v peč. V peči se najprej oblikuje mineral belit, pri temperaturi do 1300 stopinj, na temperaturi sintranja – 1450 stopinj pa še mineral alit. Produkt žganja je klinker.

Hlajenje klinkerja je zadnji korak, ki ima na kvaliteto klinkerja zelo velik vpliv. Idealno za kvaliteto klinkerja je, če ga počasi ohlajamo do 1250 stopinj celzija, nato pa hitro. Če ga ohladimo hitro, klinker obdrži mineralno sestavo, kar pomeni veliko alita. Hladimo ga v posebnem hladilniku, kjer s pomočjo ventilatorjev vpihujemo zunanji hladen zrak.

Končni produkt je ohlajeni zmleti klinker – portland cement. Meljemo ga na zrnca velikosti od 0,001 do 0,1 mm. Med mletjem se dodaja tudi sadra, ki deluje kot regulator vezanja, žindra, pucolani, apnenci, elektrofiltrski pepel. Dodatek, kot je sadra, je obvezen, saj sulfati upočasnijo vezanje [3, 4].

2.2.1.2 Sestava cementa

Preglednica 1: Spojine, ki tvorijo cementni klinker. [3, 5]

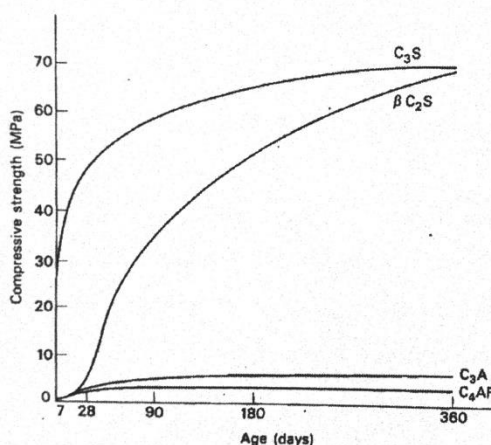
| Spojine | Delež | Komponente |
|--------------------------------|----------|------------|
| CaO | 60—67 % | C |
| SiO ₂ | 17—15 % | S |
| Al ₂ O ₃ | 3—8 % | A |
| Fe ₂ O ₃ | 0,5—6 % | F |
| SO ₃ | 1—3 % | S |
| alkalije | do 1,3 % | |
| primesi | do 4 % | |

V preglednici 1 so predstavljene osnovne spojine, ki tvorijo komponente klinkerja. V preglednici 2 so predstavljeni minerali cementnega klinkerja, ki so sestavljeni iz komponent v preglednici 1.

Preglednica 2: Cementni minerali v klinkerju. [3]

| Minerali | Oznaka | Spojine | Delež | Lastnosti |
|------------------------------|--------|---|---------|---|
| trikalcijev silikat ALIT | C3S | $3\text{CaO} \times \text{SiO}_2$ | 40—70 % | najpomembnejši, močno reagira, povzroča visoko trdnost |
| dikalcijev silikat BELIT | C2S | $2\text{CaO} \times \text{SiO}_2$ | 5—30 % | počasi strjuje, manj hidratacijske toplote |
| trikalcijev aluminat | C3A | $3\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$ | 7—15 % | reagira hitro, sprošča veliko toplote, občutljiv na sulfatno korozijo |
| tetrakalcijev aluminat ferit | C4AF | $4\text{CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$ | 10—20 % | strjuje počasi, bolj odporen na sulfatno korozijo |

Lastnosti pojasnjuje spodnji graf na sliki 2.



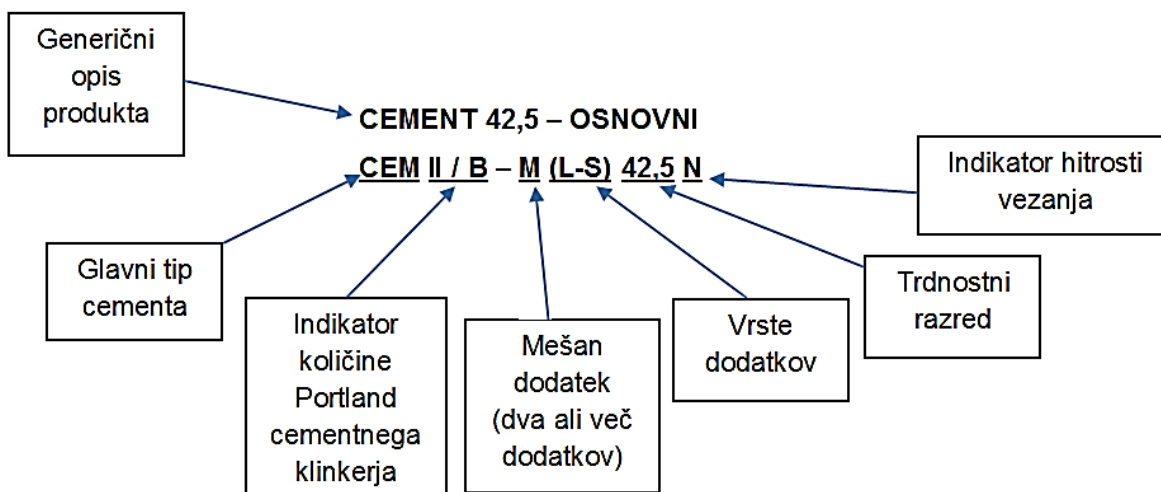
Slika 2: Diagram razvoja trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerja [6]

2.2.1.3 Sestava in označevanje cementa

V praksi potrebujemo različne betone za raznovrstne gradnje, zato potrebujemo tudi različne cemente. Pri izbiri cementa upoštevamo način izvajanja del, končno rabo betona, pogoje negovanja, dimenzije konstrukcije, pogoje okolja ali potencialno reaktivnost [7]. Slovenski standard SIST EN 197-1 predpisuje sestavo, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente. V 5 glavnih skupin deli 27 osnovnih cementov.

- CEM I portlandski cement
- CEM II mešani portlandski cement
- CEM III žlindrin cement
- CEM IV pucolanski cement
- CEM V mešani cement

Kako cement označujemo, nam predpisuje standard SIST EN 197-1. V nadaljevanju povzemamo standardni sistem označevanja cementov:



Slika 3: Označevanje cementa, skladno s standardom SIST EN 197-1 [3, 5]

Indikator vrste dodatkov: M: klinkerju dodana dva ali več dodatkov. Pri vrstah mineralnih dodatkov pa so podane oznake:

- S granulirana plavžna žindra,
- D mikrosilika,
- P naravni pucolani,
- Q naravni kalcinirani pucolani,
- V silikatni elektrofiltrski pepel,
- W karbonski elektrofiltrski pepel,
- T žgani skrilavec,
- L apnenec,
- LL apnenec [3].

Trdnostni razred cementov je ločen v tri skupine : 32,5 MPa, 42,5 MPa in 52,5 MPa, ločimo pa jih še po hitrosti strjevanja: N – normalna hitrost strjevanja, R – pospešena hitrost strjevanja.

Preglednica 3: Trdnostni razredi [3, 8]

| TRDNOSTNI RAZRED | ZGODNJA TRDNOST | | TRDNOST PO 28 DNEH | |
|---------------------|-----------------|--------|--------------------|--------|
| | 2. dan | 7. dan | MIN | MAX |
| 32,5 N | - | ≥ 16,0 | ≥ 32,5 | ≥ 52,5 |
| 32,5 R | ≥ 10,0 | - | ≥ 32,5 | ≥ 52,5 |
| 42,5 N | ≥ 10,0 | - | ≥ 42,5 | ≥ 62,5 |
| 42,5 R | ≥ 20,0 | - | ≥ 42,5 | ≥ 62,5 |
| 52,5 N | ≥ 20,0 | - | ≥ 52,5 | |
| 52,5 R | ≥ 30,0 | - | ≥ 52,5 | |

2.2.2 Agregati

Največja sestavina betona je mineralni agregat, saj zavzema 60—75 % prostornine betona. Je zmes različnih velikosti zrn, ki so groba, fina in praškasta. Naravni mineralni agregat v betonu predstavlja najtrši element, zato je pomembno, da je agregat čist, kvaliteten, zadostne trdnosti in odporen na zunanje vplive [3, 9].

Glede na nastanek naravne mineralne agregate ločimo na:

- metamorfne,
- sedimentne,
- eruptivne.

Glede na pridobivanje agregata pa ločimo:

- drobljenec – ki ga pridobivamo v kamnolomih,
- gramoz – ki ga kopljemo v rečnih dolinah.

Agregat je torej čist, trd in inerten material, ki ima v betonu sledeče naloge [3, 8]:

- Vpliva na znižanje cene betona, saj je pridobivanje enostavno in poceni.
- Ustvari koheziven beton ob predpostavki, da je sestavljen iz ustrezne kombinacije frakcij.
- Deluje kot odvajalec toplote, zato znižuje hidratacijsko temperaturo.
- Omejuje krčenje.
- Povečuje površinsko trdnost betona (obrus), trdnost povečujemo tudi z uporabo trših magmatskih kamnin (granit).
- Ustvarja barvito strukturo in sposobnost odbijanja svetlobe.
- Kontrolira gostoto.
- Povečuje požarno odpornost.

2.2.2.1 Vpliv agregata na lastnosti betona

GOSTOTA – običajna gostota agregata je 2200 do 2600 kg/m³, poznamo pa tudi lažje in težje agregate.

Običajno nas zanimajo tri relativne (specifične) gostote agregata in sicer:

- Normalna relativna gostota (razmerje mase normalno suhega agregata in njegove prostornine brez por).
- Relativna gostota z vodo zasičenega, površinsko suhega agregata (razmerje mase agregata in mase vode v porah in prostornine agregata s porami).
- Relativna gostota agregata osušenega v peči (razmerje mase suhega agregata in prostornine vključno s porami) [3, 8].

MAKSIMALNO ZRNO (D_{max}) – Običajno ločimo grobi (premer zrn nad 4 mm) in drobni agregat. V večini primerov pri betonih uporabljamo največje zrno agregata 16 mm ali 32 mm. Maksimalno zrno mora biti manjše od $\frac{1}{4}$ najmanjše dimenzije konstrukcijskega elementa, ki ni plošča (pri ploščah je D_{max} manjše od $\frac{1}{3}$ debeline plošče). Poleg tega mora biti D_{max} manjše tudi od dimenzije, ki je enaka najmanjši razdalji med vzporednima armaturnima

palicama v AB elementu zmanjšani za 5 mm. V primerih masivnih inženirskih objektov se uporabljajo tudi večje frakcije, ki posledično tudi zmanjšujejo potrebo po vodi in cementu, saj imamo pri uporabljeni večji frakciji manj stičnih površin kot pri drobnejših frakcijah. Posebno pozornost je treba nameniti tudi drobnim frakcijam, ki poskrbijo za enakomerno porazdelitev različnih frakcij po betonu [3].

OBLIKA ZRNA AGREGATA

Odvisna je predvsem od pridobivanja agregata. Droblijenci so praviloma kvadrataste oblike, pri gramozu pa imamo praviloma kroglasto obliko. Kroglasta zrna omogočajo lažjo vgradljivost, lomljena pa dosegajo višjo trdnost pri enakem vodocementnem razmerju. Ločimo tudi zrna ugodne in neugodne oblike. Ugodno obliko imajo zrna, pri katerih je razmerje med največjo in najmanjšo izmerjeno dimenzijo 3 : 1 ali manj. Za neugodne veljajo zrna z večjim razmerjem, se pravi podolgovate in ploščate oblike [3, 10].

POVRŠINSKA TEKSTURA

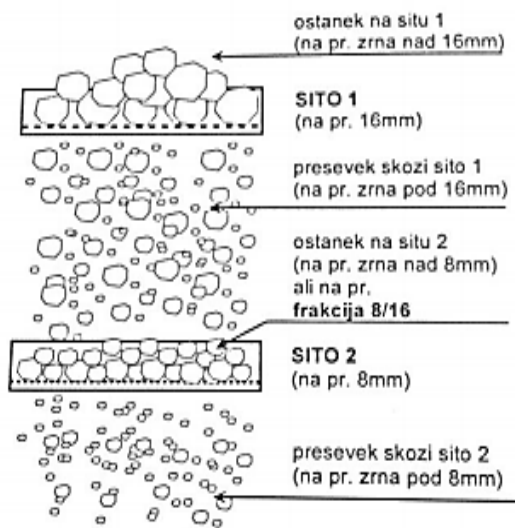
Pri teksturi se pogovarjamo o fini in grobi. Groba ima lastnost boljše sprijemnosti s cementnim kamnom in posledično viša trdnost betona, po drugi strani pa ima večjo potrebo po vezivu [3].

TRDNOST AGREGATA

Če želimo pripraviti beton visoke trdnosti, moramo uporabiti agregat visoke trdnosti (na primer granit). Laboratorijska preiskava porušitve betonskega preizkušanca nam pokaže, ali se poruši cementni kamen ali agregat in tako lahko hitro ugotovimo primernost materialov. V praksi pa je vredno preveriti, ali je cenejše uporabiti agregat visoke trdnosti ali pa uporabiti večjo količino cementa [3].

ZRNAVOSTNA SESTAVA

Izraz opisuje primerno sestavo agregata za izdelavo betona. Če želimo beton, ki bo imel ustrezne lastnosti tako v svežem kot kasneje v strjenem stanju, moramo zanj določiti primerno zrnavostno sestavo agregata. Zrnavostna sestava pomeni, da je razmerje različnih velikosti zrn ravno pravšnje za pripravo betonske mešanice. V obliki mejnih krivulj podaja območja primerne zrnavostne sestave standard SIST 1026 [7].



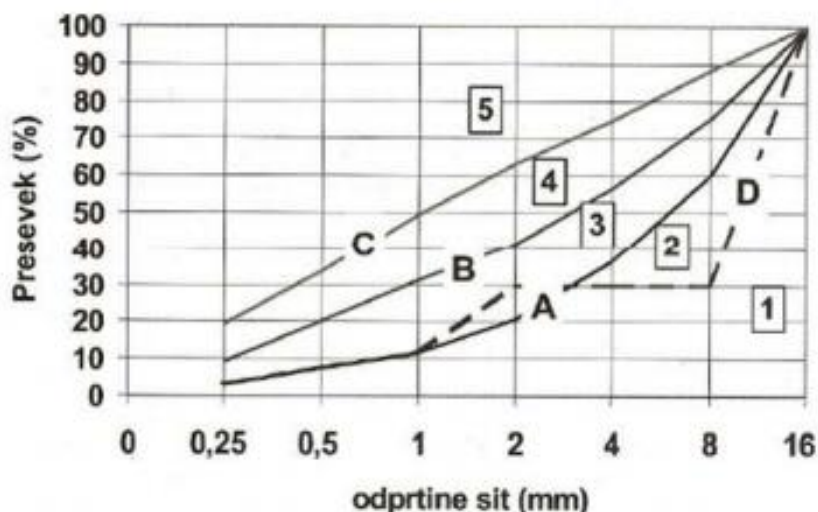
Slika 4: Prikaz sejanja agregata [3]

S sliko 4 prikazujemo potek sejanja agregata. Odprtine sit so standardne, na sliki opazujemo siti velikosti odprtin 16 in 8 mm. Na situ 1 (16 mm) ostanek predstavljajo zrna, ki so večja od 16 mm, presevek skozi sito pa zrna, ki so manjša od 16 mm. Na situ 2 (8 mm) ostanek predstavljajo zrna, ki so večja od 8 mm, presevek pa zrna, ki so manjša od 8 mm. Zrna, ki so se presejala skozi sito 1 in ostala na situ 2 so zrna, ki jih imenujemo frakcija 8/16 [3].

V grobem poznamo več frakcij:

| | | |
|----------|-----------|------------|
| - 0/2 mm | - 0/16 mm | - 4/8 mm |
| - 0/4 mm | - 0/32 mm | - 8/16 mm |
| - 0/8 mm | - 0/63 mm | - 16/32 mm |

Fine frakcije predstavljajo frakcije 0/1 mm, 0/2 mm, 0/4 mm, ostale razvrščamo med grobe frakcije [3].



Slika 5: Mejne krivulje območij primernosti agregata [3]

Mejne krivulje predstavlja slika 5. Krivuljo torej predstavlja razmerje med velikostjo odprtin sit in presevom skozi določeno velikost sita. Za primere posebnih vrst betona lahko pripravimo tudi drugačno zrnovostno sestavo, vendar je modifikacija zahtevna, potrebno jo je spremljati s poskusi, saj lahko bistveno vplivamo na trdnost končnega izdelka ali na pojav segregacije.

Če za določen primer agregata naredimo sejnalno analizo in nam zrnovostna sestava poteka v območju 1 ali 5, ta agregat nima primerne sestave. Lahko jo popravimo z dodajanjem posameznih frakcij. Najbolj optimalen primer zrnovostne sestave je običajno sestava v območju 3.

Večje kot je število uporabljenih frakcij, večjo kvaliteto betona lahko dosežemo, saj se zrna med seboj lepše razporedijo in zapolnijo prostor, kar preprečuje segregacijo, zagotavlja boljše zbitost zrn in zmanjša trenje v masi. Nevarnost za pojav segregacije in izločanje vode povzroča majhna vsebnost finih frakcij agregata [3, 8, 9].

2.2.2.2 Kakovost agregata

Agregat je zmes različnih snovi in primesi, ki tako ali drugače vplivajo na beton kot končni izdelek.

PRAŠKASTI DELCI so tisti delci, ki padejo skozi sito z velikostjo odprtine 0,075 mm. Majhni delci imajo veliko specifično površino, kar pomeni, da bomo morali mešanici dodati večjo količino vode.

ORGANSKE PRIMESI so lahko ostanki rastlinja ali maščob, s katerimi so onesnažena nahajališča gramoza. Po navadi so kisle, kar vpliva na proces hidratacije, saj zmanjšujejo alkalnost cementne paste.

SOLI povzročajo korozijo armature in prezgodnjo hidratacijo cementa. Vsekakor imajo zelo neugodni vpliv na armirane ali prednapete betone.

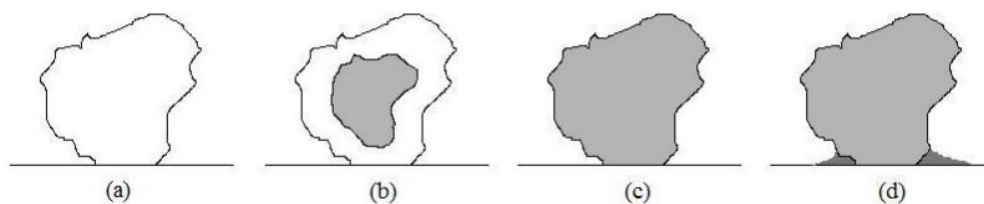
SNOVI, KI REAGIRAJO: značilni predstavniki so opal, silikatno steklo, kalcedon, kremen, sulfidi. Povzročijo lahko visoke hidravlične pritiske, ki poškodujejo beton.

Pri agregatu stremimo k temu, da je čist (brez prahu, organskih snovi in soli) in inerten (brez mineralov, ki bi povzročili reakcijo in porušitev notranje strukture) [3, 8].

2.2.2.3 Vlažnost agregata

Najpogosteje se srečujemo z agregati, ki že vsebujejo vlago. Pomembno je, da ugotovimo, v kolikšni meri bo vplivala na vgradljivost in vodo-cementno razmerje. Ločimo štiri stanja količine vlage v agregatih (slika 6):

- a) osušen v peči,
- b) zračno suh,
- c) zasičen z vlago,
- d) moker.



Slika 6: Stopnje količine vlage v agregatu [3]

Pri pridobivanju agregata se srečujemo z zračno suhim, zasičenim z vlago ali mokrim agregatom. Pri pripravi betona s sušenim ali zračno suhim agregatom moramo upoštevati potrebo po dodatni vodi, pri mokrem agregatu pa je potrebno ugotoviti količino vode na površini agregatnih zrn. Za pripravo betona je idealen zasičen agregat s suho površino.

2.2.3 Voda

Je ena izmed glavnih sestavin pri izdelavi betona, saj ima direkten vpliv na mehanske in tehnološke lastnosti in posledično vpliva na kakovost končnega produkta. Samo s prisotnostjo vode je omogočen proces hidratacije cementa, katere produkt je strjevanje cementne paste in sproščanje hidratacijske toplote. Voda kot komponenta betona vpliva tudi na viskoznost in način vgradnje betonske mešanice. V primerih priprave cementnega betona je poleg pitne vode primerna tudi voda, ki ni označena za pitno vodo, vendar pod pogojem, da se jo predhodno analizira. Posledice uporabe neprimerne vode, ki vsebuje organske nečistoče, se lahko pokažejo v slabi oprijemljivosti agregata in cementne mase, času vezave agregata s cementno maso ter koroziji armature v armiranih betonskih konstrukcijah. Te nepravilnosti se na koncu pokažejo v zmanjšanju trdnosti betona [3].

Po standardu SIST EN 1008 je voda razvrščena glede na izvor v naslednje skupine:

- pitno vodo: je primerna za uporabo in je ni potrebno preizkušati,
- vodo, pridobljeno iz procesov v industriji betona: običajno je ta voda primerna za uporabo, mora pa ustrezati zahtevam iz standarda SIST EN 1008 - Dodatek A,
- podtalnico: lahko je primerna za uporabo, vendar mora biti prav tako preizkušena,
- naravno površinsko vodo in industrijsko odpadno vodo: lahko je primerna za uporabo, vendar mora biti preizkušena,
- morsko vodo ali manj slano vodo: lahko jo uporabljamo v cementnih kompozitih brez vgrajene armature, saj je sicer jeklo zaradi kloridov podvrženo pospešeni koroziji,
- komunalna voda, ki ni primerna za uporabo [11].

2.2.4 Dodatki

Dodatki so snovi, ki s svojimi fizikalnimi, kemijskimi ali s kombiniranim učinkom vplivajo na lastnosti cementnega betona tako v svežem kot tudi strjenem stanju. Dodatki se uporabljajo z namenom povečanja učinka cementa v zmesi betona in s tem povečanja ekonomičnosti priprave betonov. S pomočjo dodatkov v betonu dosežemo zahtevane lastnosti pri pripravi, transportu, vgradnji in uporabi cementnega betona.

Dodatke delimo na kemijske in mineralne.

2.2.5 Kemijski dodatki

Ta vrsta dodatkov se v današnjem času zelo pogosto uporablja. Njihova uporaba je običajno povezana z gradnjo v ekstremnih ali spremenljivih pogojih ter s hitrostjo gradnje, pa tudi s posebnimi zahtevami betona v svežem ali strjenem stanju. Zaradi teh dejavnikov mora mešanica betona doseči določene lastnosti sveže mešanice in posledično končnega produkta. Strjen beton mora imeti pogosto ustrezno obstojnost, relativno visoko tlačno trdnost, mora biti neprepusten za vodo itd. S pomočjo kemijskih dodatkov te lastnosti relativno enostavno dosežemo. Betonski mešanici jih dodajamo v manjših količinah, saj njihova količina naj ne bi preseгла 5 % mase cementa [12].

Z uporabo kemijskih dodatkov lahko dosežemo sledeče lastnosti:

- pospešitev ali podaljšanje časa vezave,
- izboljšanje stabilnosti betona med transportom ali vgradnjo,

- minimaliziranje segregacije betona,
- izboljšanje obdelovalnosti brez dodajanja vode,
- izboljšanje črpnosti,
- minimaliziranje krčenja [12].

Poznamo več vrst kemijskih dodatkov z različnimi učinki na beton:

- pospeševalci vezanja: dodatki za hitrejšo hidratacijo in posledično hitrejšo vezanje betona.
- Zavlačevalci vezanja: dodatki, ki upočasnijo hidratacijo in posledično vezanje betona.
- plastifikatorji: dodatki, ki zmanjšujejo količino vode pri enakem vodocementnem (v/c) razmerju, na ta način izboljšajo končno trdnost mešanice, pri svežih mešanicah pa delujejo kot zavlačevalci ter tako povečajo obdelovalnost.
- aeranti: dodatki za uvajanje mikroskopsko majhnih zračnih mehurčkov, ki vplivajo na povečanje odpornosti proti zmrzovanju, povečajo obdelovalnost betona, zmanjšajo kemijsko korozijo mešanice ter povečajo odpornost mešanice proti segregaciji.
- gostilci: dodatki za povečanje vodoneprepustnosti mešanice.
- antifrizi: dodatki s katerimi znižamo ledišče vode, ter posledično omogočimo betoniranje pri nižjih temperaturah.
- pigmenti: dodatki za obarvanje betona [12].

Poleg naštetih obstaja še kar nekaj različnih vrst kemijskih dodatkov, s katerimi optimiziramo mešanico glede na zahteve končne uporabe [12].

Pri pripravi CEM malt smo uporabili tri vrste kemijskih dodatkov:

- superplastifiktor,
- aerant,
- stabilizator.

2.2.5.1 Superplastifikator

Skupina dodatkov, imenovanih plastifikatorji, so najpomembnejša skupina kemijskih dodatkov za beton, saj se v različnih kombinacijah z ostalimi kemijskimi dodatki ali mineralnimi dodatki uporabljajo skozi celo leto [13, 39].

Glavna funkcija teh dodatkov je zmanjšanje potrebe po vodi za zahtevano obdelavnost, tako da ohranjajo ali povečajo obdelavnost brez povečanja vodocementnega razmerja. Ta vrsta dodatka je skladna s SIST EN 934-2, ki zajema snovi, ki se jih dodaja betonu med mešanjem v količinah, manjših od 5 % glede na maso cementa [14, 39].

Z masovno uporabo betona so prišli na trg tudi prvi plastifikatorji, in sicer v ZDA okoli leta 1930. Z večanjem uporabe betona in zahtevnosti gradenj so se povečale tudi zahteve po kakovosti in ekonomičnosti gradnje skozi celo leto. Tem trendom je sledil tudi razvoj novih generacij plastifikatorjev. Okoli leta 1970 je nastala nova generacija, imenovana

superplastifikatorji, po letu 1990 pa so na trg prišli še superplastifikatorji nove generacije (hiperplastifikatorji), ki se razvijajo in izboljšujejo še danes [14].

V okviru diplomske naloge smo uporabili visoko učinkovit superplastifikator nove generacije (hiperplastifikator). Uporablja se ga za izdelavo gradbiščnih in transportnih betonov ter predizdelanih betonov. Ta vrsta superplastifikatorja je še posebej primerna za izdelavo samozgoščevalnih betonov [13].

Izbran superplastifikator dodajamo betonski mešanici v količini od 0,2 do 1,5 odstotka glede na maso veziva. Končni odstotek je odvisen od vodocementnega razmerja, želenih lastnosti betona, vrste in količine cementa [13].

Prednosti uporabe izbranega superplastifikatorja so:

- visoke zgodnje in končne trdnosti,
- betoniranje pri visokih temperaturah,
- večja trajnost betona,
- daljši čas obdelavnosti betona,
- pri samozgoščevalnih betonih: prihranek energije, lažje vgrajevanje in črpanje betona [13,39].

2.2.5.2 Aerant

Glavna funkcija tega kemijskega dodatka je uvajanje majhnih mehurčkov zraka v svež beton. Ti mehurčki, ki nastanejo v svežem betonu, omogočajo sproščanje notranjih napetosti, ki nastanejo kot posledica večanja volumna pri zmrzovanju vode v strnjenem betonu. Hkrati mehurčki delujejo kot zaprte pore, ki zmanjšujejo prodiranje vode in škodljivih raztopin v beton, v nasprotju s kapilarnimi porami v navadnem betonu. S tem se poveča odpornost strjenega betona proti zmrzali in odjugi ter proti delovanju korozivnih raztopin. Uporablja se ga pri gradnji betonskih objektov, ki so izpostavljeni mrazu, soli ipd. Take vrste objektov so ceste, mostovi, jezovi, pločniki, strešniki [15].

V navodilih za doziranje izbranega aeranta se priporoča količina od 0,02 do 0,3 odstotka glede na maso cementa. Z večanjem količine dodatka se povečuje tudi količina mikro mehurčkov v svežem betonu. Za določitev optimalne količine aeranta se opravi obvezen predhodni preizkus [15].

Prednosti uporabe izbranega aeranta:

- izboljšuje trajnost strjenega betona,
- povečuje odpornost strjenega betona na zmrzovanje in odtajanje,
- povečuje odpornost strjenega betona proti koroziji [15].

2.2.5.3 Stabilizator

Gostilci so kemijski dodatki, ki zmanjšujejo izločanje vode iz betona. Na ta način preprečujejo oziroma zmanjšujejo možnost nastanka segregacije betona. V mešanicah delujejo kot stabilizatorji, so visoko alkalni in povečujejo viskoznost [16].

Izbran gostilec uporabljamo za:

- betone z velikimi posedi in razlezi,
- samozgoščevalne betone z velikimi razlezi s posedi,
- kohezivne betone,
- betone, kjer se preprečuje izpiranje,
- betone z visoko vsebnostjo vode [16].

Po izgledu je stabilizator tekočina mlečne barve z zelo značilnim vonjem, gostote 1000 kg/m³. Dodajamo ga zamesni vodi ali že pripravljeni mešanici v količinah od 0,02 do 0,2 % glede na maso cementa (do 0,2 kg na 100 kg cementa). Seveda lahko doziranje spreminjamo glede na želje in namen uporabe betona. V posebnih primerih lahko dozo gostilca povečamo, je pa potrebno ugotoviti morebitne negativne vplive na končni produkt. Pri pripravi mešanic lahko stabilizator (gostilec) uporabljamo tudi v kombinaciji z aerantom [16].

2.2.6 Mineralni dodatki

Mineralne dodatke najdemo med naravnimi materiali ali industrijskim odpadnim materialom. Uporabljata se praviloma dve vrsti mineralnih dodatkov, in sicer nepucolanski ter pucolanski in hidravlični dodatki. Pucolanski dodatki so vulkanskega izvora in se uporabljajo za izboljšanje kohezivnosti in s tem odpornosti na segregacijo v svežem betonu. Delujejo lahko tudi kot polnilo oziroma nadomestilo za cement ter tako zmanjšajo količino cementa v betonu, kar posledično spremeni lastnosti betona ter direktno vpliva na zmanjšanje hidratacijske toplote, zmanjšanje krčenja betona, zgostitev betona. Mineralni dodatki imajo različen vpliv na strnjen in na svež beton [17].

V praksi se uporablja več mineralnih dodatkov, med vsemi pa so najbolj uporabljeni apnenčeva moka, ki je nepucolanski dodatek ter mikosilika in elektrofitrski pepel, ki sta pucolanska dodatka. Ostali primeri mineralnih dodatkov so: mleta granulirana plavžna žlindra, naravni pucolani (na primer tuf) žgani skrilavec, itd[17].

V primeru strnjenega betona se delovanje mineralnih dodatkov običajno kaže tako, da:

- znižujejo zgodnjo in povečujejo končno trdnost betona,
- znižujejo hidratacijsko toploto betona,
- upočasnjujejo korozijo armature,
- izboljšujejo vezavo med armaturo in betonom,
- zmanjšajo prepustnost betona,
- zmanjšajo cvetenje betona [17].

V primeru svežega betona pa mineralni dodatki:

- povečajo in izboljšajo obdelavnost betona,
- zmanjšujejo izcejanje vode,
- izboljšajo črpnost betona,
- podaljšajo čas do začetka vezanja [17].

V diplomski nalogi smo uporabili 3 vrste mineralnih dodatkov:

- mleto granulirano plavžno žindro,
- mikrosiliko in
- tuf.

2.2.6.1 Žindra

Mleta granulirana plavžna žindra ima hidravlične lastnost, ki se aktivirajo zgolj ob primerni aktivaciji, kar je v tem primeru z dodajanjem alkalij, ki jih vsebuje cement. Prve uporabe žindre izhajajo iz leta 1774, ko so jo uporabili skupaj z gašenim apnom, katerega je kasneje nadomestil cement. Leta 1982 pa je v Nemčiji nastala prva uradna proizvodnja mlete granulirane plavžne žindre [18].

Plavžna žindra je nekovinski material steklaste oblike. Nastane kot stranski produkt med pridobivanjem surovega železa iz železove rude, pri čemer se ruda segreje na 1500 °C. Med taljenjem železove rude se tvori staljena žindra, ki je sestavljena v večini iz kalcija, silicija, aluminija, magnezija in kisika (preglednica 6). Žindro se naknadno v najkrajšem času ohladi, tako da se ohrani sposobnost hidratacije. V tem trenutku je žindra v obliki zrn, manjših od 4,75 mm, in se minimalno kristalizira. Na koncu se jo še zmelje v prah, pri čemer so zrna manjša od 45 µm in imajo specifično površino med 4000 in 6000 cm²/g po Blainu [17, 18].

Preglednica 6: Kemijska sestava žindre [20]

| Kemijska spojina | Masni delež spojine [%] |
|---------------------------------------|-------------------------|
| CaO | 36–44 |
| SiO ₂ | 29–38 |
| Al ₂ O ₃ | 10–18 |
| MgO | 4–12 |
| SO ₃ | 1–2,5 |
| Fe ₂ O ₃ | 0,2–2 |
| Na ₂ O in K ₂ O | 1–2 |

Z dodajanjem žindre lahko nadomestimo do 70 % mase cementa. Vsega cementa se ne sme nadomestiti, saj žindra potrebuje zadostno količino alkalij, ki so v cementu in so nujno potrebne za aktivacijo hidravličnih lastnosti žindre. Žindra skupaj z vodo in cementom pridobi cementne lastnosti [20].

Prednosti uporabe žindre so:

- zmanjša potrebo po vodi ob zahtevani konsistenci,
- poveča obdelovalnost svežega betona,
- poveča črpnost svežega betona,
- pospeši čas vezanja betona,
- poveča vodoneprepustnost,
- poveča odpornost na kloride in sulfate,
- poveča korozijsko odpornost cementnega kamna [21].

2.2.6.2 Mikrosilika

Mikrosilika nastaja v proizvodnji silicijevih in ferosilicijevih zlitin v elektropečeh pri redukciji zelo čistega kremena s premogom in sestoji iz zelo drobnih kroglastih delcev, ki vsebujejo najmanj 85 % mase amorfnega silicijevega dioksida. [5].

Mikrosilika je mineralni dodatek v obliki prahu ali vodne emulzije. Zrna mikrosilike so manjša od 1 mikrometra. Ima tudi lastnost visoke specifične površine, ki je približno 20 m²/g po Blainu. S temi lastnostmi je mikrosilika odličen stabilizator, saj imajo majhni delci mikrosilike v primerjavi s 100-krat večjimi delci cementa večjo specifično površino in posledično nase vežejo več vode. Zaradi teh lastnosti je mikrosilika primerna za izdelavo visokokvalitetnih malt in betonov [22].

Običajna količina doziranja je od 5 do 10 odstotkov glede na maso cementa. V principu deluje v procesu vezanja cementa in vode tako, da reagira s kalcijevim hidroksidom, ki se nato ne izloča in ne reagira s solmi in posledično skupaj ne tvorita korozijskih produktov. Pri pripravi svežega betona moramo biti pozorni, saj mikrosilika, zaradi njene velike specifične površine, lahko močno poveča količino vode in s tem vodocementno razmerje za pripravo betona. Zato se mikrosiliko vedno uporablja skupaj s plastifikatorjem [22].

Mikrosilika pozitivno vpliva na svež in strnjen beton. Prednosti uporabe tovrstnega dodatka so:

- povečanje korozijske odpornosti,
- povečanje vodonepropustnosti,
- zmanjšanje možnosti nastanka segregacije,
- zmanjšanje kapilarne vpojnosti in
- zvišanje trdnosti betona [9].

2.2.6.3 Tuf

Tuf je v osnovi konsolidiran vulkanski prah, uvrščamo ga med piroklastične sedimentne kamnine. Je naravni pucolan. V zmesi z vodo se sam ne strjuje, zmljet ob prisotnosti cementa pa reagira s kalcijevim hidroksidom (Ca(OH)₂). Pri tem nastaja C-S-H gel, ki prispeva k trdnosti cementnega veziva [17,23].

Tuf je mineralni dodatek, ki ga lahko dodamo betonu ali cementu. Značilna posebnost tufa je velika potreba po vodi, kar ima za posledico višje V/C-razmerje in manjšo trdnost betona. Zmanjšuje sproščanje hidratacijske toplote, zmanjšuje prepustnost površine, povečuje odpornost na sulfate in zmanjšuje alkalno-silikatno reakcijo. Čas vezanja lahko tuf skrajša ali podaljša, kar je odvisno od vrste tufa [17, 23].

Delež tufa, ki zamenjuje cementni klinker, je lahko do 35 %, ravno zaradi vpliva na končno trdnost betona. V primerih, ko ni potrebe po visoki trdnosti ali ko gradimo bolj ekonomično, lahko delež tufa dosega tudi 50 % ali več. Primer so pucolanski cementi.

V splošnem pa v gradbeništvu uporabljamo tuf pri predhodno pripravljenih suhih maltah, pri izdelavi raznih betonskih izdelkov (betonska galanterija), pri sanacijskih materialih, pri izdelavi vodo neprepustnih in fugirnih mas, ipd [17, 23].

3 REOLOGIJA

3.1 Uvod v reologijo

V grščini besedo reologija sestavljata dve besedi, tečenje in znanost. Reologija je torej veda, ki preučuje deformiranje in tečenje snovi, ki so lahko elastične ali tekoče. Pri reologiji govorimo o povezavi med silo, deformacijo in časom. Današnje betonske mešanice že zelo redko ali skoraj nikoli več ne pripravljamo brez dodatkov. Za mnoge sestave, ki vsebujejo mineralne in/ali kemijske dodatke v večjih količinah, metoda s posedom stožca ni sposobna ovrednotiti obdelavnosti svežega betona. Dve različni sestavi betona imata lahko enak posed, vendar zelo različne lastnosti pri vgrajevanju in zgoščanju svežega betona. Zato je nujno reološke lastnosti mešanice preveriti še kako drugače [9].

Meritve reoloških lastnosti betona izvajamo zato, ker rezultati preiskav omogočajo:

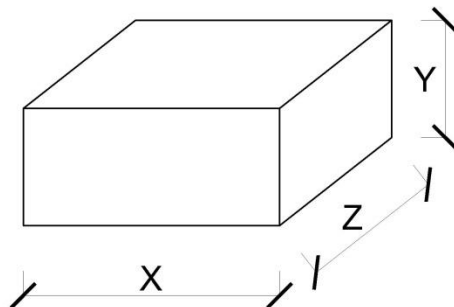
- razumevanje interakcije med sestavinami; pristop omogoča vpogled v strukturo materiala. Obstaja povezava med velikostjo delcev, obliko delcev in viskoznostjo betona.
- kontrolo kakovosti surovin, procesov, končnih produktov. Lahko merimo vzorec in interakcije med posameznimi sestavinami.
- načrtovanje in dimenzioniranje procesne opreme, ki jo uporabljamo v procesu vgradnje betonov.
- vrednotenje vpliva novih produktov in ugotavljanje ustreznosti le teh [24].

Reološke lastnosti različnih snovi merimo z reometri ali viskometri.

3.2 Viskometrija

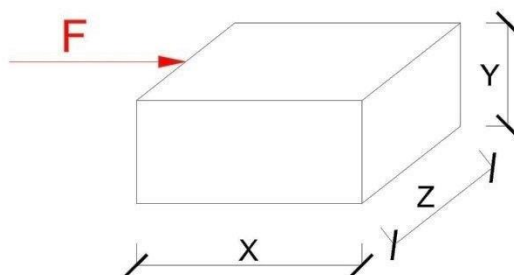
Viskometrijo poznamo kot podskupino reologije. Povezuje napetost in hitrost deformiranja, kar pravilno definiramo kot upor tekočine proti deformaciji. Snov, ki ima večji upor, je bolj viskozna [24].

Osnovni koncept lahko definiramo s tridimenzionalnim modelom (slika 6) [24].



Slika 6: Tridimenzionalno telo (x, y, z)

Telo ima mere, označene s črkami X, Y in Z. Zgornja ploskev ima površino $A = X \cdot Z$. Na zgornjo ploskev telesa delujemo s silo F (slika 7) v smeri ploskve, to je mere X [24].



Slika 7: Obremenjeno telo (x, y, z)

Strižna sila F povzroča strižno napetost $\tau = \frac{F}{A}$. Zaradi strižne napetosti se telo v času dt deformira za dx .



Slika 8: Obremenjeno telo in deformacija

Prikazano deformacijo (slika 8) opišemo s kotom (γ), spremembo deformacije v nekem časovnem obdobju pa imenujemo strižna hitrost [24].

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt}$$

Razmerje med strižno napetostjo in strižno hitrostjo je viskoznost:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$$

kjer (τ) predstavlja strižno napetost, ($\dot{\gamma}$) strižno hitrost, (η) pa viskoznost.

Najenostavnejša oblika funkcije viskoznosti je Newtonska ali dinamična viskoznost.

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta \Rightarrow \tau = \eta \cdot \dot{\gamma}$$

3.3 Strižne deformacije

Strižni tok lahko ustvarimo z naslednjimi primeri:

- tok med dvema vzporednima ploščama,
- krožni tok med vrtečima se cilindroma,
- tok skozi cevi,
- krožni tok med paralelnima ploščama [24].

TOK MED DVEMA VZPOREDNIMA PLOŠČAMA – Tak primer vidimo na sliki 7 in sliki 8 in predstavlja idealno geometrijo za merjenje lastnosti viskoznosti tekočih oblik ali suspenzij s teoretičnega vidika. Tak primer skoraj nikoli ne uporabljamo pri viskometriji, saj je zelo težko pridobiti natančno tehnično rešitev za merjenje [24].

KROŽNI TOK MED DVEMA VRTEČIMA CILINDROMA – Najpogosteje uporabljena rešitev v viskometriji, zahvaljujoč njenim možnostim pridobivanja natančnih podatkov. Veliko dejavnikov je potrebno upoštevati za preprečitev napake med merjenjem, kot na primer efekt vrha in dna ter spodrsavanje notranjega ali zunanjega cilindra, konstantna strižna hitrost ob katerikoli rotacijski hitrosti in geometrijska natančnost. Ko je razmerje med notranjim in zunanjim valjem približno 1, lahko uporabimo enačbe paralelnih plošč [24].

TOK SKOZI CEV – Niso primerni za nenevtonske tekočine, saj s tem modelom ne moremo določiti strižne napetosti na meji tečenja (yield value) [24].

KROŽNI TOK MED DVEMA PARALELNIMA PLOŠČAMA – Metodo uporabljamo za preučevanje elastoplastičnega obnašanja [24].

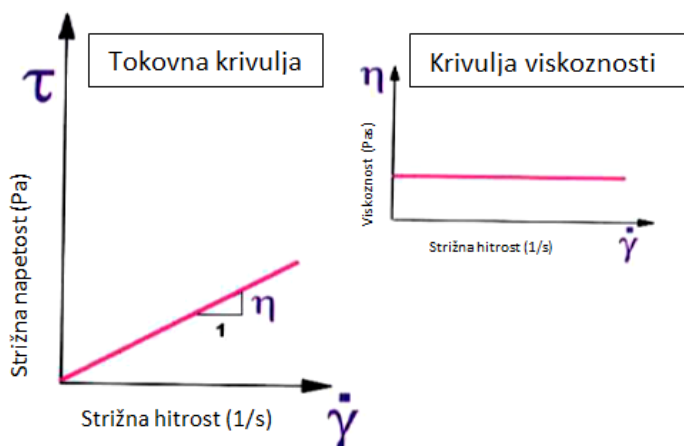
3.4 Klasifikacija tekočin

Tekočine v splošnem delimo v štiri glavne skupine glede na lastnosti tečenja.

- Newtonske tekočine,
- Nenevtonske tekočine, časovno neodvisne,
- Nenevtonske tekočine, časovno odvisne,
- Visokoelastične tekočine [24].

3.4.1 Newtonska tekočina

Zanje je značilno, da viskoznost ostaja konstantna za vse strižne hitrosti. Predstavniki Newtonske tekočine so voda, olje, nafta [24].



Slika 9: Obnašanje toka Newtonskih tekočin [24]

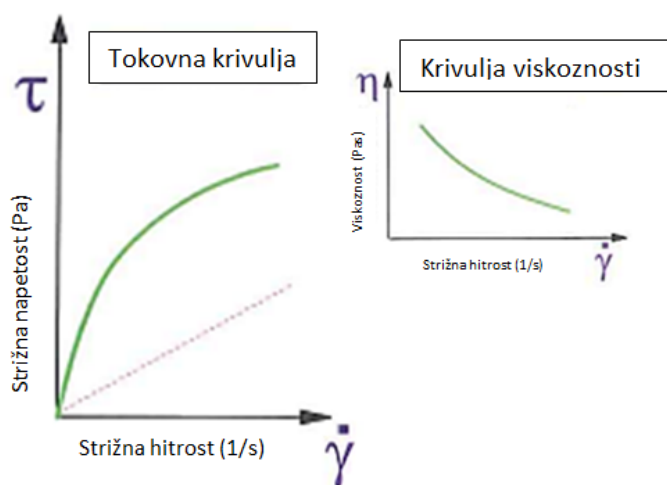
Prvi graf na sliki 9 prikazuje razmerje strižne napetosti in strižne hitrosti, kjer lahko ugotovimo linearni potek diagrama, drugi diagram pa prikazuje še krivuljo viskoznosti, kar pa nam pokaže konstantno vrednost. Zanimiva značilnost Newtonskih tekočin je pojav toka tekočine, tudi, ko je napetost blizu ničle [24].

3.4.2 Nenevtonske tekočine, časovno neodvisne

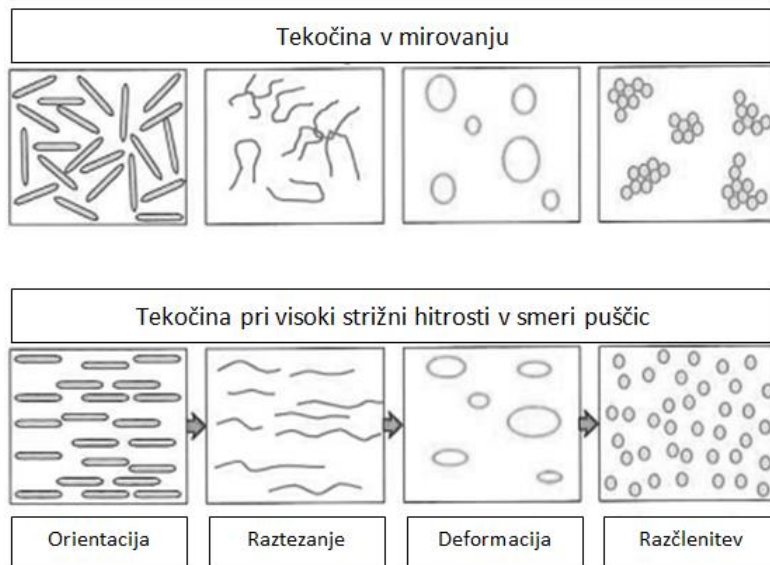
Za časovno neodvisne ne-newtonske tekočine je viskoznost odvisna od strižne hitrosti (slika 10). Dejstvo, da je viskoznost odvisna od strižne hitrosti, pomeni, da vzorec nima konstantne krivulje viskoznosti, saj se viskoznost spreminja s spremembo strižne hitrosti [24].

V segmentu ne-newtonskih, časovno neodvisnih tekočin ločimo tri podskupine:

- Shear thinning liquids (strižno redčenje)/pseudoplastične tekočine
Pseudoplastične tekočine so tekočine, ki se jim z večanjem strižne hitrosti viskoznost manjša. Primer so šamponi, barve [24].

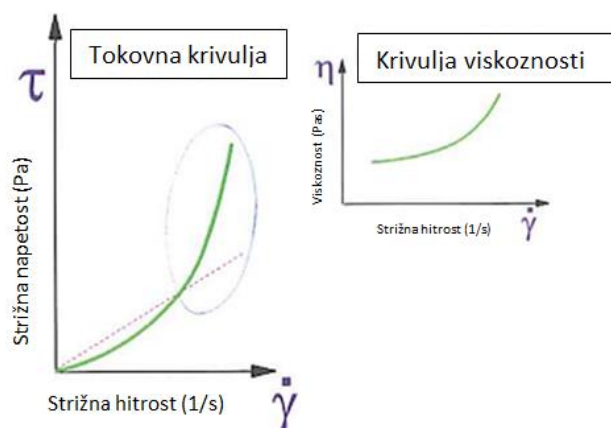


Slika 10: Obnašanje toka pseudoplastične tekočine [24]



Slika 11: Disperzija delcev pseudoplastične tekočine pri mirovanju in visoki strižni hitrosti [24]

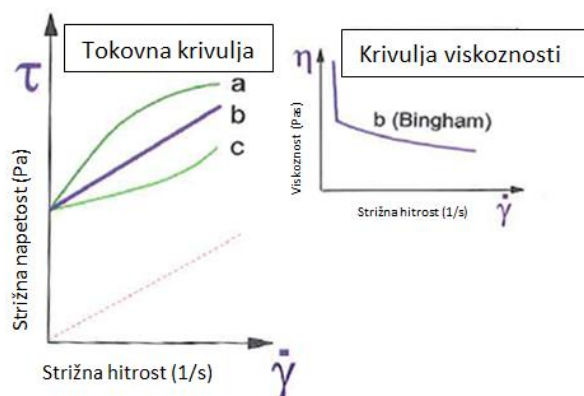
- Shear thickening liquids (strižno zgoščanje)/dilatantne tekočine
Dilatantne tekočine so tekočine, ki se jim z večanjem strižne hitrosti viskoznost veča. Primer bi bila tekočina iz krompirjevega škroba in vode [24].



Slika 12: Obnašanje toka dilatirane tekočine [24]

- Materials with yield value/materiali z neko napetostjo na meji tečenja, ki se lahko med tečenjem obnašajo kot newtonska, pseudoplastična ali dilatantna tekočina. Take tekočine ne tečejo same od sebe, ampak mora strižna napetost preseči napetost na meji tečenja. Te tekočine pogosto imenujemo visokoplastične, primer so zobne paste, kečap, majoneza [24].

V to podskupino uvrščamo betone oziroma cementne kompozite v svežem stanju. Na samem začetku opazimo strižno napetost na meji tečenja, med tečenjem pa se kompozit obnaša kot newtonska tekočina (varianta b na sliki 13). Model, ki opisuje tovrstno obnašanje svežega betona ali malte je Binghamov model, ki opisuje tekočine z napetostjo na meji tečenja in newtonskim obnašanjem tekočine med tečenjem. Reološko obnašanje večine betonov lahko opišemo z Binghamovim modelom [24].



Slika 13: Obnašanje toka materialov s strižno napetostjo na meji tečenja [24]

Na sliki 13 prikazujemo tri krivulje z neko napetostjo na meji tečenja (oznaka τ_0), in sicer a) pseudoplastična tekočina, b) Binghamova tekočina, c) dilatirana tekočina.

3.5 Binghamov model tekočine

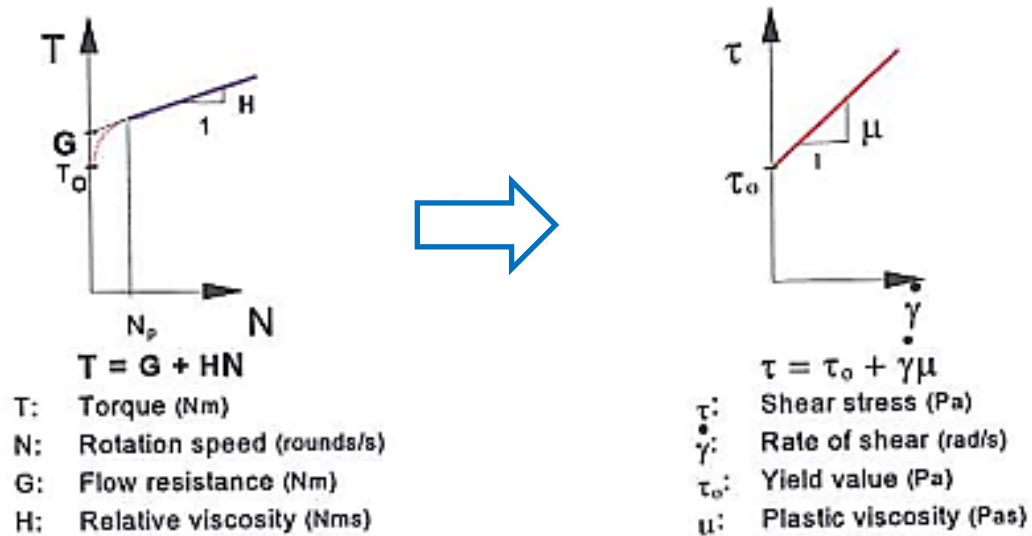
Newtonska tekočina je najbolj preprost model obnašanja tekočine, namenjen idealnim tekočinam, kot so olje, nafta, voda. Velja, da imamo med strižno napetostjo (τ) in strižno hitrostjo ($\dot{\gamma}$) linearno odvisnost. Pri Newtonski tekočini se pojavi tok že pri napetosti zelo blizu ničle. Za ostale tekočine je potrebno uporabiti druge modele tekočin, saj veliko tekočin potrebuje neko napetost, da lahko stečejo. Ta napetost se imenuje napetost na meji tečenja. V primeru betona vidimo in ocenimo, da ni Newtonska tekočina, saj ne steče sam tako kot voda. Če vzporedno mešamo beton in vodo, ugotovimo, da beton zahteva veliko večji napor pri mešanju, vodo pa premešamo brez naprezanja. Torej, da začne beton teči potrebuje napetost na meji tečenja (τ_0) in najbolj preprost model za opis takšnih tekočin, kot je beton je Binghamov model tekočine. Ohranja linearno odvisnost med strižno napetostjo in strižno hitrostjo in vključuje napetost na meji tečenja [24].

$$\tau = \tau_0 + \mu \dot{\gamma}$$

Pri modelu Binghamovske tekočine imamo namesto viskoznosti (η) plastično viskoznost (μ). Pri plastični viskoznosti je potrebno upoštevati prirastek napetosti nad napetostjo na meji tečenja [24].

V enačbi imamo konstanti τ_0 in μ , ki ju ne moremo kar neposredno določiti (izmeriti), predstavljata pa obnašanje materiala. Konstanti lahko določimo z izračunom, iz parametrov, ki so merljivi. Reološka preiskava z reometrom nam podaja rezultate, največkrat zapisane v obliki [24]:

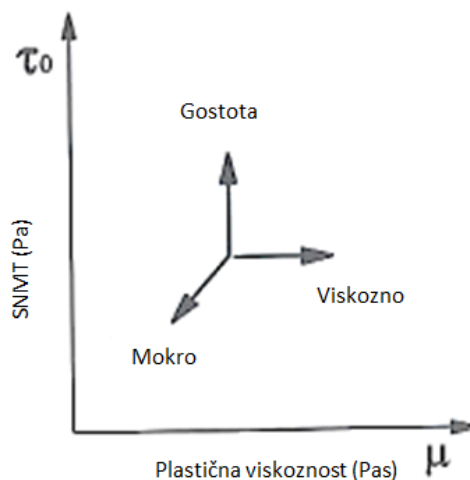
$$T = G + H * N$$

Slika 14: Relacija med navorom T (uporom proti striženju) in strižno napetostjo τ [24]

Oznake:

- T ... navor – upor proti striženju
- τ ... strižna napetost
- N ... hitrost vrtenja
- $\dot{\gamma}$... strižna hitrost
- G ... navor na meji tečenja
- τ_0 ... strižna napetost na meji tečenja
- H ... koeficient viskoznosti
- μ ... plastična viskoznost

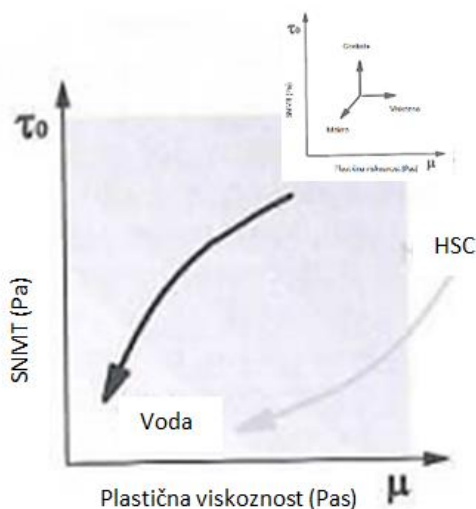
4 VPLIV POSAMEZNIH SESTAVIN BETONA NA REOLOGIJO



Slika 15: Reograf – diagram SNMT in plastične viskoznosti [24]

V praksi se uporablja poseben grafični prikaz, imenovan reograf. Na reografu predstavlja abscisna os plastično viskoznost, ordinatna os pa strižno napetost na meji tečenja. Vrednosti reografa predstavljajo točke vrednosti ali dvodimenzionalne površine imenovane okno reoloških lastnosti. Prikazani reograf (slika 15) nam prikazuje razmerje med SNMT in plastično viskoznostjo [24].

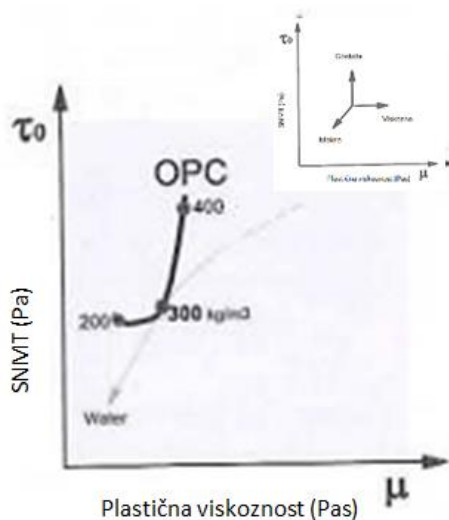
4.1 Vpliv vode na reološke lastnosti



Slika 16: Vpliv vode – reograf [24]

Iz reografa na sliki 16 jasno vidimo, da dodajanje vode pomeni premik k izhodišču koordinatnega sistema. Zmanjšata se SNMT in plastična viskoznost. To velja tudi za visokotrдне betone (kratica HSC za high strength concrete) [24]. Z dodajanjem vode redčimo celotno zmes, kar pomeni manjši delež trdnih delcev in posledično manjši odpor proti tečenju [25].

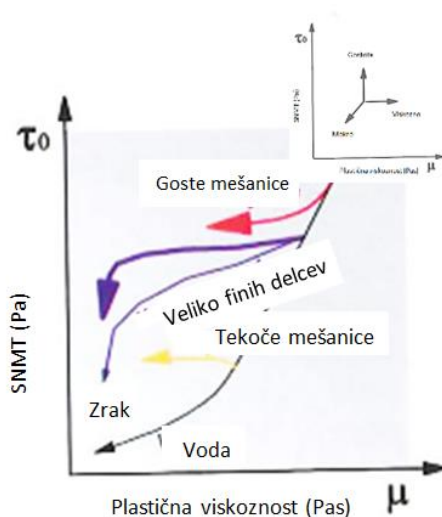
4.2 Vpliv cementa na reološke lastnosti



Slika 17: Vpliv cementa – reograf [24]

Če želimo zmanjšati vodocementno razmerje, imamo na voljo dve možnosti. Lahko zmanjšamo količino vode, kar drastično poveča viskoznost betona, lahko pa dodamo večjo količino cementa betonu. Slednje poveča viskoznost betona bolj zmerno. Kratica OPC na reografu na sliki 17 pomeni običajni Portlandski cement. Ugotovimo lahko (slika 17), da ima dodajanje vode večji vpliv na reološka parametra kot dodajanje cementa [24].

4.3 Vpliv aeranta na reološke lastnosti

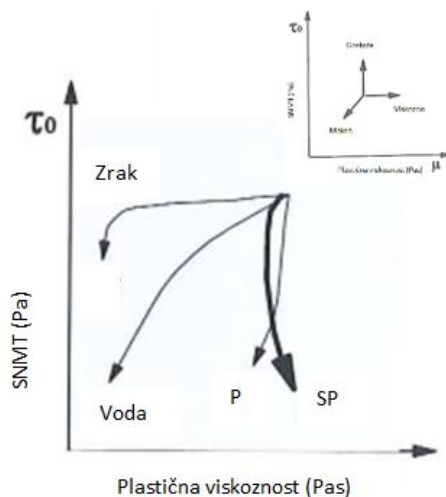


Slika 18: Vpliv aeranta – diagram SNMT in plastične viskoznosti [24]

Dodajanje aeranta svežemu betonu naj bi primarno zmanjšalo le plastično viskoznost, SNMT se lahko tudi nekoliko spremeni, vendar ne bistveno (slika 18). SNMT se bistveno spremeni pri večjih količinah aeranta. SNMT se lahko minimalno zmanjša pri gostih betonih in pri betonih, ki vsebujejo veliko finih delcev. Pri betonih, ki so zelo tekoči, pa se SNMT lahko tudi poveča, vendar so možne spremembe minimalne [24].

Z dodajanjem zračnih mehurčkov viskoznost hitro pada. Ko z doziranjem presežemo 5 %, pa se bistveno ne spreminja več [26].

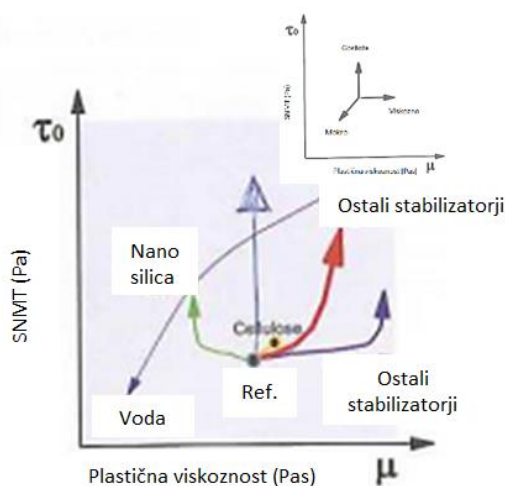
4.4 Vpliv plastifikatorja in superplastifikatorja na reološke lastnosti



Slika 19: Vpliv plastifikatorja in superplastifikatorja – reograf [24]

Dodajanje plastifikatorja (oznaka P) in superplastifikatorja (oznaka SP) naj bi vplivalo le na zmanjšanje SNMT, viskoznost pa naj se bistveno ne bi spreminjala. Ravno obraten učinek dosežemo v primeru, ko vzdržujemo obdelavnost, odvezujemo vodo in dodamo plastifikator. V tem primeru spreminjamo viskoznost [24].

4.5 Vpliv mikrosilike na reološke lastnosti



Slika 20: Vpliv mikrosilike – reograf [24]

Mikrosilika v betonu deluje kot stabilizator (na grafu »nano silica«) in lahko jo tudi okarakteriziramo kot stabilizator, zaradi njenega vpliva na sveži beton. Mikrosilika ima sposobnost zmanjšanja mobilnost vode v betonu, saj so delci mikrosilike veliko manjši od cementnih delcev, imajo večjo površino in zaradi tega večjo potrebo po vodi. Mikrosilike betonu ne dodajamo, ampak z njo zamenjujemo delež cementa. V primeru manjšega

doziranja, do 5 %, dosežemo predvsem učinek zmanjšanja plastične viskoznosti, pri večjih doziranjih pa vplivamo tudi na SNMT [26]. Mikrosilika v betonu tvori gel, ki deluje kot mazivo pri majhnih doziranjih, zato zmanjša viskoznost. Pri večjih doziranjih pa lahko pričakujemo povečanje SNMT in viskoznosti, saj je mikrosilika velik porabnik vode.

4.6 Vpliv žindre na reološke lastnosti

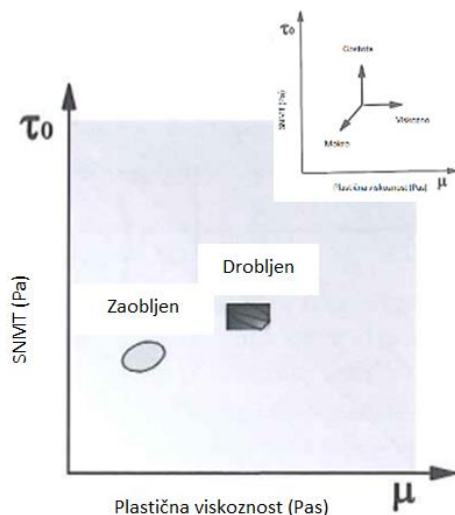
Žindra ima ugoden vpliv na obdelavnost betona. Dodajamo jo kot zamenjavo cementa v betonu. Njen učinek se povečuje z večjim doziranjem ob pogoju, da imamo količino vode konstantno. Pri doziranju do 20 % je njen učinek neugoden, pri večjem doziranju pa je njen učinek ugoden. Nadomeščamo lahko tudi do 70 % cementnega klinkerja [27].

4.7 Vpliv tufa na reološke lastnosti

Tuf, tako kot žindro, uporabimo kot zamenjavo za cementni klinker. Tuf vpije relativno velik delež vode, v splošnem se ga brez plastifikatorja redko uporablja. S povečevanjem deleža tufa povečujemo tako SNMT kot tudi viskoznost [28, 29].

4.8 Vpliv agregata na reološke lastnosti

Če se osredotočimo na obliko zrn agregata, lahko ugotovimo, da ima agregat z ostrimi robovi višje vrednosti SNMT in plastične viskoznosti, kot prodnat agregat.



Slika 21: Vpliv oblike zrn agregata – reograf [24]

Beton, ki ima večji delež agregata, bo imel višje vrednosti SNMT in viskoznosti. Če imamo v betonu veliko drobne frakcije, bo ta prav tako vplivala na povečanje SNMT, zmanjšala pa se bo plastična viskoznost. Če imamo v betonu manj drobne frakcije, pa dosežemo zmanjšanje SNMT in povečanje plastične viskoznosti. Več kot imamo drobne frakcije, večjo imamo specifično površino zrn, večja je površina prekrivanja s cementno pasto. Pri lomljenih agregatih je pomembna tudi oblika posameznega zrna. Če je zrno nepravilne oblike, dolžina bistveno večja od širine, bo to prav tako vplivalo na povečanje SNMT in na povečanje plastične viskoznosti [24, 30].

5 REOMETRI

Za merjenje reoloških parametrov uporabljamo naprave, ki se imenujejo reometri. Poznamo reometre in viskometre. Viskometer je namenjen merjenju viskoznosti, z njim merimo newtonske tekočine, za ostale tekočine pa uporabljamo reometer, ki je bolj splošna naprava. Z reometri določamo strižno napetost na meji tečenja in plastično viskoznost [31,32].

Poznamo tri vrste reometrov:

- koaksialni valjasti reometri,
- reometri z vzporednima ploščama,
- mešalni reometri z rotorjem [31, 32].

5.1 Koaksialni valjasti reometer

Koaksialni valjasti reometer deluje tako, da eden od valjev miruje, drugi rotira. Največkrat notranji valj miruje, zunanji pa se vrti. Primer takega reometra je reometer ConTec Viscometer 5, ki smo ga uporabljali pri meritvah.

Sestavljajo ga torej notranji in zunanji valj, računalniško krmiljen motor, ki vrti zunanji valj, merilna tehnika na notranjem valju pa preko računalniškega programa FRESHwin posreduje uporabniku rezultate meritev. Program omogoča shranjevanje, urejanje, izvoz podatkov v obliki tabel (Excel), kjer jih je moč enostavno obdelati [33].

Rezultate nam podaja v obliki enačbe $T = G + HS$.

Kjer predstavlja T – navor na stacionaren/notranji valj, G – sila, ki je potrebna za začetek vrtenja (navor na meji tečenje), H – koeficient viskoznosti in S – hitrost vrtenja zunanjega valja [33].



Slika 22: Reometer ConTec Viscometer 5 [33]

Predstavnik koaksialnega valjastega reometra sta tudi Cemagref IMG in Viscometer 3.

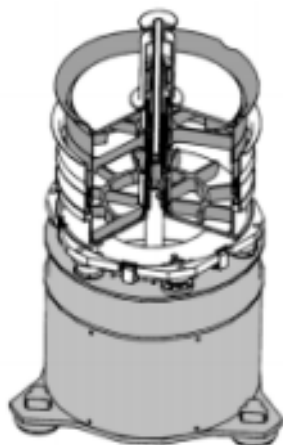


Slika 23 levo: Cemagref IMG [31]

Slika 24 desno: Viscometer 3 [31]

5.2 Reometri z vzporednima ploščama

V tem primeru reometer deluje tako, da rotira obe horizontalni plošči ali le eno. Material med ploščama striže. Primer je BTRHEOM reometer, ki vrti zgornjo ploščo in meri navor pri različnih hitrostih. Programska oprema pri tem reometru se imenuje ADRHEO [31].



Slika 25: BRTHEOM reometer [31]

5.3 Mešalni reometri z rotorjem

Ta vrsta reometra ima nameščene lopatice kar na rotorju. Lopatice so seveda različnih oblik, sam reometer pa je sila preprost za uporabo. Ko imamo mešanico pripravljeno, ga navpično postavimo v posodo in pričnemo z merjenjem. Zaradi enostavnega in priročnega sistema merjenja je primeren za meritve na terenu [31].

5.3.1 ICAR RHEOMETER

Primerov takega reometra je ICAR Rheometer. Vodilo pri izdelavi tega reometra je bila priročnost, delo na terenu, hitra in relativno natančna meritev ter cena aparata.

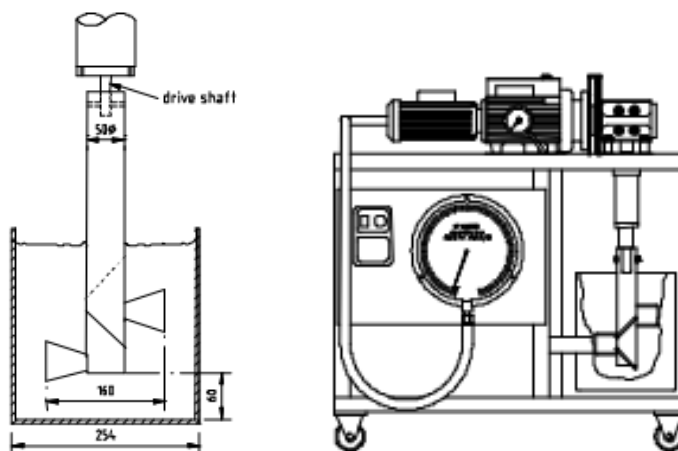
Na vodilu so nameščene štiri lopatice, ki so med seboj pravokotne. Lopatice potopimo v mešanico in pričnemo z meritvijo. Rotor rotira lopatice z različnimi hitrostmi in hkrati meri navor ki je potreben za vrtenje. Princip delovanja je podoben koaksialnemu valjastemu reometru. Meritve so predstavljene uporabniku na zelo podoben način, kot pri koaksialnem valjastem reometru. ICAR je podprt s programskim sistemom [34].



Slika 26: ICAR rheometer [34]

5.3.2 TWO – POINT RHEOMETER

Mešalo ima štiri rezila, ki so nagnjena in spiralno razvrščena po glavni osi. Velja za enega prvih, ki so uporabili sistem rotorja in merjenje po sistemu Binghamovega modela tekočine. Nadgrajeni sistem naprave ima lopatice v obliki črke H [32].



Slika 27 levo: TWO-POINT Rheometer detajl rezil in glavne osi [32]

Slika 28 desno: TWO-POINT Rheometer prikaz celotne naprave [32]

5.3.3 IBB RHEOMETER

Je avtomatiziran in nadgrajen two-point reometer. Uporaben je za široko paleto betonov: za običajne, SCC, z dodanimi vlakni. Uporablja enako mešalo v obliki črke H. Pomembno je, da je pri uporabi različnih posod možno izvajanje meritev na betonih in maltah.

Sama naprava meri le vrednosti navora na meji tečenja (G) in koeficient viskoznosti (H), oblika mešala pa lahko povzroči segregacijo [31].



Slika 28: IBB Rheometer [31]

Primeri mešalnega reometra z rotorjem sta še ConTec Rheometer -4SCC in Fresh concrete Rheometer BT2.



Slika 29 levo: ConTec Rheometer – 4SCC [31]
Slika 30 desno: Fresh Concrete Rheometer BT2 [31]

6 EKSPERIMENTALNI DEL

6.1 Uvod

Preiskave so potekale v Konstrukcijsko-prometnem laboratoriju UL FGG, v okviru Katedre za preskušanje materialov in konstrukcij. Cilj preiskav je bil, da se ugotovi vpliv kemijskih in mineralnih dodatkov na reološke lastnosti svežih cementnih malt. Sestavo mešanice za posamezno cementno malto smo določili po metodi CEM (ang. Concrete Equivalent Mortar). Gre za metodo, po kateri smo iz sestav mešanic za beton izračunali recepturo za malto. Meritve reoloških lastnosti svežih cementnih malt smo opravili s ConTec Viscometer 5. Preiskave smo opravili na 26 različnih vzorcih. Malte so vsebovale dva različna cementa, tri mineralne in tri kemijske dodatke.

6.2 Metoda CEM (Concrete Equivalent Mortar)

Metoda CEM (ang. Concrete Equivalent Mortar) je bila razvita z namenom, da bi zmanjšali količino vzorcev za preizkušanje in tako pospešili testiranja. S testiranjem določamo optimalne količine dodatkov v fazi projektiranja betonov. Malta služi kot nadomestek za beton in ima primerljive lastnosti. Cilj razvoja metode je bil primerljivost lastnosti CEM malte in betona. Preizkusi na CEM malti so hitri, metoda je uporabna pri različnih konsistencah in dobro povezuje reološke lastnosti malte in betona.

Osnova metode CEM je ohranjanje specifične površine agregata. Specifična površina agregatnih zrn v cementni malti je enaka specifični površini agregatnih zrn v betonu. Da ohranimo vodocementno razmerje spreminjamo količino vode. Z metodo CEM torej zmanjšamo maso in prostornino agregata v mešanicah [35].

Zahteve metode CEM so sledeče:

- cement: isti tip in količina, kot pri betonu
- mineralni dodatki: ista vrsta in količina, kot pri betonu
- vodocementno razmerje: enako, kot pri betonu
- kemijski dodatki: isti tip in količina, enaka metoda umešanja,
- agregat: enak,
- specifična površina: enaka kot pri betonu, dodajamo fino frakcijo v taki količini, da se ohrani specifična površina agregatnih zrn.

Za izračun mešanice cementne malte po metodi CEM potrebujemo specifične površine posameznih frakcij. Pri tem upoštevamo naslednje predpostavke:

- agregatna zrna so popolnoma okrogla,
- agregatna zrna so površinsko osušena,
- velikost zrna med dvema zaporednima sitoma je enaka povprečni velikosti odprtih teh sit.

Pri izračunu specifične površine potrebujemo podatke o zrnastosti sestavi in gostoti agregata. Posamezno frakcijo razdelimo na podfrakcije. Povprečen premer agregatnega zrna podfrakcije določimo kot povprečje med odprtinami sit, pod in nad podfrakcijo, njegovo obliko pa opišemo kot kroglo.

Specifično površino posamezne podfrakcije izračunamo z izrazom

$$S_{x/y} = \frac{A}{V\rho}$$

kjer je:

A ... površina povprečnega zrna podfrakcije,

V ... prostornina povprečnega zrna podfrakcije,

ρ ... gostota frakcije.

Nato je potrebno določiti, koliko posamezna podfrakcija agregata prispeva k skupni specifični površini frakcije (specifično površino podfrakcije množimo z deležem podfrakcije). Specifične površine podfrakcij glede na delež seštejemo in dobimo skupno specifično površino posamezne frakcije.

Pogoj metode CEM je, da ohranjamo specifično površino agregata. Z navedeno enačbo izračunamo količino fine frakcije.

$$m_{0/2_CEM} = m_{0/2} + \frac{m_{0/4}S_{0/4} + m_{4/8}S_{4/8} + m_{8/16}S_{8/16}}{S_{0/2}}$$

kjer je:

m_{ij} ... mase posamezne frakcije (v z vodo zasičenem površinsko suhem stanju) v malti ali betonu,

S_{ij} ... specifične površine posameznih frakcij. [35]

6.3 Uporabljeni materiali in sestave mešanic

6.3.1 Cement

Za naše preiskave smo uporabili dve vrsti cementa:

- CEM I 42,5R,
- CEM II/A-M (LL-S) 42,5R.

Prvi je bil cement **CEM I 42,5 R**. To je portlandski cement trdnostnega razreda 42,5. Črka R pomeni visoko zgodnjo trdnost. Njegova sestava je minimalno 95 % klinkerja ter sadra, ki deluje kot regulator vezanja. Cement je primeren za betone, ki zahtevajo visoke začetne in končne trdnosti, za izdelavo prefabrikatov in raznih betonskih elementov, za individualno gradnjo. Primeren je za uporabo pri temperaturi pod 10 stopinj Celzija in v agresivnih okoljih [5].

Drugi uporabljeni cement je bil cement **CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R**. To je portlandski cement, ki vsebuje dva mineralna dodatka. Vsebuje apnenec (LL) in žlindro (S). Trdnostni razred je 42,5 z visoko zgodnjo trdnostjo.

Vsebuje:

- najmanj 80 % cementnega klinkerja,
- največ 20 % mešanega dodatka (apnenec, žindra),
- največ 5 % polnil,
- sadro kot regulator vezanja.

Cement je primeren za zahtevnejšo gradnjo, kjer je potrebno zagotoviti visoke začetne in končne trdnosti, za zahtevne armirane, nearmirane in prednapete betone, za prefabrikate, za zmrzljivo odporne betone, za brizgane in samozgoščevalne betone. [31]

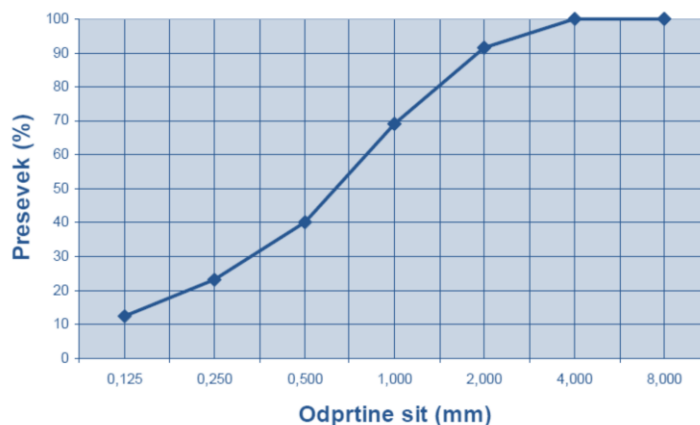
V preglednici 7 so predstavljene karakteristike uporabljenih cementov.

Preglednica 7: Karakteristike cementa [36,37]

| | CEM I 42,5 R | CEM II/A-M (LL-S) 42,5R |
|--------------------------|-------------------------|-------------------------|
| Uporabljena oznaka | CEM 1 | CEM 2 |
| Vsebnost sulfata | 2,99 % | 2,60 % |
| Vsebnost klorida | / | 0,05 % |
| Tlačna trdnost, 2 dni | 36,3 MPa | 29,0 MPa |
| Tlačna trdnost, 28 dni | 59,7 MPa | 57,0 MPa |
| Čas začetka vezanja | 150 min | 190 min |
| Prostorninska obstojnost | < 1 mm | < 1 mm |
| Standardna konsistenca | 29,00 % | 28,10 % |
| Specifična površina | 3760 cm ² /g | 4000 cm ² /g |
| Gostota | 3,08 g/cm ³ | 3,01 g/cm ³ |

6.3.2 Agregat

Za pripravo cementnih malt smo uporabili drobljen apnenčev agregat gostote 2700 kg/m³, frakcije 0/2 mm, v zračno suhem stanju. Na grafikonu 1 je prikazana sejalna krivulja agregata, uporabljenega v sestavi cementne malte.



Grafikon 1: Zrnastostna krivulja agregata 0/2

6.3.3 Voda

Uporabili smo pitno vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja. Gostota vode je 1000 kg/m^3 .

6.3.4 Kemijski dodatki

V sestavi cementne malte so bili uporabljeni naslednji kemijski dodatki, karakteristike uporabljenih dodatkov so podane v preglednici 8:

- superplastifikator,
- aerant,
- stabilizator.

6.3.4.1 Superplastifikator

Pri pripravi mešanic smo uporabili superplastifikator nove generacije, primeren za izdelavo gradbiščnih, transportnih, predizdelanih in samozgoščevalnih betonov.

Superplastifikator ima naslednje lastnosti:

- močno zmanjša vsebnost vode ob nespremenjeni obdelavnosti cementnega betona ali malte in s tem poveča končne trdnosti,
- ob nespremenjeni vsebnosti vode močno izboljša obdelavnost,
- zagotavlja počasnejši padec obdelavnosti s časom, za malte in betone, v primerjavi z običajnimi plastifikatorji.

Omenjeni superplastifikator se adsorbira na cementne delce, polimerne molekule obdajo cementne delce in preprečijo združevanje. Adsorpcija na cementne delce se izvede postopoma, kar povečuje čas obdelavnosti.

Doziranje izvajamo glede na maso cementa, in sicer od 0,2 do 1,5 %. Količina je odvisna od vrste cementa, vodocementnega razmerja in od zahtevane obdelavnosti.

Za transportne betone je priporočeno doziranje od 0,2–0,6 %, za samozgoščevalne betone pa od 0,4–0,8 %, glede na maso cementa [12, 32].

6.3.4.2 Aerant

V cementne mešanice smo dodali tudi aerant. Uporabljeni aerant je namenjen uvajanju zračnih mehurčkov v svežo mešanico zaradi večje odpornosti proti zmrzali, solem, korozivnim raztopinam. Aerant dodajamo mešanici razredčenega z vodo v količinah od 0,02 do 0,3 % glede na maso cementa. Za določanje optimalne količine pa so skoraj vedno potrebni predhodni preskusi.

6.3.4.3 Stabilizator

Stabilizator v mešanici deluje kot gostilec, saj zmanjšuje izločanje vode iz cementne mešanice in tako onemogoča pojav segregacije cementne mešanice. Primeren je za betone z velikimi posedi in razlezi s souporabo superplastifikatorja, uporablja se kot dodatek za samozgoščevalne betone z velikim razlezom in ob dodajanju hiperplastifikatorja, za bolj kohezivne betone, ki so namenjeni podvodnemu betoniranju, ter za betone, ki se vgrajujejo pri visokih temperaturah in imajo nizko vsebnost vode.

Doziramo ga podobno kot aerant, v zmesno vodo, lahko pa tudi v pripravljeno mešanico, vendar v tem primeru s podaljšanim časom mešanja. Dodajamo ga v količinah od 0,02 do 0,2 % glede na maso cementa.

Preglednica 8: Karakteristike kemijskih dodatkov in oznake [16]

| Kemijski dodatek | Oznaka | Značilnosti |
|----------------------|--------|---|
| Superplastifikator 1 | SP1 | tekoča oblika, polikarbosilat, gostota 1,06 kg/dm ³ |
| Aerant | AE | tekoč, raztopina modificiranih naravnih smol, gostota 1,01 kg/dm ³ |
| Stabilizator 1 | ST1 | tekoč, disperzija kopolimera na osnovi akrilata in karboksilnih kislin, gostota 1,01 kg/dm ³ |

6.3.5 Mineralni dodatki

V sestavi mešanice cementne malte so bili uporabljeni naslednji mineralni dodatki:

- mikrosilika,
- žindra (slika 31, levo),
- tuf (slika 31, desno).

6.3.5.1 Mikrosilika

Mikrosilika je uporabna za izdelavo visokokvalitetnih malt in betonov. Uporabljena mikrosilika ima razvito površino 21 m²/g in gostoto zrn 2,2 kg/dm³. Doziramo jo glede na maso cementa, in sicer od 5 % do 10 %. V cementni mešanici močno poveča potrebo po vodi, zato jo največkrat uporabljamo v kombinaciji s superplastifikatorji.

6.3.5.2 Tuf

Pri izdelavi mešanic smo uporabili tuf z gostoto 2410 kg/m³ in specifično površino 2910 cm²/g. Zanj je značilna velika potreba po vodi, kar pomeni, da je praktično uporaben le v kombinaciji s superplastifikatorjem. Doziranje v cementne mešanice je do 35 %, v primerih posebnih betonov lahko tudi do 50 %. V primeru naših mešanic smo s tufom zamenjali del cementa v malti in sicer 5, 10 in 20 %.

6.3.5.3 Mleta granulirana plavžna žindra

Uporabili smo mleto granulirano plavžno žindro gostote 2850 kg/m³ in specifične površine 2930 cm²/g. Kot dodatek ima žindra ugoden vpliv na obdelavnost cementnih mešanic. Z njo lahko nadomeščamo do 70 % cementnega klinkerja, v primeru naših mešanic pa smo nadomeščali 20, 40 in 60 % cementa CEM I.



Slika 31: Mleta granulirana plavžna žlindra (levo) in tuf (desno) [31]

6.4 Mešanje malt

Za mešanje smo uporabili opremo, ki je bila na voljo v Konstrukcijsko-prometnem laboratoriju UL FGG, in sicer mešalec Hobart A200. Mešalec, ki je last inštituta IGMAT, je prikazan na sliki 32. Zasnovan je tako, da meša okoli svoje osi in istočasno še okoli pogonske osi. Posoda je primerna za mešanice s prostornino do 20 litrov. Mešalec ima tri mešalne hitrosti.

Posodo mešalca je bilo potrebno navlažiti, prav tako mešalo mešalca. V posodo smo najprej dozirali cement in mešali pri najmanjši hitrosti, nato smo počasi dodali vodo ter dodatke. Vse skupaj smo mešali približno 30 sekund, za tem pa smo dodali agregat. Ko je bila mešanica premešana do te mere, da je mešalec vmešal ves agregat je bilo potrebno mešalec ustaviti ter očistiti stene posode ter nadaljevati mešanje tri minute pri najvišji hitrosti.



Slika 32: Mešalec HOBART A200, ki smo ga uporabljali v okviru preiskav [31]

6.4.1 Sestave mešanic

Za potrebe preizkusov je bilo sestavljenih več vrst malt, ki smo jih razdelili v skupine. Zaradi preglednosti so v Prilogi 1 podrobno prikazane sestave mešanic.

Preglednica 9: Sestava mešanic cementnih malt

| SESTAVINE | MEŠANICE MALT | | | | | | | | |
|-------------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | MR1 | MR1A | MR1B | MR1C | ML1 | ML1A | ML1B | ML1C | |
| CEM I 42,5 R (kg) | - | - | - | - | 5,60 | 5,60 | 5,60 | 5,60 | |
| CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (kg) | 5,60 | 5,60 | 5,60 | 5,60 | - | - | - | - | |
| Agregat (kg) | 13,032 | 13,024 | 13,017 | 13,010 | 13,024 | 13,017 | 13,032 | 13,009 | |
| Voda (kg) | 2,932 | 2,928 | 2,924 | 2,920 | 2,932 | 2,924 | 2,924 | 2,920 | |
| SP1 (g) | - | 5,60 | 11,20 | 16,80 | - | 5,60 | 11,20 | 16,80 | |
| | MRA1A | MRA1B | MRA1C | MG1A | MG1B | MG1C | MV1A | MV1B | MV1C |
| CEM I 42,5 R (kg) | - | - | - | 5,60 | 5,60 | 5,60 | 5,60 | 5,60 | 5,60 |
| CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (kg) | 5,60 | 5,60 | 5,60 | - | - | - | - | - | - |
| Agregat (kg) | 13,021 | 13,020 | 13,020 | 12,058 | 13,054 | 12,050 | 13,032 | 13,032 | 13,032 |
| Voda (kg) | 2,928 | 2,928 | 2,928 | 3,590 | 3,588 | 3,586 | 3,098 | 3,262 | 3,428 |
| SP1 (g) | 5,60 | 5,60 | 5,60 | - | - | - | - | - | - |
| AE (g) | 2,24 | 3,36 | 2,80 | - | - | - | - | - | - |
| ST1 (g) | - | - | - | 5,60 | 8,40 | 11,20 | - | - | - |
| | MZ1A | MZ1B | MZ1C | MM1A | MM1B | MM1C | MT1A | MT1B | MT1C |
| CEM I 42,5 R (kg) | 4,48 | 3,36 | 2,24 | 5,32 | 5,04 | 5,46 | 5,04 | 4,48 | 5,32 |
| CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R (kg) | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Agregat (kg) | 13,057 | 13,098 | 13,138 | 13,066 | 13,123 | 13,037 | 13,036 | 13,188 | 12,994 |
| Voda (kg) | 2,896 | 2,868 | 2,842 | 2,882 | 2,884 | 2,902 | 2,884 | 2,829 | 2,912 |
| SP1 (g) | 11,09 | 10,98 | 10,86 | 16,57 | 16,34 | 16,68 | 27,44 | 26,88 | 27,72 |
| TUF (g) | - | - | - | - | - | - | 448 | 896 | 224 |
| MIKRO SILIKA (g) | - | - | - | 203 | 406 | 102 | - | - | - |
| ŽLINDRA (g) | 1,064 | 2,128 | 3,192 | - | - | - | - | - | - |

Skupina mešanic MR1

Pri prvi skupini mešanic malt smo analizirali vpliv dodanega kemijskega dodatka - superplastifikatorja. Mešanica MR1 je predstavljala etalon (brez superplastifikatorja), v ostalih mešanicah pa smo dodajali superplastifikator v deležih od 0,1 do 0,3 % glede na maso cementa. V mešanicah smo uporabili cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R.

Skupina mešanic ML1

Druga skupina mešanic malt je imela podobno sestavo kot prva skupina. Razlika je bila le v tem, da smo uporabili drugačen cement, CEM I 42,5 R. Etalon je predstavljala mešanica ML1 (brez superplastifikatorja), v ostalih mešanicah pa smo zopet dodajali superplastifikator (0,1–0,3 %).

Skupina mešanic MRA1a

V tej skupini mešanic malt smo spreminjali vsebnost aeranta v sestavi. Mešanica MR1a je predstavljala etalon, v ostalih mešanicah pa smo povečevali delež aeranta, in sicer smo dodali 0,04, 0,05 in 0,06 % aeranta na maso cementa. Pri vseh mešanicah smo uporabili cement CEM I 42,5 R.

Skupina mešanic MG1a

V tej skupini mešanic smo namesto superplastifikatorja uporabili stabilizator, ki se ga je dodalo čisto na koncu postopka priprave mešanice. Mešanica ML1 je predstavljala etalon, pri čemer je bil $v/c = 0,52$. V ostalih mešanicah pa smo dodajali gostilo in sicer 0,10, 0,15 in 0,20 % glede na maso cementa. V mešanicah smo uporabili cement CEM I 42,5 R.

Skupina mešanice MV

V tej skupini mešanic smo analizirali vpliv vodocementnega razmerja. Mešanica ML1 predstavlja etalon pri $v/c = 0,52$. Pri naslednjih mešanicah smo povečevali v/c razmerje z dodajanjem vode. MV1A $v/c = 0,55$, MV1B $v/c = 0,58$, MV1C $v/c = 0,61$. Pri pripravi mešanic smo uporabili cement CEM I 42,5 R.

Skupina mešanic MZ1a

V tej skupini mešanic smo zamenjali delež cementa z žlindro. Mešanica ML1b je predstavljala etalon, v ostalih mešanicah pa smo 20, 40 in 60 % cementa zamenjali z žlindro. V mešanicah smo uporabili cement CEM I 42,5 R.

Skupina mešanic MM1a

V tej skupini mešanic smo zamenjali delež cementa z mikrosiliko. Mešanica ML1c je predstavljala etalon, v ostalih mešanicah pa smo 2,5, 5 in 10 % cementa zamenjali z mikrosiliko. V mešanicah smo uporabili cement CEM I 42,5 R.

Skupina mešanic MT1a

V tej skupini mešanic smo zamenjali delež cementa s tufom. Mešanica ML1 s superplastifikatorjem 5 % v sestavi je predstavljala etalon, pri čemer je bil $v/c = 0,505$, v ostalih mešanicah pa smo del cementa v deležu 5, 10 in 20 % zamenjali s tufom. V teh mešanicah smo uporabili cement CEM I 42,5 R.

6.5 Preiskave

6.5.1 Uvod

Glavni del eksperimentalnega dela diplomske naloge predstavljajo reološke preiskave svežih CEM malt. Namen preiskav je bil določiti in opisati vpliv kemijskih in mineralnih dodatkov na reološke lastnosti svežih CEM malt. Za meritve smo uporabili rotacijski reometer ConTec Viscometer 5 s prirejenim merilnim sistemom za izvajanje meritev na svežih cementnih maltah.

Da bi ocenili vpliv kemijskih in mineralnih dodatkov še na obdelavnost svežih CEM malt, smo sočasno s preiskavami na reometru izvajali tudi preiskave z razlezom na stresalni mizici po standardu SIST EN 1015-3.

Rezultati so predstavljeni v obliki grafikonov. Podrobni rezultati v obliki preglednic so predstavljeni v poglavjih Priloga A in Priloga B. Grafikoni opisujejo vpliv spremembe deleža izbranega materiala na reološke lastnosti malt v določenem času in prikazujejo vpliv izbranega materiala na obdelavnost oziroma razlez na stresalni mizici v določenem času.

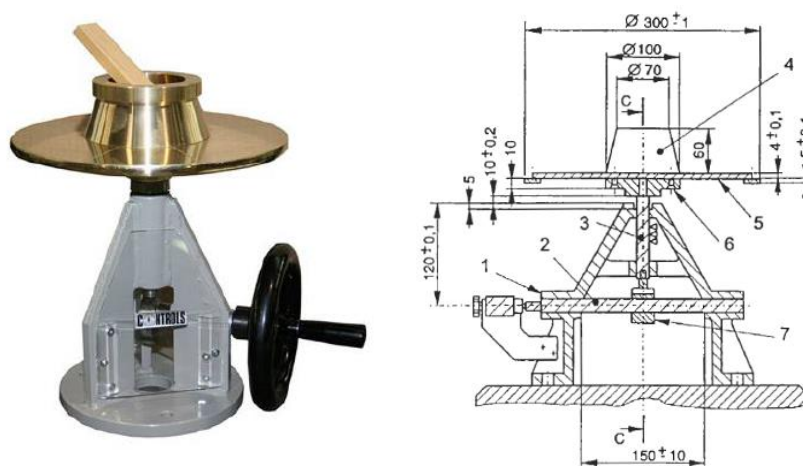
6.5.2 Razlez

Preizkušanje razleza malt je podrobno opisano v standardu EN 1015-3 [38]. Oprema za preizkušanje razleza je prikazana na sliki 33. Razlez izmerimo v dveh med seboj pravokotnih smereh v milimetrih, nato pa izračunamo povprečje [33, 34].

Za preskus razleza potrebujemo:

- kovinski prisekan konus, dimenzij $100 \pm 0,5$ mm spodaj in $70 \pm 0,5$ mm spodaj, višine $60 \pm 0,5$ mm, lijak mora biti odporen na agresivno delovanje cementa ter gladkih površin,
- nastavek za polnjenje prisekanega konusa,
- stresalna mizica, ki ima ploščo s premerom 300 mm,
- leseni nabijač,
- merilo,
- orodje za delo - zidarska žlica [7].

Pred pričetkom vgrajevanja cementne malte v prisekan konus je potrebno vse elemente, s katerimi preizkušamo, navlažiti. Pred vgrajevanjem cementno malto dobro premešamo in jo vgradimo v prisekan konus do polovice. Z lesenim nabijalom je potrebno vgrajeno plast malte nabiti z desetimi udarci. Nadaljujemo z vgradnjo malte do vrha prisekanega konusa in jo zopet nabijemo z desetimi udarci. Nastavek za vgrajevanje odstranimo, vključno z viškom cementne malte. Lijak dvignemo počasi in enakomerno ter izmerimo začetni razlez. Po meritvi prično stresati cementno malto s 15 padci v višini 10 milimetrov. Stresamo s konstantno hitrostjo približno en padec na sekundo. Razlez merimo v dveh med seboj pravokotnih smereh in upoštevamo povprečje [25, 26, 27, 34].



Slika 33: Oprema za preizkus z razlezom na stresalni mizici za malte

V Prilogi A so podrobno prikazani rezultati razleza za posamezno sestavo CEM malte ter pričakovane vrednosti, izračunane po CEM metodi.

6.5.3 Meritve z reometrom

Reološke lastnosti CEM malt smo merili s koaksialnim valjastim reometrom ConTec Viscometer 5.

Temelj delovanja reometra je predpostavka o Binghamovem modelu tekočine, čeprav naprava ne meri direktnih reoloških parametrov.

Uporabljeni reometer je sestavljen iz dveh cilindrov, zunanji cilinder se vrti, notranji cilinder pa je fiksni. Notranji cilinder je premera 170 mm in s pomočjo merilne tehnike meri navor, ki ga ustvarja vzorec malte. Zunanji cilinder je premera 200 mm ima narebreno notranjost posode, da preprečuje zdrs vzorca. Vrti se z različnimi hitrostmi, najprej z najvišjo, nato pa v osmih korakih zmanjšuje hitrost. Najvišja hitrost je 0,49 obrata na sekundo, najnižja pa 0,01 obrata na sekundo. Zadnja meritev in hkrati deveto izmerjeno vrednost izmeri pri hitrosti 0,33 obrata na sekundo.

Vse izmerjene vrednosti nam naprava prikazuje v programu FreshWin, kjer jih lahko pregledujemo, urejamo, shranimo. Podatke lahko izvozimo v program Microsoft Excel, kjer je obdelava podatkov zelo enostavna. Reometer rezultate podaja v obliki enačbe:

$$T = G + H * S$$

Oznake:

- T .. navor na notranji valj,
- G .. potrebna sila za začetek vrtenja,
- H .. koeficient viskoznosti,
- S .. hitrost vrtenja [28, 29].

V programu Excel je potrebo parametra G in H preračunati v τ_0 in μ .
To storimo s pomočjo enačb za preračun vrednosti G v τ_0 in H v μ ;

$$\tau_0 = G * \frac{\left(\frac{1}{R_N^2} - \frac{1}{R_Z^2}\right)}{\left(4 * \pi * h * \ln \frac{R_Z}{R_N}\right)}$$

$$\mu = H * \frac{\left(\frac{1}{R_N^2} - \frac{1}{R_Z^2}\right)}{8 * \pi^2 * h}$$

R_N ... polmer notranjega valja,

R_Z ... polmer zunanjega valja,

h ... višina malte na rebrih notranjega valja (80 mm).

Merjenje z reometrom pričnemo z vlaženjem vseh sestavnih delov v stiku s cementno mešanico. Ko mešanico pripravljamo, je potrebno reometru podati čas dodajanja vode v mešanico. Malto vlijemo v posodo, jo dobro premešamo in vstavimo v reometer. Reometer zapremo in pričnemo z meritvijo. Ko reometer konča s prvo meritvijo, vzorec ponovno dobro premešamo in pričnemo z drugo meritvijo. Potrebno je paziti, da se vzorec ne nabira na posodi. Na vsakem vzoru smo opravili tri meritve, nato smo mešanico vrnili v mešalec. Meritve oziroma cikel treh meritev smo opravili pri časih 0, 20, 40 in 60 minut po koncu mešanja malte.

Na sliki 34 je prikazan potek preizkusa z reometrom.



Slika 34: Potek preizkusa z reometrom

7 ANALIZA REZULTATOV

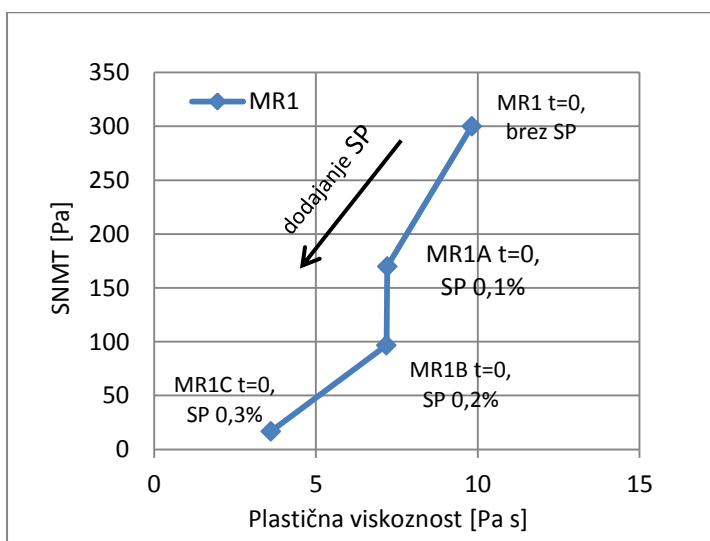
7.1 Vpliv kemijskih dodatkov

7.1.1 Vpliv vrste cementa in količine superplastifikatorja

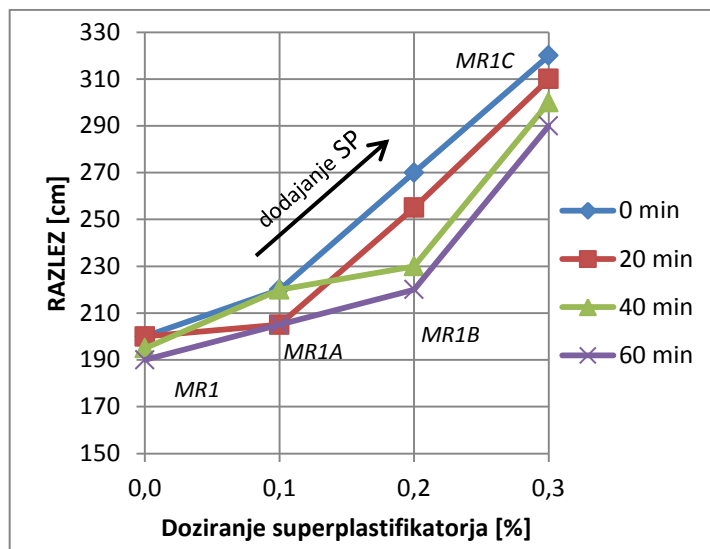
Analizo vpliva superplastifikatorja smo opravili na dveh skupinah maltnih mešanic, in sicer na skupini MR1 in skupini ML1. Sestava obeh maltnih mešanic je bila enaka, razlikujeta se le v vrsti cementa. V skupini MR1 smo uporabili cement CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R (CEM 2), v skupini ML1 pa cement CEM I 42,5 R (CEM 1).

Grafikona 2 in 3 prikazujeta, kako se lastnosti sveže CEM malte spreminjajo v odvisnosti od deleža superplastifikatorja. Iz obeh grafikonov se vidi, da se pri vseh mešanicah malt MR1 (CEM 2) in ML1 (CEM 1) z naraščanjem doze superplastifikatorja (SP) plastična viskoznost in strižna napetosti na meji tečenja (SNMT) manjšata, razlez pa se povečuje (malta pridobiva na obdelovalnosti). Pretekle raziskave o vplivu SP ugotavljajo, da ta vpliva predvsem na zmanjšanje SNMT, medtem ko na plastično viskoznost nima večjega vpliva. V našem primeru ima vpliv spreminjanja doziranja SP zelo podoben vpliv, kot pri spreminjanju količine vode. Prav tako opazimo, da so največje razlike razleza med mešanicami pri dozi superplastifikatorja 0,2 in 0,3 %. Pri mešanici MR1C (superplastifikator 0,3 %) je vidno enakomerno padanje razleza s časom, glede na začetno merjenje pri času $t = 0$ min, kar pri ML1C (superplastifikator 0,3 %) ne velja - pri tej sestavi je razlez enak pri časih 0 in 20 min ter pri časih 40 in 60 min.

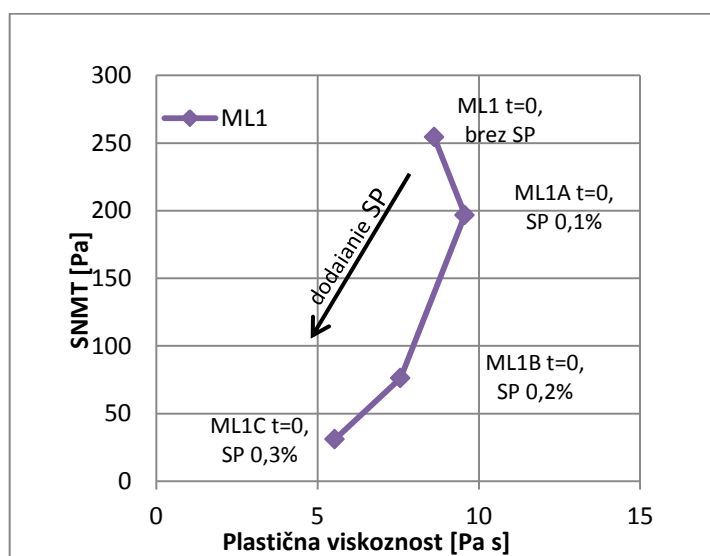
Opazimo tudi razliko v strižni napetosti na meji tečenja pri $t = 0$. Pri mešanici MR1, kjer smo uporabili cement CEM 2, je vrednost SNMT višja kot pri mešanici ML1, kjer smo uporabili CEM 1. Razliko lahko pojasnimo z razliko specifičnih površin cementa. CEM 1 ima specifično površino $3760 \text{ cm}^2/\text{g}$, CEM 2 pa ima specifično površino $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$. CEM 1 je bolj grobo mlet cement, kar pomeni nižjo vrednost SNMT. V primeru dodajanja superplastifikatorja pa lahko pričakujemo večji učinek pri CEM 2.



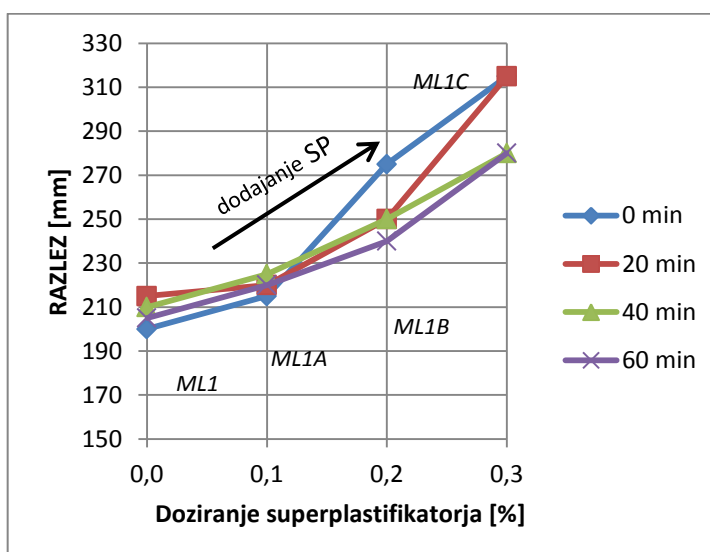
Grafikon 2: SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža superplastifikatorja za MR1 (CEM 2)



Grafikon 3: Vpliv količine superplastifikatorja na razlez v odvisnosti od časa za MR1 (CEM 2)

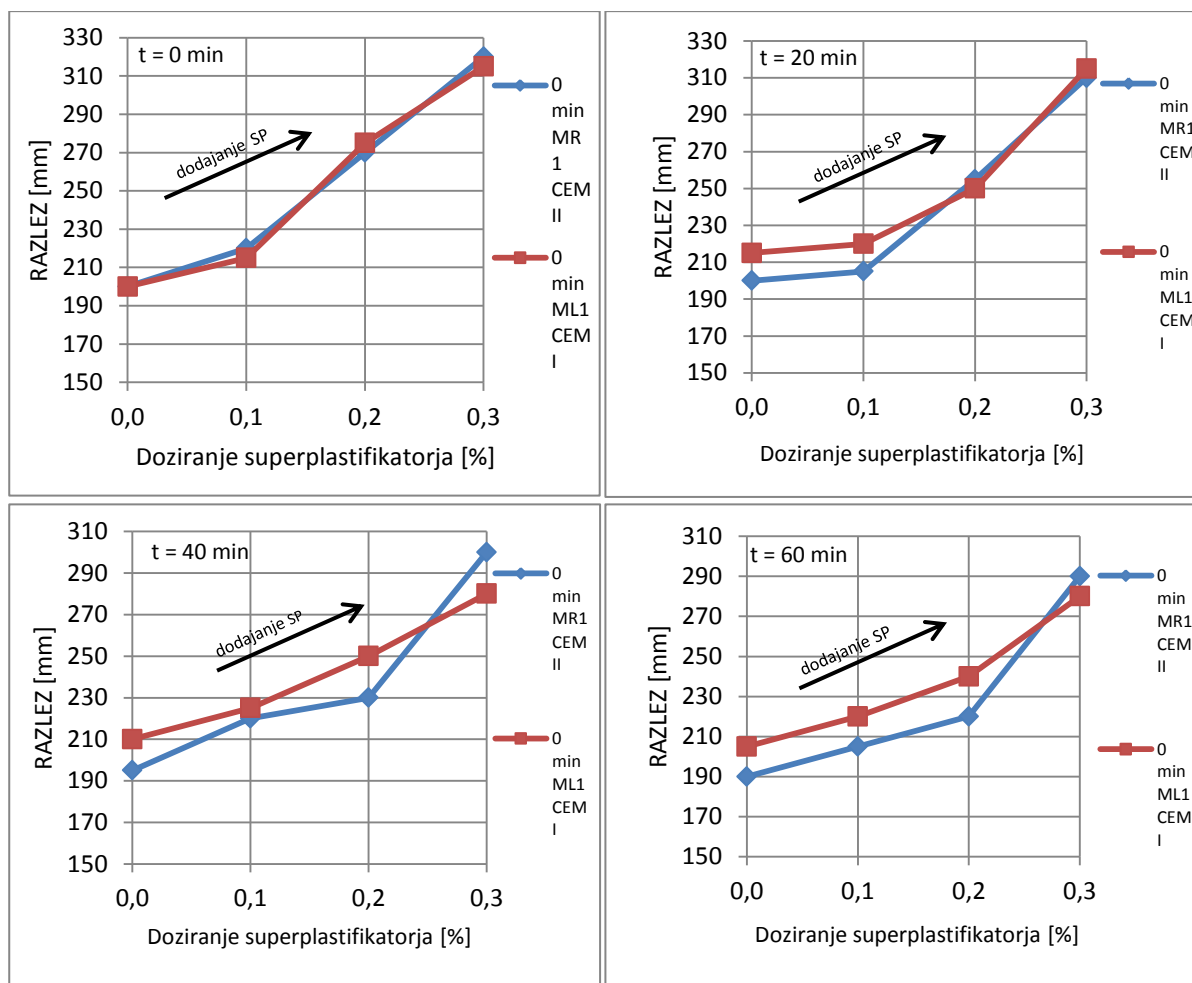


Grafikon 4: SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža superplastifikatorja za ML1 (CEM 1)



Grafikon 5: Vpliv količine superplastifikatorja na razlez v odvisnosti od časa za ML1 (CEM 1)

Pri meritvi razleza na začetku (v času $t = 0$ min) ni opazne razlike med mešanico s cementom CEM 1 in CEM 2. (glej grafikon 6). Po času $t = 60$ min pa z grafikona 9 lahko razberemo, da je imela mešanica malte ML1 s cementom CEM 1 (brez superplastifikatorja) boljšo obdelavnost kot v mešanici MR1 s CEM 2 (brez superplastifikatorja). Obnašanje je pričakovano, saj je bila specifična površina cementa CEM 1 manjša od specifične površine cementa CEM 2. Vidimo pa tudi, da ob povečevanju doze superplastifikatorja nad 0,25 % mešanica skupine MR1 s cementom CEM 2 izkazuje nekoliko boljšo obdelovalnost oz. večji razlez kot mešanica ML1 s cementom CEM 1.

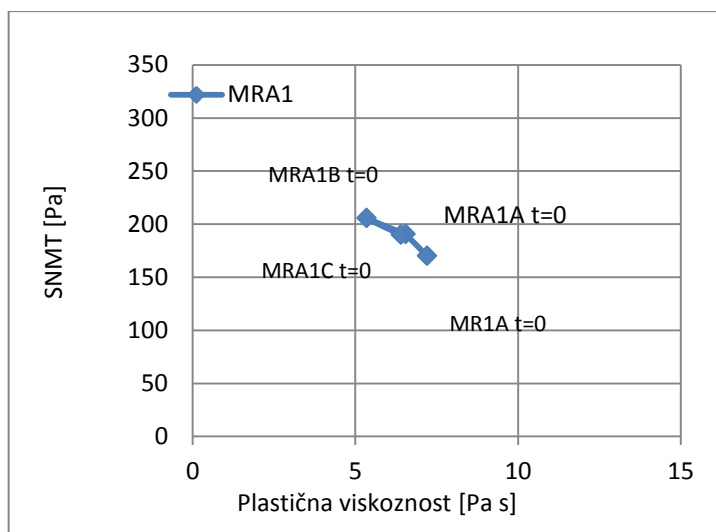


Grafikoni 6, 7, 8 in 9: Vpliv vrste cementa in količine superplastifikatorja na obdelovalnost malte po času $t = 0$ min (zgoraj levo), $t = 20$ min (zgoraj desno), $t = 40$ min (spodaj levo) in $t = 60$ min (spodaj desno)

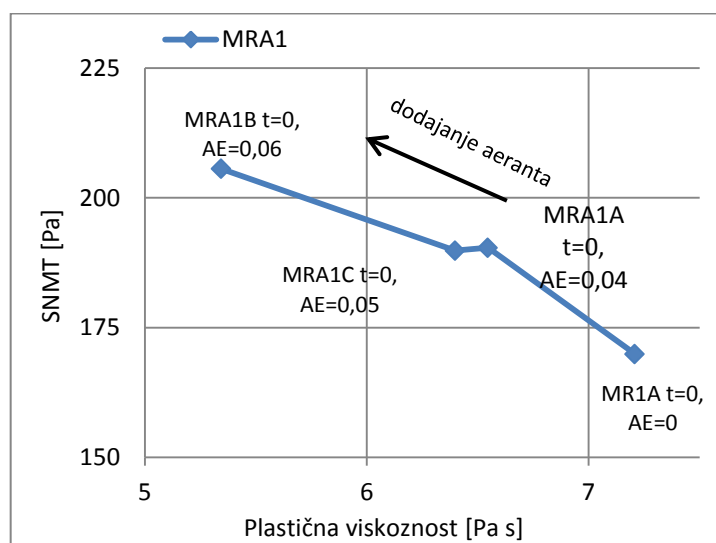
7.1.2 Vpliv količine aeranta

Vpliv smo preučevali na maltnih mešanicih z oznakami MRA1A, MRA1B in MRA1C. Izhodiščna mešanica je mešanica brez aeranta z oznako MR1A. Dodatek aeranta ima za posledico oblikovanje zračnih mehurčkov, kar je imelo majhen vpliv na plastično viskoznost in razlez, razen pri dozaciji nad 0,05 % (glej grafikona 10 in 11). Povečanje deleža aeranta z 0,05 % na 0,06 % pa na obdelavnost malte, izmerjeno z razlezom, bistveno vpliva, saj se je povečala za vsaj 5 mm pri vseh časovnih merjenjih razleza, kar je v skladu s pričakovanji (grafikon 13). Pri SNMT opazamo malenkosten padec vrednosti pri dozaciji med 0,04 % (pri t

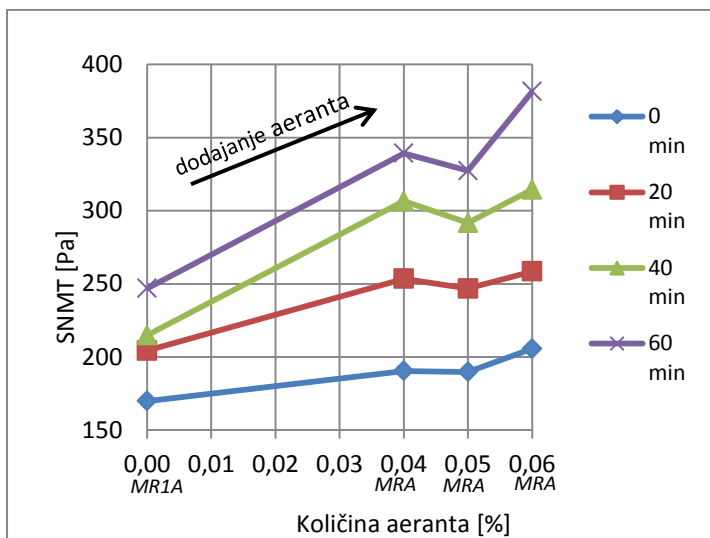
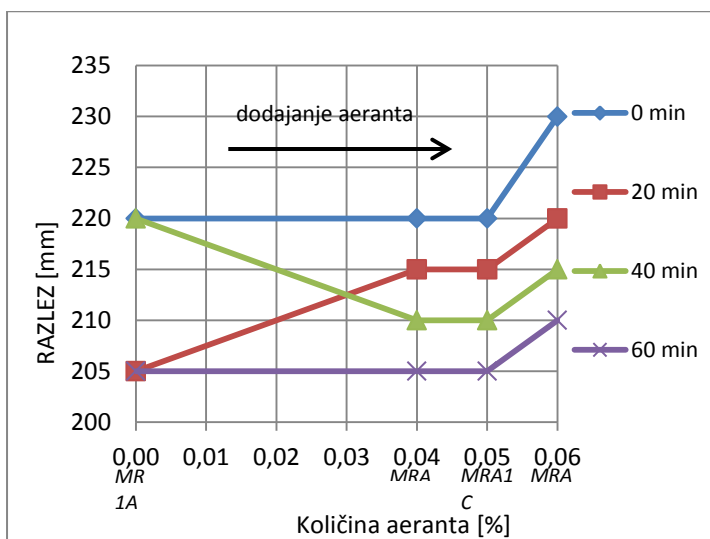
= 0 SNMT 190,4 PA) in 0,05 % (pri $t = 0$ SNMT 189,82 Pa), ter povečanje vrednosti nad 0,05 %. Pri vrednosti aeranta do 0,04 % SNMT pri $t = 0$ in $t = 20$ min raste zmerno, večjo rast vrednosti opazimo pri $t = 40$ in $t = 60$ min.



Grafikon 10: SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža aeranta



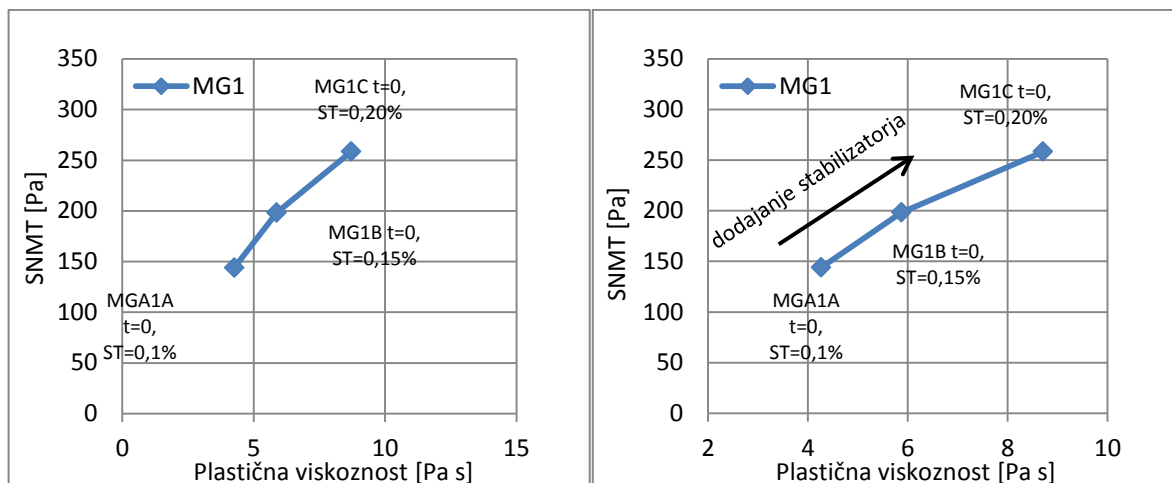
Grafikon 11: Povečan prikaz SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža aeranta (naraščajoči delež aeranta)

Grafikon 12: Vpliv količine aeranta na SNMT (τ_0)

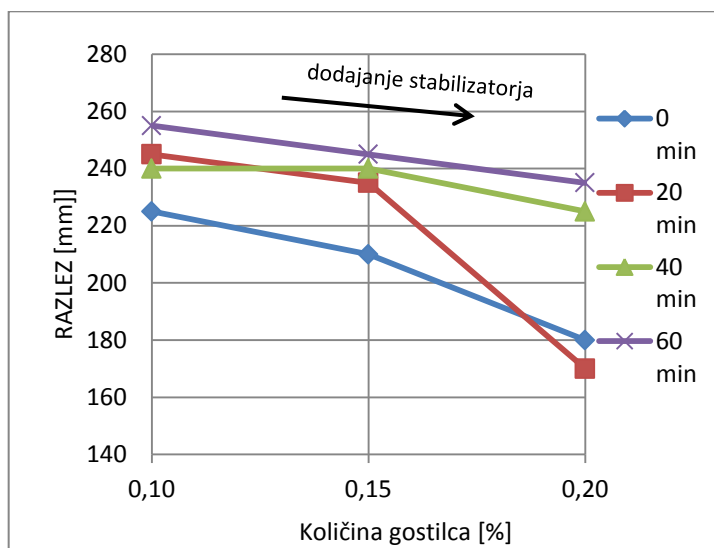
Grafikon 13: Vpliv količine aeranta na razlez malte v času t = 0, 20, 40 in 60min

7.1.3 Vpliv stabilizatorja

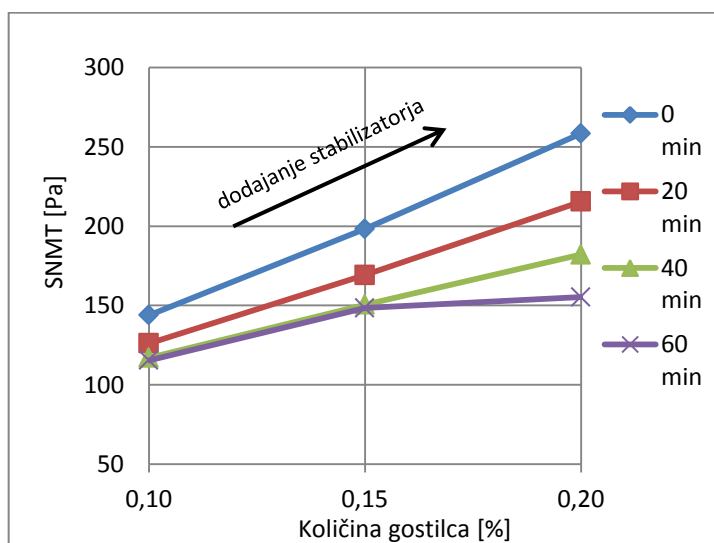
Ugotavljali smo vpliv količine gostilca na skupini malt z oznakami MG1A, MG1B in MG1C. Vidimo, da s povečevanjem količine gostilca v sestavi mešanice malte naraščata plastična viskoznost in SNMT. Plastična viskoznost pri deležu gostilca 0,2 % je dvakratnik plastične viskoznosti pri deležu gostilca 0,1 %, pri času t = 0 min. Razlez oz. obdelovalnost malte z dodajanjem gostilca pada (grafikon 16), kar je v skladu s pričakovanji. Namen uporabe gostilca oziroma stabilizatorja je zmanjšati količino mobilne vode, s tem povečamo odpornost proti segregaciji. Če mešanici zmanjšamo mobilno vodo, povečamo njeno viskoznost, kar je lepo vidno z grafikonov 14 in 15.



Grafikon 14, 15: SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od deleža aeranta (levo) in povečan prikaz (desno)



Grafikon 16: Vpliv količine stabilizatorja na razlez malte v času $t = 0, 20, 40$ in 60 min

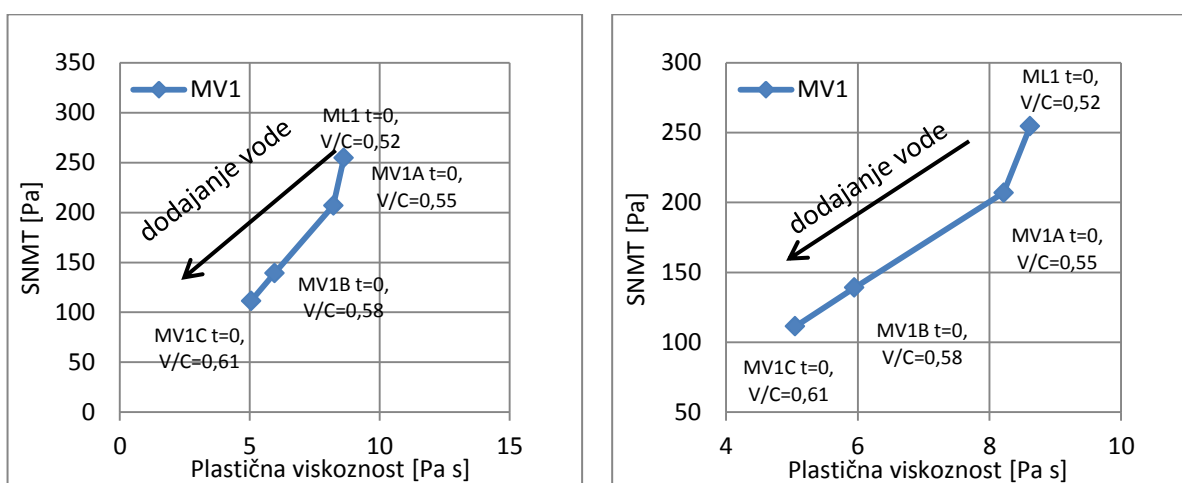


Grafikon 17: Vpliv količine gostilca na SNMT (τ_0)

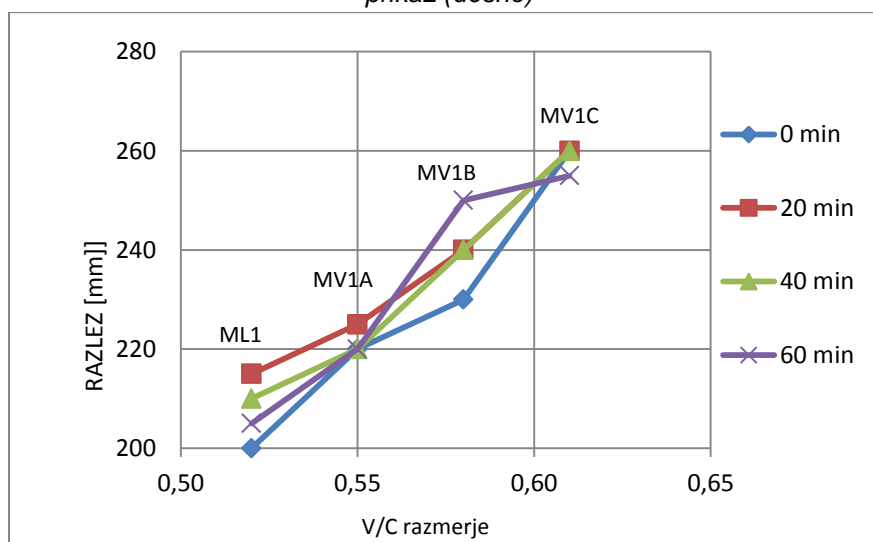
7.1.4 Vpliv spreminjanja V/C-razmerja

Vpliv spreminjanja vodocementnega razmerja smo spremljali v skupini mešanic MV1. Za etalon sem izbral mešanico ML1 z $v/c = 0,52$, ki vsebuje enak cement kot mešanice MV1. Mešanice MV1A, MV1B in MV1C imajo $v/c = 0,55, 0,58$ in $0,61$. Povečanje vodocementnega razmerja smo izvajali z dodajanjem vode, količina cementa pa je ostajala enaka.

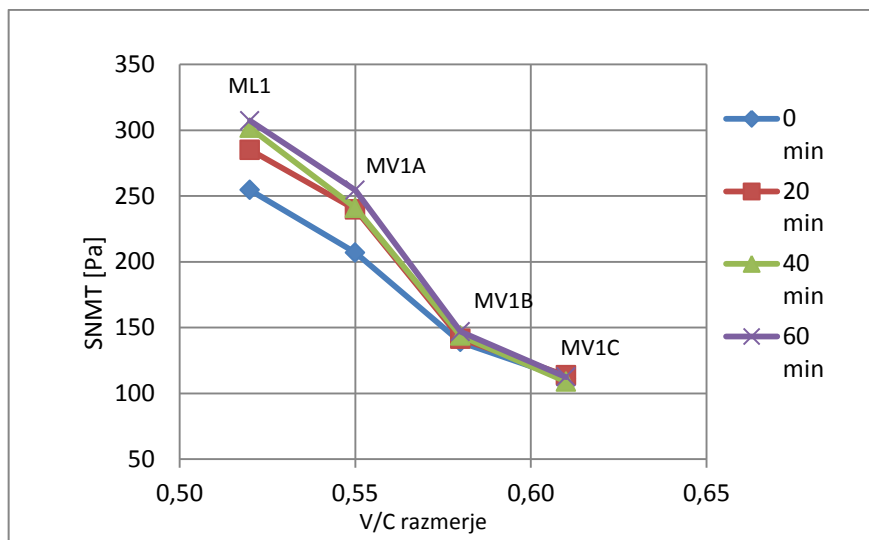
Iz grafikona SNMT in plastične viskoznosti vidimo, da dodajanje vode vpliva na obe količini. Dodajanje vode zmanjšuje tako SNMT kot plastično viskoznost, kar smo lahko pričakovali, sodeč po objavljenih rezultatih v literaturi (glej [24]). Poleg tega je v skladu s pričakovanji tudi vpliv višanja v/c razmerja na razlez malt, ki narašča z naraščanjem v/c razmerja (grafikon 20).



Grafikon 18,19: SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od V/C-razmerja (levo) in povečan prikaz (desno)



Grafikon 20: Vpliv V/C-razmerja na obdelavnost malte v času $t = 0, 20, 40$ in 60 min

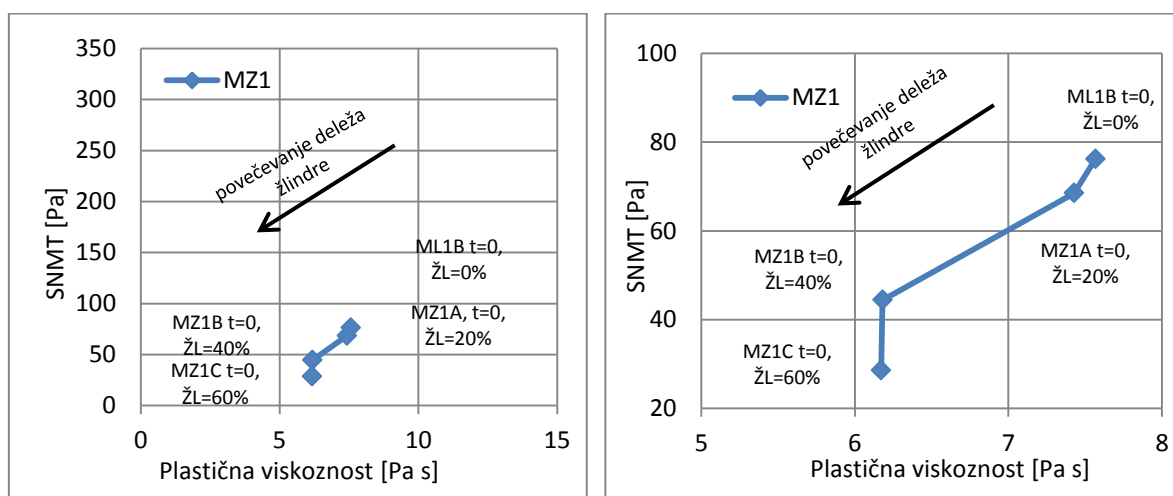


Grafikon 21: Vpliv V/C-razmerja na SNMT (τ_0)

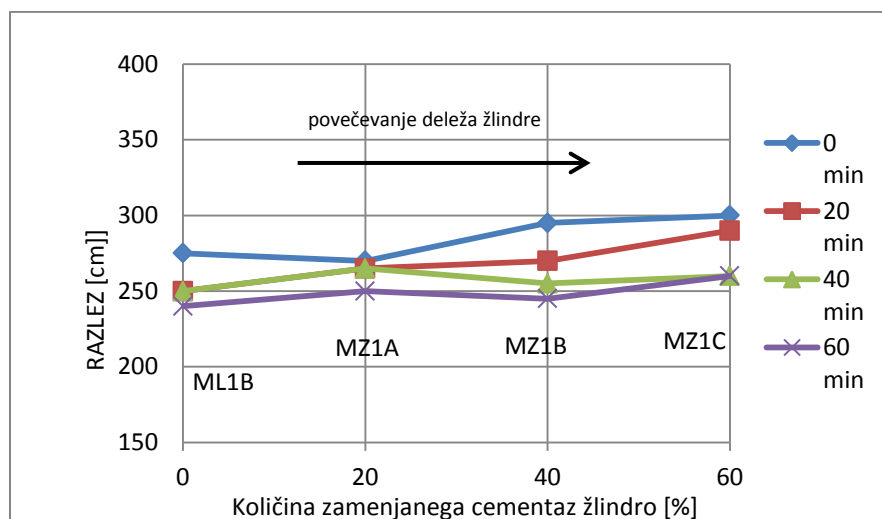
7.2 Vpliv mineralnih dodatkov

7.2.1 Vpliv zamenjave cementa z žlindro

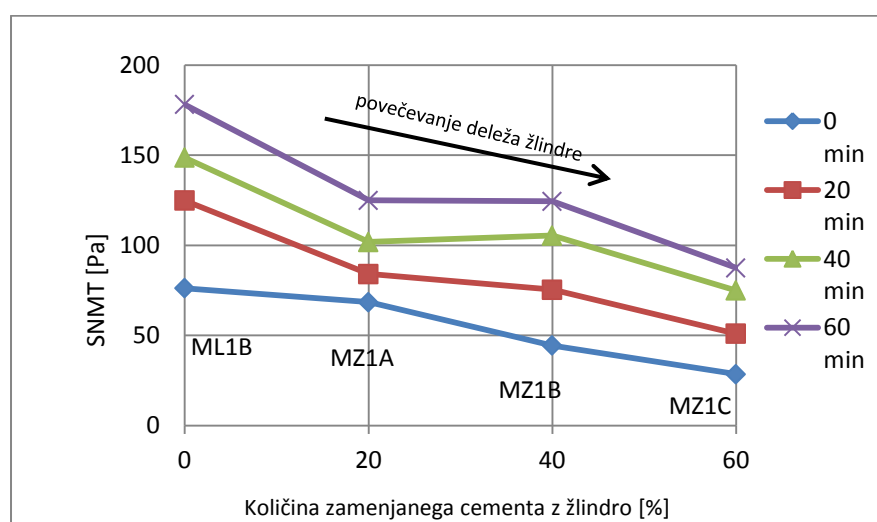
Vpliv zamenjave določenega deleža cementa CEM I 42.5 R z mleto granulirano plavžno žlindro smo ugotavljali na skupini malt MZ1A, MZ1B in MZ1C. Za referenčno mešanico brez žlindre sem izbral mešanico ML1B. Mešanica vsebuje 0,2 % delež superplastifikatorja in polno vsebnost cementa CEM 1. Z žlindro lahko zamenjujemo večji delež cementa, saj je hidravlično vezivo. V primerjavi s tufom in mikrosiliko so deleži zamenjave veliko večji pri žlindri. Mešanica MZ1A vsebuje 20 %, MZ1B 40 % in mešanica MZ1C 60 % žlindre, s katero smo zamenjali cement. Vpliv žlindre na cementno mešanico lahko vidimo na grafikonih 22 in 23. Opazimo lahko, da mešanica svoje lastnosti zelo malo spreminja. Glede na količino zamenjanega cementa lahko rečemo, da je vpliv žlindre skoraj neopazen. Nekoliko se je zmanjšala vrednost SNMT in plastične viskoznosti. Zelo majhen vpliv žlindre potrди tudi grafikon 24, kjer so prikazani rezultati razleza in skoraj ne opazimo nikakršne spremembe.



Grafikon 22, 23: SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od povečevanja deleža žlindre (levo) in povečan prikaz (desno)



Grafikon 24: Vpliv zamenjave cementa z žlindro na razlez malte

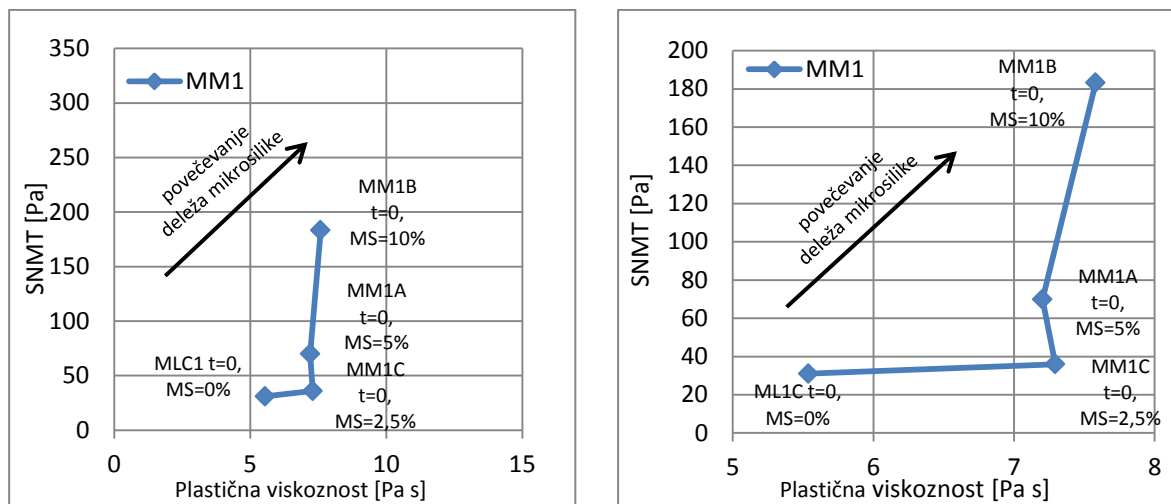


Grafikon 25: Vpliv zamenjave cementa z žlindro na reološke lastnosti malte

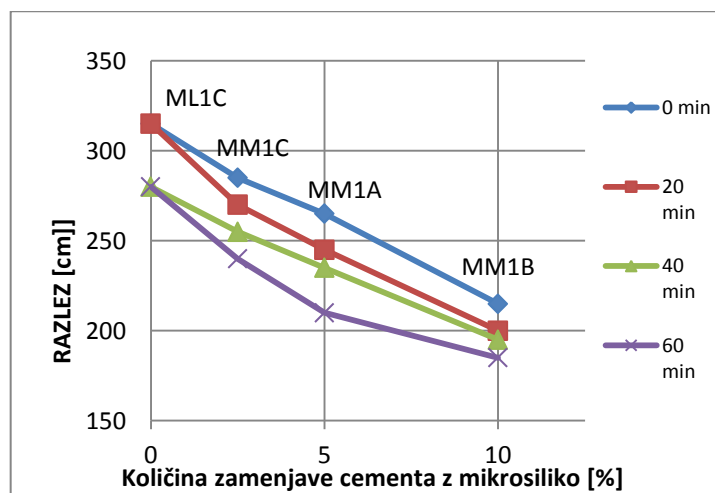
7.2.2 Vpliv zamenjave cementa z mikrosiliko

Vpliv zamenjave dela cementa CEM I 42.5 R z mikrosiliko smo preverili na skupini cementnih malt MM1A, MM1B in MM1C. Mešanica brez mikrosilike je ML1C in predstavlja etalon, mešanica vsebuje 0,3 % superplastifikatorja in cement CEM 1. Iz grafikonov 26 in 27 se vidi, kako mikro silika v različnih deležih vpliva na reološke lastnosti malte. Opazimo, da ta občutno poveča plastično viskoznost ob najmanjši dozaciji mikrosilike, kar je v nasprotju z rezultati drugih raziskovalcev [24], da je mikrosilika eden najprimernejših dodatkov za zmanjšanje plastične viskoznosti. Plastična viskoznost se je pri času $t = 0$ in količini doziranja iz 0 na 2,5 % povečala s 5,53 Pa·s na 7,29 Pa·s. Pri doziranju mikrosilike nad 2,5 % do 5,0 % plastična viskoznost malo zniža svojo vrednosti, z 7,29 Pa·s na 7,20 Pa·s, nato pa jo do končne količine doziranja 10 % spet nekoliko poveča, in sicer na 7,58 Pa·s.

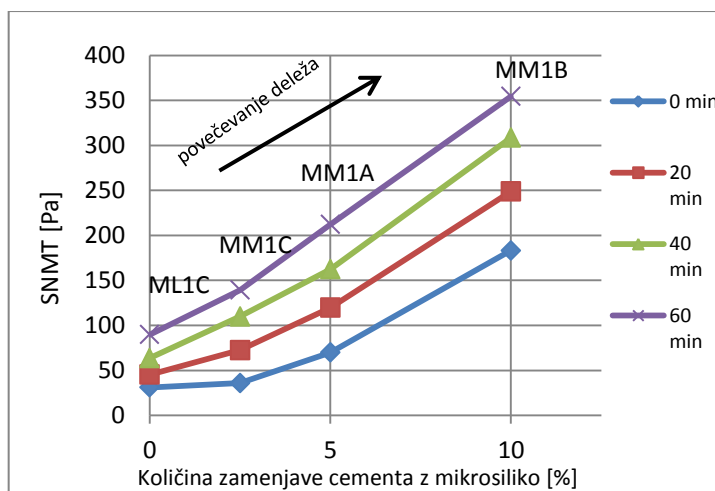
Mikrosilika je velik porabnik vode v cementni mešanici, zato je naraščanje SNMT z večanjem deleža zamenjave cementa za mikrosiliko pričakovano. Mikrosilika je v našem primeru bistveno zmanjšala tudi razlez oz. obdelovalnost malte pri različnih stopnjah zamenjave do 10 % (glej grafikon 28). Potek grafa je skoraj linearen.



Grafikon 26, 27: SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od povečevanja deleža mikrosilike (levo) in povečan prikaz (desno)



Grafikon 28: Vpliv zamenjave cementa z mikrosilikom na razlez malte

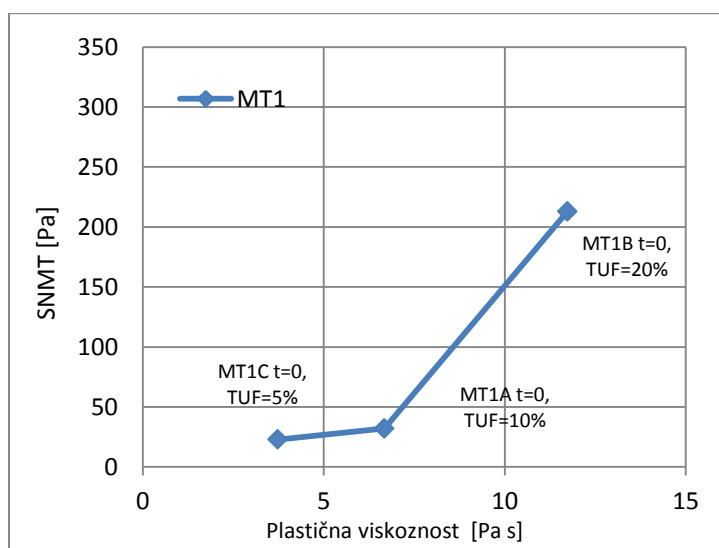


Grafikon 29: Vpliv zamenjave cementa z mikrosilikom na reološke lastnosti malte

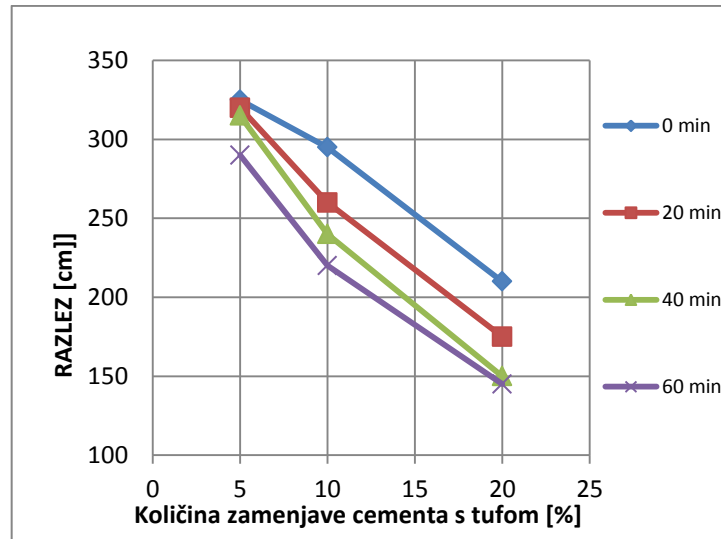
7.2.3 Vpliv zamenjave cementa s tufom

Pri mešanicah, kjer smo del cementa zamenjali s tufom, je bilo zaradi doseganja ustrezne obdelavnosti potrebno povečati količino superplastifikatorja. Uporabili smo enkrat večje količine superplastifikatorja. Tuf je velik porabnik vode. Vpliv zamenjave deleža cementa s tufom smo ugotavljali na skupini malt MT1A, MT1B in MT1C. Referenčne mešanice nismo uporabili, saj je zaradi povečane količine superplastifikatorja nismo imeli.

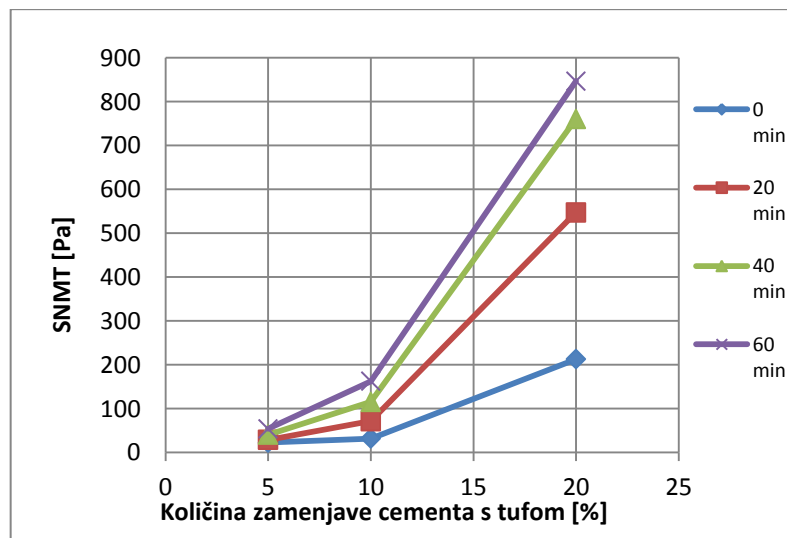
Grafikon 31 kaže bistveno poslabšanje obdelovalnosti v območju zamenjave cementa s tufom od 5 do 20 %. Razlez se je zmanjšal pri času $t = 0$ minut s 325 mm (zamenjava 5 %) na 210 mm (zamenjava 20 %). Iz grafikona 30 vidimo, da zamenjava cementa s tufom vpliva tako na plastično viskoznost kot na strižno napetost na meji tečenja. Pri $t = 0$ je plastična viskoznost skoraj potrojila svojo vrednost med deležema 5 in 20%, SNMT pa je pri enakih pogojih dosegla skoraj desetkrat večjo vrednost (22,75 Pa pri 5 %, 212,84 Pa pri 20 %). Ugotovili smo, da SNMT pri dozaciji tufa od 10 do 20% močno poveča svoje vrednosti, prav tako se močno povečuje s časom, kar pri drugih mešanicah ni tako izrazito. Pri 20% zamenjavi cementa s tufom in $t = 60$ minut vrednost SNMT poskoči na skoraj 850 Pa, pri času $t = 0$ minut pa je vrednost SNMT 212 Pa.



Grafikon 30: SNMT (τ_0) in plastična viskoznost (μ) v odvisnosti od povečevanja deleža tufa



Grafikon 31: Vpliv zamenjave cementa s tufom na razlez malte



Grafikon 32: Vpliv zamenjave cementa s tufom na reološke lastnosti malte

8 ZAKLJUČEK

Laboratorijske preiskave so nam pokazale, da so kompoziti, ki jih imenujemo betoni in malte zelo zapleteni. Pričakoval sem, da bodo rezultati preiskav in lastnosti mešanic predvidljivi in enostavno določljivi, kot se zdi priprava malt na prvi pogled. Analiza rezultatov preiskav pa je pokazala, da temu ni tako. Tuji raziskovalci so v svojih objavah zapisali odkrita dejstva na podlagi teorije in preskusov. Pri večini analiziranih parametrov lahko potegnemo vzporednice med našimi in tujimi rezultati, pri nekaterih parametrih pa se naši rezultati bistveno razlikujejo od rezultatov drugih raziskovalcev. Razlogov je lahko veliko, najverjetnejši so povezani z vrsto uporabljenih materialov. Vidimo lahko, kako velik je vpliv uporabe lokalnih materialov na reološke lastnosti svežih betonov. Prav zaradi tega lahko ugotovimo, da je področje cementnih kompozitov široko in kompleksno. V diplomski nalogi je predstavljen celoten postopek, od pridobivanja surovin do sestave betona ali malte. Pri osnovnih surovinah smo ugotovili, da jih pridobivamo iz naravnih lokalnih materialov, katerih lastnosti se med državami lahko bistveno razlikujejo. Enako velja za večino mineralnih in kemijskih dodatkov. Zato je logično, da prihaja do razhajanja v rezultatih avtorjev, ki prihajajo iz držav z zelo različnimi viri osnovnih materialov za betone.

Področje reologije svežih cementnih kompozitov je še vedno relativno neraziskano in predstavlja izziv za stroko, ki se s tem področjem ukvarja.

Diplomska naloga je potekala v sklopu doktorske disertacije somentorja, d. Andraža Hočvarja. V okviru te disertacije so izvajali preiskave tudi drugi študenti v okviru svojih diplomskih nalog. Sam sem preučeval vplive kemijskih in mineralnih dodatkov na reološke lastnosti sveže CEM malte. Osredotočil sem se na naslednje vplive: vrsto uporabljenega cementa, količino superplastifikatorja, količino aeranta, količino stabilizatorja, V/C-razmerje, vpliv zamenjave cementa z mikrosiliko, z žlindro ali s tufom.

Pri analizi rezultatov preizkušanja svežih cementnih malt sem ugotovil sledeče.

Vpliv superplastifikatorja je imel na mešanico pričakovan vpliv, podoben, kot je opisan v literaturi, čeprav sem opazil tudi zmanjševanje plastične viskoznosti. V citirani literaturi so strokovnjaki ugotovili, da naj bi superplastifikator vplival predvsem na znižanje SNMT, na plastično viskoznost pa naj ne bi imel velikega vpliva. V mojem primeru je torej superplastifikator vplival na SNMT in na plastično viskoznost. Podoben vpliv ima dodajanje vode, ki pomeni premik proti izhodišču reografa.

Pri ugotavljanju vpliva vrste cementa smo ugotovili, kako je pomembna finost mletja cementa, saj cement z večjo specifično površino doseže višje vrednosti SNMT. Vpliv superplastifikatorja je bil večji na cement z mešanim mineralnim dodatkom, kar pomeni, da je superplastifikator bolj kompatibilen s tem cementom, kot s CEM I.

Vpliv aeranta ni imel bistvenega vpliva na mešanico pri dozaciji do 0,05 %. Pri doziranju aeranta nad 0,05 % pa se je precej izboljšala obdelovalnost malte.

Vpliv stabilizatorja oziroma njegovo dodajanje mešanici je imelo za posledico naraščanje plastične viskoznosti in SNMT. Obdelavnost vzorca se je poslabšala, kar je bilo povsem v skladu s pričakovanji.

Vpliv povečevanja vodo-cementnega razmerja smo izvajali tako, da smo dodajali vodo, količino cementa pa smo ohranjali. Vpliv se kaže na zmanjšanju SNMT in plastične viskoznosti. Literatura predvideva pomik grafa proti izhodišču, kar se je izkazalo tudi v našem primeru. Obdelavnost se seveda izboljša.

Zamenjava cementa z žlindro se je izkazala za zelo ugodno. Na reološke lastnosti ni imela bistvenega vpliva, kljub velikemu deležu zamenjave (60 %). Opazil sem manjše zmanjšane vrednosti SNMT in plastične viskoznosti.

Zamenjava cementa z mikrosiliko občutno poveča vrednosti SNMT in zmanjša obdelavnost. V našem primeru je povečala plastično viskoznost, kar je v nasprotju z rezultati v citirani literaturi, ki pravi, da pri doziranju mikrosilike do 5 % dosežemo učinek zmanjšanja plastične viskoznosti. Mikrosilika deluje kot stabilizator, saj ima veliko potrebo po vodi - njeni delci so okrog 10x manjši kot delci cementa.

Pri zamenjavi cementa s tufom je bilo potrebno povečati doziranje superplastifikatorja, da je bila mešanica dovolj obdelavna. Tuf je velik porabnik vode, zato smo lahko pričakovali povečanje SNMT in plastične viskoznosti ter poslabšanje obdelavnosti. Rezultati preiskav so pričakovanja potrdili. Tuf je drastično vplival na vse parametre.

Ugotavljam oziroma predpostavljam, da smo z dodajanjem superplastifikatorja dosegli drugačne rezultate, kot v literaturi, ker smo uporabili likalne materiale, ki so bistveno drugačni od tistih, ki so jih uporabili raziskovalci v citirani literaturi. Ostali uporabljeni kemijski dodatki so dosegali okvirje, navedene v literaturi. Pri mineralnih dodatkih ugotavljam, da je kot mineralni dodatek betonom uporabna le žindra. Tuf in mikrosilika sta uporabna le za korekcijo posameznih lastnosti malt ali betonov. Vplive na reologijo svežih cementnih mešanic smo v tej diplomski nalogi predstavili in opisali. Zanimivo bi bilo preveriti še lastnosti cementnih mešanic v strjenem stanju in jih korelirati z rezultati reoloških preiskav. Žal to ni bil del te diplomske naloge, bi pa na ta način lahko ugotovili vplive dodatkov na lastnosti malt v strjenem stanju.

VIRI

- [1] SLONEP. 2016. Beton
<http://www.slonep.net/gradnja/gradbeni-materiali/beton-2565>
(Pridobljeno 15. 1. 2016.)
- [2] Wikipedia. 2016.
<https://sl.wikipedia.org/wiki/Cement> (Pridobljeno 15.1.2016.)
- [3] Žarnić, R. 2005 Lastnosti gradiv. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij: 350 str.
- [4] Lafarge. 2016.
<http://www.lafarge.si/nasi-izdelki/o-cementu/> (Pridobljeno 15. 1. 2016.)
- [5] SIST EN 197-1. Cement – 1. del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente.
- [6] Tattersal, G.H., Banfill, P.F.G. 1983. The rheology of fresh concrete. Boston, London, Melbourne, Pitman: 356 str.
- [7] SIST EN 206-1. Beton – 1. del – Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost.
- [8] Ukraincyyk, V., Šušteršič, J. 2006. Vpliv lastnosti agregatov na lastnosti betonov. Zajc, A. (ur.). Agregati v betonu: 13. Slovenski kolokvij o betonih, Ljubljana, 18.maj 2006. Ljubljana, IRMA Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str. 1–8
- [9] Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W.C. 2003. Design and Control of Concrete Mixtures, EB001, 14th edition. Skokie, Illinois, USA, Portland Cement Association: 358 str.
- [10] Žarnić, R., V., Bokan-Bosiljkov, V., Dujič, B. 2006/2007. Gradiva vaje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [11] SIST EN 1008. Voda za pripravo betona – Zahteve za vzorčenje, preskušanje in ugotavljanje primerne vode za pripravo betona, vključno vode, pridobljene iz procesov v industriji betona
- [12] Zajc, A. 2007. Kemijski in mineralni dodatki v tehnologiji betona. V: Zajc, A. (ur.). Posebne lastnosti betonov z dodatki: 14. Slovenski kolokvij o betonih, Ljubljana, 29. maj, 2007. Ljubljana, IRMA Inštitut za raziskavo materialov in aplikacije: str 1–7.
- [13] TKK. Cementol Hiperplast 463. 2010.
http://www.tkk.si/si/files/default/tehnichni_listi/cementol/Cementol_Hiperplast_463_slo.pdf (Pridobljeno 15.2.2016)

- [14] Černilogar, L. 2010. Dodatki za beton: plastifikatorji, superplastifikatorji, hiperplastifikatorji. *Gradbenik*. 12/2010–01/2011: str: 100–103.
- [15] TKK. Cementol eta S. 2005.
http://www.tkk.si/si/files/default/tehnichni_listi/cementol/cementol_eta_s_slo.pdf
(Pridobljeno 15.2.2016)
- [16] TKK. 2008. Gostilec L.
http://www.tkk.si/si/files/default/tehnichni_listi/cementol/drugi_dodatki_za_betone_in_malte/14_Cementol_Gostilec_L_slo.pdf (Pridobljeno 15. 2. 2016)
- [17] Kosmatka, S.H., Kerkhoff, B., Panarese, W.C. 2002. Design and control of concrete mixtures. USA, Portland cement association
- [18] Virgalitte, S.J., Luther, M.D., Jere, H.R., Mather, B., 2000, Ground Granulated Blast – Furnace Slag as a Cementitious Constituent in Concrete. Report by ACI Committee 233R – 95.
- [19] Bokan Bosiljkov, V., 2006. Izdelava metodologije za presojo varnosti, končno poročilo. Ljubljana: univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preizkušanje materialov in konstrukcij.
- [20] Uranjek, M. 2011. Propadanje in trajnostna obnova stavbne dediščine. Doktorska disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [21] Slag cement association. Slag cement and fly ash.
<http://www.slagcement.org/pdf/no11%20Slag%20Ceent%20and%20Fly%20Ash.pdf>
(Pridobljeno 16.2.2016.)
- [22] TKK. 2004. Mikrosilika.
http://www.tkk.si/si/files/default/tehnichni_listi/cementol/tkk_mikrosilika_slo.pdf
(Pridobljeno 15.2.2016)
- [23] Collepardi, M. 2010. The new concrete. Casterete di Villorba, Tintoretto: 436 str.
- [24] Wallewik, O.H. 2009. Introduction to rheology of fresh concrete.
- [25] Koehler, E.P., Fowler, D.W. 2004. Development of a Portable Rheometer for Fresh Portland Cement Concrete, ICAR report 105-3F Austin, ICAR: 306 str.
- [26] Tattersall, G. H., Banfill, P. F. G. 1983. *The rheology of fresh concrete*. Boston, London, Melbourne, Pitman: 356 str.
- [27] Koehler, E.P., Fowler, D.W. 2006. Development and Use of a Portable Rheometer for Concrete. V: Malhotra, V. M. (ur.). Supplementary Proceedings of the Eighth CANMET/ACI International Conference on Recent Advances in Concrete Technology, Montreal, Canada, 31.05-03.06.2006. ACI: p. 53-72.

-
- [28] Turanli, L., Uzal, B., Bektas, F. 2004. Effect of material characteristics on the properties of blended cements containing high volumes of natural pozzolans. *Cement and Concrete Research* 34, 12: 2277-2282.
- [29] Sahmaran, M., Ozkan, N., Keskin, S. B., Uzal, B., Yaman, I. O., Erdem, T. K. 2008. Evaluation of natural zeolite as a viscosity-modifying agent for cement-based grouts. *Cement and Concrete Research* 38, 7: 930-937.
- [30] Bokan Bosiljkov, V. 2003. SCC mixes with poorly graded aggregate and high volume of limestone filler. *Cement and Concrete Research* 33, 9: 1279-1286.
- [31] Hočevar, A. 2013. Reološke lastnosti cementnih kompozitov v svežem stanju. Doktorska Disertacija. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo.
- [32] Banfil, P., Beaupre, D., Chapdelaine, F., de Larrard, F., Domone, P., Nachbaur, L., Sedran, T., Wallevik, O., Eallevik J.E. 2000. Comparison of concrete rheometers: International tests at LCP. Nantes, France, October 2000.
- [33] Adil Bari, S. 2013. Rheological measurements with strain hardening cement-based composites (SHCC) at variable temperature. Raziskovalna naloga. Dresden, Fakulteta Bauingenieurwesen, Institut za materiale.
- [34] Avantech Engineering Consortium. <http://www.avantech.in/products/icar-rheometer-self-compacting-concrete-rheology.aspx> (Pridobljeno 15.2.2016)
- [35] Schwartzenruber, A., Catherine, C. 2000. La methode du mortier de beton equivalent (MBE) – Un nouvel outil d'aide a la formulation des betons adjuvantes (Method of the concrete equivalent mortar (CEM) – A new tool to design concrete containing admixture). *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, Vol. 33, Oktober 2000, pp 475. 8 str.
- [36] Salanit Anhovo. 2016. https://www.salonit.si/proizvodi_in_storitve/cementi/2011122210551525/ (Pridobljeno 15.2.2016)
- [37] Lafarge. 2014. http://www.lafarge.si/uploads/www.lafarge.si/Dokumentacija/Certifikati/DOP_Profi_maj%2014.pdf (Pridobljeno 15.2.2016)
- [38] SIST EN 1015-3:1999. Metode preskušanja zidarske malte – 3. del: Določevanje konsistence sveže malte.
- [39] Kavčič, F., Hočevar, A. 2010. Reološke preiskave superplastifikatorjev: eksperimenti na malti in betonu. Srečanje TKK Srpenica, oktober 2010.

SEZNAM PRILOG:

PRILOGA A: SESTAVE MEŠANIC CEMENTNIH MALT

PRILOGA B: REZULTATI MERITEV Z REOMETROM CON TEC VISCOMETER 5

PRILOGA A: SESTAVE MEŠANIC CEMENTNIH MALT

| Mešanica: | MR1 | | prič. razlez 205 | | | |
|--------------|-------------------------|-----------|-------------------------|------|----------|-----|
| Agregat: | 0/2 | 13,032 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 110 | 200 | 10 |
| Voda: | | 2,932 kg | 20 | 110 | 200 | |
| Dodatek I: | | | 40 | 110 | 195 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 110 | 190 | 105 |
| Žlindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MR1a | | prič. razlez 250 | | | |
|--------------|----------------------------|-----------|-------------------------|------|----------|-----|
| Agregat: | 0/2 | 13,024 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 125 | 220 | 100 |
| Voda: | | 2,928 kg | 20 | 120 | 205 | 105 |
| Dodatek I: | superplastifikator (0,1 %) | 5,6 g | 40 | 116 | 220 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 115 | 205 | |
| Žlindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MR1b | | prič. razlez 270 | | | |
|--------------|----------------------------|-----------|-------------------------|------|----------|-----|
| Agregat: | 0/2 | 13,017 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 175 | 270 | |
| Voda: | | 2,924 kg | 20 | 155 | 255 | |
| Dodatek I: | superplastifikator (0,2 %) | 11,2 g | 40 | 140 | 230 | 100 |
| Dodatek II: | | | 60 | 135 | 220 | |
| Žlindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MR1c | | prič. razlez 335 | | | |
|--------------|----------------------------|-----------|-------------------------|------|----------|----|
| Agregat: | 0/2 | 13,010 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 260 | 320 | 85 |
| Voda: | | 2,920 kg | 20 | 245 | 310 | 90 |
| Dodatek I: | superplastifikator (0,3 %) | 16,8 g | 40 | 230 | 300 | 90 |
| Dodatek II: | | | 60 | 210 | 290 | |
| Žlindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | ML1 | | prič. razlez | | | 215 |
|--------------|--------------|-----------|--------------|------|----------|------------|
| Agregat: | 0/2 | 13,022 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 105 | 200 | |
| Voda: | | 2,932 kg | 20 | 115 | 215 | 105 |
| Dodatek I: | | | 40 | 111 | 210 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 110 | 205 | |
| Žindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | ML1a | | prič. razlez | | | 235 |
|--------------|----------------------------|-----------|--------------|------|----------|------------|
| Agregat: | 0/2 | 13,024 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 110 | 215 | |
| Voda: | | 2,928 kg | 20 | 125 | 220 | |
| Dodatek I: | superplastifikator (0,1 %) | 5,6 g | 40 | 115 | 225 | 105 |
| Dodatek II: | | | 60 | 120 | 220 | |
| Žindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | ML1b | | prič. razlez | | | 255 |
|--------------|----------------------------|-----------|--------------|------|----------|------------|
| Agregat: | 0/2 | 13,017 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 175 | 275 | |
| Voda: | | 2,924 kg | 20 | 155 | 250 | 95 |
| Dodatek I: | superplastifikator (0,2 %) | 11,2 g | 40 | 145 | 250 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 140 | 240 | |
| Žindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | ML1c | | prič. razlez | | | 273 |
|--------------|----------------------------|-----------|--------------|------|----------|------------|
| Agregat: | 0/2 | 13,009 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 240 | 315 | 85 |
| Voda: | | 2,920 kg | 20 | 235 | 315 | |
| Dodatek I: | superplastifikator (0,3 %) | 16,8 g | 40 | 195 | 280 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 185 | 280 | |
| Žindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MV1a | | prič. razlez | | | 240 |
|--------------|--------------|-----------|--------------|------|----------|------------|
| Agregat: | 0/2 | 13,032 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 120 | 220 | 85 |
| Voda: | | 3,098 kg | 20 | 125 | 225 | |
| Dodatek I: | | | 40 | 120 | 220 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 120 | 220 | |
| Žlindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MV1b | | prič. razlez | | | 243 |
|--------------|--------------|-----------|--------------|------|----------|------------|
| Agregat: | 0/2 | 13,032 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 130 | 230 | 95 |
| Voda: | | 3,262 kg | 20 | 130 | 240 | |
| Dodatek I: | | | 40 | 130 | 240 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 140 | 250 | |
| Žlindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MV1c | | prič. razlez | | | 273 |
|--------------|--------------|-----------|--------------|------|----------|------------|
| Agregat: | 0/2 | 13,032 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 145 | 260 | |
| Voda: | | 3,428 kg | 20 | 160 | 260 | 90 |
| Dodatek I: | | | 40 | 155 | 260 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 160 | 255 | |
| Žlindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MRA1a | | prič. razlez | | | 220 |
|--------------|----------------------------|-----------|--------------|------|----------|------------|
| Agregat: | 0/2 | 13,021 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 115 | 220 | 95 |
| Voda: | | 2,928 kg | 20 | 115 | 215 | |
| Dodatek I: | superplastifikator (0,1 %) | 5,6 g | 40 | 110 | 210 | |
| Dodatek II: | aerant (0,04 %) | 2,24 g | 60 | 110 | 205 | |
| Žlindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MRA1b | | prič. razlez 290 | | | |
|--------------|----------------------------|-----------|-------------------------|------|----------|----|
| Agregat: | 0/2 | 13,020 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 125 | 230 | 90 |
| Voda: | | 2,928 kg | 20 | 120 | 220 | |
| Dodatek I: | superplastifikator (0,1 %) | 5,6 g | 40 | 115 | 215 | |
| Dodatek II: | aerant (0,06 %) | 3,36 g | 60 | 115 | 210 | |
| Žindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MRA1c | | prič. razlez 260 | | | |
|--------------|----------------------------|-----------|-------------------------|------|----------|----|
| Agregat: | 0/2 | 13,020 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM II/A-M(LL-S) 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 115 | 220 | 95 |
| Voda: | | 2,928 kg | 20 | 120 | 215 | |
| Dodatek I: | superplastifikator (0,1 %) | 5,6 g | 40 | 115 | 210 | |
| Dodatek II: | aerant (0,05 %) | 2,8 g | 60 | 115 | 205 | |
| Žindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MZ1a | | prič. razlez 268 | | | |
|--------------|----------------------------|-----------|-------------------------|------|----------|----|
| Agregat: | 0/2 | 13,057 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 4,480 kg | 0 | 170 | 270 | 90 |
| Voda: | | 2,896 kg | 20 | 165 | 265 | |
| Dodatek I: | superplastifikator (0,2 %) | 11,09 g | 40 | 155 | 265 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 150 | 250 | |
| Žindra: | 20 % | 1,064 kg | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MZ1b | | prič. razlez 263 | | | |
|--------------|--------------------|-----------|-------------------------|------|----------|----|
| Agregat: | 0/2 | 13,098 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 3,360 kg | 0 | 190 | 295 | 85 |
| Voda: | | 2,868 kg | 20 | 160 | 270 | |
| Dodatek I: | superplastifikator | 10,98 g | 40 | 150 | 255 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 140 | 245 | |
| Žindra: | 40 % | 2,128 kg | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MZ1c | | prič. razlez | | | 273 |
|--------------|--------------------|-----------|--------------|------|----------|------------|
| Agregat: | 0/2 | 13,138 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 2,240 kg | 0 | 215 | 300 | 85 |
| Voda: | | 2,842 kg | 20 | 185 | 290 | |
| Dodatek I: | superplastifikator | 10,86 g | 40 | 155 | 260 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 150 | 260 | |
| Žlindra: | 60 % | 3,192 kg | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MM1a | | prič. razlez | | | 233 |
|--------------|----------------------------|-----------|--------------|------|----------|------------|
| Agregat: | 0/2 | 13,066 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 5,320 kg | 0 | 180 | 265 | 85 |
| Voda: | | 2,882 kg | 20 | 150 | 245 | |
| Dodatek I: | superplastifikator (0,3 %) | 16,57 g | 40 | 140 | 235 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 125 | 210 | |
| Žlindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | 5 % | 203 g | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MM1b | | prič. razlez | | | 215 |
|--------------|----------------------------|-----------|--------------|------|----------|------------|
| Agregat: | 0/2 | 13,123 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 5,040 kg | 0 | 120 | 215 | 85 |
| Voda: | | 2,844 kg | 20 | 110 | 200 | |
| Dodatek I: | superplastifikator (0,3 %) | 16,34 g | 40 | 110 | 195 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 110 | 185 | |
| Žlindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | 10 % | 406 g | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MM1c | | prič. razlez | | | 245 |
|--------------|----------------------------|-----------|--------------|------|----------|------------|
| Agregat: | 0/2 | 13,037 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 5,460 kg | 0 | 195 | 285 | 85 |
| Voda: | | 2,902 kg | 20 | 180 | 270 | |
| Dodatek I: | superplastifikator (0,3 %) | 16,68 g | 40 | 165 | 255 | 90 |
| Dodatek II: | | | 60 | 145 | 240 | |
| Žlindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | 2,50 % | 102 g | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MG1a | | prič. razlez 265 | | | |
|--------------|----------------------|-----------|-------------------------|------|----------|---|
| Agregat: | 0/2 | 12,058 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 115 | 225 | |
| Voda: | V/C=0,62 | 3,590 kg | 20 | 135 | 245 | |
| Dodatek I: | stabilizator (0,1 %) | 5,6 g | 40 | 135 | 240 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 155 | 255 | |
| Žindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MG1b | | prič. razlez 250 | | | |
|--------------|-----------------------|-----------|-------------------------|------|----------|----|
| Agregat: | 0/2 | 12,054 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 110 | 210 | 95 |
| Voda: | | 3,588 kg | 20 | 115 | 235 | |
| Dodatek I: | stabilizator (0,15 %) | 8,4 g | 40 | 125 | 240 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 130 | 245 | |
| Žindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MG1c | | prič. razlez 238 | | | |
|--------------|----------------------|-----------|-------------------------|------|----------|-----|
| Agregat: | 0/2 | 12,050 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 5,600 kg | 0 | 105 | 180 | 100 |
| Voda: | | 3,586 kg | 20 | 110 | 170 | |
| Dodatek I: | stabilizator (0,2 %) | 11,20 g | 40 | 120 | 225 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 125 | 235 | |
| Žindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | | | | | | |

| Mešanica: | MT1a | | prič. razlez 243 | | | |
|--------------|----------------------------|-----------|-------------------------|------|----------|----|
| Agregat: | 0/2 | 13,036 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 5,040 kg | 0 | 220 | 295 | 90 |
| Voda: | V/C=0,505 | 2,884 kg | 20 | 175 | 260 | |
| Dodatek I: | superplastifikator (0,5 %) | 27,44 g | 40 | 159 | 240 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 145 | 220 | |
| Žindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | 10 % | 448 g | | | | |

| Mešanica: MT1b | | prič. razlez 185 | | | | |
|-----------------------|----------------------------|-------------------------|-------|------|----------|-----|
| Agregat: | 0/2 | 13,118 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 4,480 kg | 0 | 120 | 210 | 100 |
| Voda: | | 2,829 kg | 20 | 110 | 175 | |
| Dodatek I: | superplastifikator (0,5 %) | 26,88 g | 40 | 105 | 150 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 105 | 145 | |
| Žlindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | 20 % | 896 g | | | | |

| Mešanica: MT1c | | prič. razlez 318 | | | | |
|-----------------------|----------------------------|-------------------------|-------|------|----------|----|
| Agregat: | 0/2 | 12,994 kg | (min) | (SF) | (razlez) | h |
| Cement: | CEM I 42,5 R | 5,320 kg | 0 | 285 | 325 | 85 |
| Voda: | | 2,912 kg | 20 | 270 | 320 | |
| Dodatek I: | superplastifikator (0,5 %) | 27,72 g | 40 | 250 | 315 | |
| Dodatek II: | | | 60 | 225 | 290 | |
| Žlindra: | | | | | | |
| Mikrosilika: | | | | | | |
| Tuf: | 5 % | 224 g | | | | |

PRILOGA B: REZULTATI MERITEV Z REOMETROM CON TEC VISCOMETER 5

| MEŠANICA | | MR1 | | | | MR1A | | | |
|----------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ČAS [min] | | 0 | 20 | 40 | 60 | 0 | 20 | 40 | 60 |
| SNMT [Pa] | 1 | 309,43 | 333,77 | 354,19 | 369,91 | 168,08 | 208,81 | 219,69 | 244,34 |
| | 2 | 300,63 | 320,98 | 343,11 | 364,20 | 168,41 | 205,15 | 215,38 | 246,50 |
| | 3 | 290,16 | 319,23 | 340,44 | 359,85 | 173,22 | 198,98 | 209,35 | 249,69 |
| | povp. | 300,07 | 324,66 | 345,91 | 364,65 | 169,90 | 204,31 | 214,81 | 246,84 |
| Pl. Visko- znost [PA S] | 1 | 9,93 | 10,07 | 9,12 | 8,93 | 7,51 | 8,28 | 7,92 | 8,27 |
| | 2 | 10,05 | 9,49 | 8,89 | 8,69 | 7,46 | 7,73 | 7,47 | 8,09 |
| | 3 | 9,47 | 8,68 | 8,36 | 8,49 | 6,65 | 7,42 | 7,34 | 7,99 |
| | povp. | 9,82 | 9,41 | 8,79 | 8,70 | 7,21 | 7,81 | 7,57 | 8,12 |
| RAZLEZ S POSEDOM [mm] | | 110 | 110 | 110 | 110 | 125 | 120 | 116 | 115 |
| RAZLEZ [mm] | | 200 | 200 | 195 | 190 | 220 | 205 | 220 | 205 |

| MEŠANICA | | MR1B | | | | MR1C | | | |
|----------------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| ČAS [min] | | 0 | 20 | 40 | 60 | 0 | 20 | 40 | 60 |
| SNMT [Pa] | 1 | 96,38 | 117,10 | 156,20 | 184,78 | 15,88 | 24,48 | 32,83 | 36,26 |
| | 2 | 96,95 | 120,57 | 158,08 | 181,65 | 17,49 | 22,63 | 31,36 | 40,88 |
| | 3 | | 123,69 | 159,69 | 181,75 | 16,97 | 25,33 | 29,45 | 39,48 |
| | povp. | 96,67 | 120,46 | 157,99 | 182,73 | 16,78 | 24,15 | 31,21 | 38,87 |
| Pl. Visko- znost [PA S] | 1 | 7,28 | 6,94 | 7,87 | 7,45 | 3,34 | 4,25 | 4,20 | 5,20 |
| | 2 | 7,09 | 6,93 | 7,37 | 7,66 | 3,65 | 4,64 | 3,88 | 4,75 |
| | 3 | | 6,98 | 7,14 | 7,28 | 3,85 | 4,80 | 4,37 | 4,89 |
| | povp. | 7,18 | 6,95 | 7,46 | 7,47 | 3,61 | 4,56 | 4,15 | 4,95 |
| RAZLEZ S POSEDOM [mm] | | 175 | 150 | 140 | 135 | 260 | 245 | 230 | 210 |
| RAZLEZ [mm] | | 270 | 255 | 230 | 220 | 320 | 310 | 300 | 290 |

| MEŠANICA | | ML1 | | | | ML1A | | | |
|----------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ČAS [min] | | 0 | 20 | 40 | 60 | 0 | 20 | 40 | 60 |
| SNMT [Pa] | 1 | 259,71 | 295,31 | 306,94 | 316,10 | 196,61 | 229,56 | 242,72 | 278,13 |
| | 2 | 256,04 | 284,71 | 299,30 | 302,36 | 202,80 | 230,91 | 242,91 | 276,28 |
| | 3 | 247,64 | 275,05 | 298,73 | 302,94 | 190,98 | 225,82 | 231,53 | 271,53 |
| | povp. | 254,47 | 285,02 | 301,66 | 307,13 | 196,80 | 228,76 | 239,05 | 275,31 |
| Pl. Visko- znost [PA S] | 1 | 8,75 | 9,39 | 8,11 | 7,78 | 10,06 | 9,30 | 8,36 | 8,99 |
| | 2 | 8,94 | 8,83 | 8,13 | 8,32 | 9,48 | 9,38 | 8,33 | 8,63 |
| | 3 | 8,15 | 8,36 | 7,80 | 7,62 | 9,15 | 8,65 | 7,92 | 8,37 |
| | povp. | 8,62 | 8,86 | 8,01 | 7,91 | 9,56 | 9,11 | 8,20 | 8,66 |
| RAZLEZ S POSEDOM [mm] | | 105 | 115 | 111 | 110 | 110 | 125 | 115 | 120 |
| RAZLEZ [mm] | | 200 | 215 | 210 | 205 | 215 | 220 | 225 | 220 |

| MEŠANICA | | ML1B | | | | ML1C | | | |
|---------------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| ČAS [min] | | 0 | 20 | 40 | 60 | 0 | 20 | 40 | 60 |
| SNMT [Pa] | 1 | 73,22 | 122,88 | 143,11 | 174,94 | 32,24 | 45,49 | 60,01 | 88,38 |
| | 2 | 76,19 | 125,79 | 150,06 | 178,59 | 32,25 | 44,94 | 63,95 | 91,85 |
| | 3 | 79,17 | 125,91 | 152,75 | 181,03 | 28,43 | 45,23 | 67,07 | 89,05 |
| | povp. | 76,20 | 124,86 | 148,64 | 178,19 | 30,97 | 45,22 | 63,68 | 89,76 |
| Pl. Visko znost [PA S] | 1 | 7,41 | 8,54 | 8,24 | 8,06 | 5,63 | 7,14 | 7,85 | 7,70 |
| | 2 | 7,74 | 8,06 | 7,59 | 7,65 | 5,19 | 6,48 | 7,39 | 7,37 |
| | 3 | 7,56 | 7,95 | 7,25 | 7,68 | 5,79 | 6,53 | 6,92 | 7,37 |
| | povp. | 7,57 | 8,18 | 7,69 | 7,80 | 5,54 | 6,72 | 7,39 | 7,48 |
| RAZLEZ S POSEDOM [mm] | | 175 | 155 | 145 | 140 | 240 | 235 | 195 | 185 |
| RAZLEZ [mm] | | 275 | 250 | 250 | 240 | 315 | 315 | 280 | 280 |

| MEŠANICA | | MRA1A | | | | MRA1B | | | |
|---------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ČAS [min] | | 0 | 20 | 40 | 60 | 0 | 20 | 40 | 60 |
| SNMT [Pa] | 1 | 182,28 | 259,22 | 314,52 | 347,50 | 203,02 | 260,60 | 319,99 | 381,20 |
| | 2 | 190,20 | 252,01 | 302,93 | 335,91 | 206,62 | 260,82 | 314,14 | 386,43 |
| | 3 | 198,71 | 249,31 | 302,13 | 334,42 | 207,16 | 254,22 | 309,25 | 376,78 |
| | povp. | 190,40 | 253,51 | 306,52 | 339,28 | 205,60 | 258,55 | 314,46 | 381,47 |
| Pl. Visko znost [PA S] | 1 | 6,81 | 7,76 | 8,00 | 7,62 | 5,78 | 5,74 | 5,24 | 5,91 |
| | 2 | 6,57 | 7,22 | 7,83 | 7,87 | 5,31 | 5,40 | 5,85 | 5,61 |
| | 3 | 6,26 | 6,58 | 7,11 | 7,37 | 4,95 | 5,37 | 5,31 | 5,06 |
| | povp. | 6,55 | 7,19 | 7,65 | 7,62 | 5,34 | 5,51 | 5,47 | 5,53 |
| RAZLEZ S POSEDOM [mm] | | 115 | 115 | 110 | 110 | 125 | 120 | 115 | 115 |
| RAZLEZ [mm] | | 220 | 215 | 210 | 205 | 230 | 220 | 215 | 210 |

| MEŠANICA | | MRA1C | | | | MG1A | | | |
|---------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ČAS [min] | | 0 | 20 | 40 | 60 | 0 | 20 | 40 | 60 |
| SNMT [Pa] | 1 | 188,84 | 255,01 | 296,66 | 337,15 | 157,34 | 132,98 | 126,41 | 123,14 |
| | 2 | 188,99 | 245,29 | 291,53 | 325,70 | 141,43 | 124,67 | 114,02 | 112,61 |
| | 3 | 191,63 | 239,98 | 286,63 | 319,08 | 133,00 | 120,56 | 110,79 | 110,47 |
| | povp. | 189,82 | 246,76 | 291,61 | 327,31 | 143,92 | 126,07 | 117,08 | 115,41 |
| Pl. Visko znost [PA S] | 1 | 6,64 | 7,34 | 6,56 | 6,89 | 5,11 | 4,02 | 3,03 | 3,11 |
| | 2 | 6,28 | 6,86 | 6,74 | 6,79 | 4,11 | 3,54 | 3,00 | 3,21 |
| | 3 | 6,27 | 6,46 | 6,19 | 6,33 | 3,56 | 3,03 | 2,65 | 2,59 |
| | povp. | 6,40 | 6,89 | 6,49 | 6,67 | 4,26 | 3,53 | 2,89 | 2,97 |
| RAZLEZ S POSEDOM [mm] | | 115 | 120 | 115 | 115 | 115 | 135 | 135 | 155 |
| RAZLEZ [mm] | | 220 | 215 | 210 | 205 | 225 | 245 | 240 | 255 |

| MEŠANICA | | MG1B | | | | MG1C | | | |
|---------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ČAS [min] | | 0 | 20 | 40 | 60 | 0 | 20 | 40 | 60 |
| SNMT [Pa] | 1 | 221,22 | 181,01 | 160,20 | 162,13 | 281,48 | 236,28 | 195,74 | 164,45 |
| | 2 | 193,64 | 166,78 | 151,67 | 146,11 | 256,82 | 212,11 | 180,56 | 154,84 |
| | 3 | 179,79 | 159,88 | 139,75 | 136,98 | 236,94 | 198,00 | 170,16 | 146,49 |
| | povp. | 198,22 | 169,23 | 150,54 | 148,41 | 258,41 | 215,46 | 182,16 | 155,26 |
| Pl. Visko znost [PA S] | 1 | 6,70 | 4,59 | 3,85 | 3,62 | 11,14 | 6,56 | 4,51 | 3,57 |
| | 2 | 5,65 | 4,39 | 3,52 | 3,44 | 7,64 | 5,60 | 4,27 | 3,46 |
| | 3 | 5,27 | 3,79 | 3,45 | 3,30 | 7,35 | 4,75 | 3,54 | 3,21 |
| | povp. | 5,87 | 4,25 | 3,60 | 3,45 | 8,71 | 5,64 | 4,11 | 3,41 |
| RAZLEZ S POSEDOM [mm] | | 110 | 115 | 125 | 130 | 105 | 110 | 120 | 125 |
| RAZLEZ [mm] | | 210 | 235 | 240 | 245 | 180 | 170 | 225 | 235 |

| MEŠANICA | | MV1A | | | | MV1B | | | |
|---------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ČAS [min] | | 0 | 20 | 40 | 60 | 0 | 20 | 40 | 60 |
| SNMT [Pa] | 1 | 215,91 | 244,07 | 248,27 | 261,57 | 142,93 | 147,14 | 149,69 | 150,29 |
| | 2 | 209,13 | 241,13 | 242,52 | 255,36 | 140,03 | 140,30 | 144,40 | 148,54 |
| | 3 | 195,72 | 234,09 | 232,37 | 246,29 | 134,01 | 137,13 | 137,46 | 141,83 |
| | povp. | 206,92 | 239,76 | 241,05 | 254,41 | 138,99 | 141,53 | 143,85 | 146,88 |
| Pl. Visko znost [PA S] | 1 | 8,77 | 9,46 | 8,74 | 8,13 | 6,43 | 6,21 | 5,51 | 5,32 |
| | 2 | 8,16 | 8,35 | 8,13 | 7,89 | 5,79 | 5,80 | 5,17 | 5,10 |
| | 3 | 7,72 | 7,94 | 8,21 | 7,62 | 5,63 | 5,53 | 5,04 | 4,81 |
| | povp. | 8,22 | 8,58 | 8,36 | 7,88 | 5,95 | 5,85 | 5,24 | 5,08 |
| RAZLEZ S POSEDOM [mm] | | 120 | 125 | 120 | 120 | 130 | 130 | 130 | 140 |
| RAZLEZ [mm] | | 220 | 225 | 220 | 220 | 230 | 240 | 240 | 250 |

| MEŠANICA | | MV1C | | | | MZ1A | | | |
|---------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| ČAS [min] | | 0 | 20 | 40 | 60 | 0 | 20 | 40 | 60 |
| SNMT [Pa] | 1 | 115,55 | 116,74 | 110,36 | 111,35 | 64,76 | 83,17 | 102,01 | 126,38 |
| | 2 | 110,81 | 111,74 | 107,17 | 113,84 | 67,65 | 82,57 | 101,62 | 122,99 |
| | 3 | 107,52 | 112,37 | 109,29 | 112,22 | 73,13 | 86,49 | 101,95 | 125,37 |
| | povp. | 111,30 | 113,61 | 108,94 | 112,47 | 68,51 | 84,07 | 101,86 | 124,92 |
| Pl. Visko znost [PA S] | 1 | 5,38 | 4,82 | 4,03 | 4,29 | 8,10 | 8,28 | 7,89 | 7,70 |
| | 2 | 5,17 | 4,36 | 4,24 | 4,08 | 7,18 | 7,19 | 6,99 | 7,49 |
| | 3 | 4,60 | 3,88 | 3,87 | 3,78 | 7,00 | 6,75 | 6,79 | 7,28 |
| | povp. | 5,05 | 4,35 | 4,05 | 4,05 | 7,43 | 7,41 | 7,22 | 7,49 |
| RAZLEZ S POSEDOM [mm] | | 145 | 160 | 155 | 160 | 170 | 165 | 155 | 150 |
| RAZLEZ [mm] | | 260 | 260 | 260 | 255 | 270 | 265 | 265 | 250 |

| MEŠANICA | | MZ1B | | | | MZ1C | | | |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| ČAS [min] | | 0 | 20 | 40 | 60 | 0 | 20 | 40 | 60 |
| SNMT [Pa] | 1 | 40,70 | 75,92 | 103,59 | 122,65 | 25,80 | 49,89 | 72,41 | 87,69 |
| | 2 | 46,18 | 75,04 | 105,07 | 126,10 | 29,94 | 51,84 | 75,97 | 89,87 |
| | 3 | 46,30 | 75,36 | 107,69 | 124,42 | 29,79 | 51,16 | 76,59 | 84,92 |
| | povp. | 44,39 | 75,44 | 105,45 | 124,39 | 28,51 | 50,96 | 74,99 | 87,50 |
| Pl. Visko znost [PA S] | 1 | 6,43 | 7,62 | 8,05 | 7,73 | 6,77 | 7,68 | 8,67 | 7,59 |
| | 2 | 5,74 | 7,15 | 7,38 | 7,14 | 5,97 | 7,11 | 7,85 | 6,93 |
| | 3 | 6,37 | 6,83 | 6,91 | 7,07 | 5,77 | 7,23 | 7,67 | 6,73 |
| | povp. | 6,18 | 7,20 | 7,45 | 7,31 | 6,17 | 7,34 | 8,06 | 7,08 |
| RAZLEZ S POSEDOM [mm] | | 190 | 160 | 150 | 140 | 215 | 185 | 155 | 150 |
| RAZLEZ [mm] | | 295 | 270 | 255 | 245 | 300 | 290 | 260 | 260 |

| MEŠANICA | | MM1A | | | | MM1B | | | |
|---------------------------------|--------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| ČAS [min] | | 0 | 20 | 40 | 60 | 0 | 20 | 40 | 60 |
| SNMT [Pa] | 1 | 63,67 | 118,03 | 162,86 | 212,22 | 177,35 | 251,49 | 310,41 | 354,04 |
| | 2 | 69,64 | 119,07 | 160,25 | 211,50 | 181,11 | 249,37 | 308,05 | 358,33 |
| | 3 | 76,21 | 122,02 | 163,91 | 212,89 | 190,86 | 245,54 | 307,31 | 351,20 |
| | povp. | 69,84 | 119,71 | 162,34 | 212,20 | 183,11 | 248,80 | 308,59 | 354,53 |
| Pl. Visko znost [PA S] | 1 | 7,44 | 7,28 | 7,81 | 8,19 | 8,21 | 6,95 | 6,16 | 5,79 |
| | 2 | 7,19 | 7,05 | 7,37 | 8,01 | 7,57 | 6,52 | 5,99 | 5,20 |
| | 3 | 6,97 | 6,67 | 6,64 | 7,26 | 6,95 | 6,47 | 5,34 | 5,24 |
| | povp. | 7,20 | 7,00 | 7,27 | 7,82 | 7,58 | 6,64 | 5,83 | 5,41 |
| RAZLEZ S POSEDOM [mm] | | 180 | 150 | 140 | 125 | 120 | 110 | 110 | 110 |
| RAZLEZ [mm] | | 265 | 245 | 235 | 210 | 215 | 200 | 195 | 185 |

| MEŠANICA | | MM1C | | | | MT1A | | | |
|---------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|---------------|--------------|--------------|---------------|---------------|
| ČAS [min] | | 0 | 20 | 40 | 60 | 0 | 20 | 40 | 60 |
| SNMT [Pa] | 1 | 31,20 | 70,12 | 110,46 | 138,83 | 28,08 | 70,41 | 110,98 | 159,84 |
| | 2 | 37,07 | 72,46 | 111,48 | 138,94 | 32,00 | 71,30 | 113,32 | 161,74 |
| | 3 | 39,50 | 75,19 | 107,67 | 139,81 | 35,90 | 73,05 | 122,11 | 165,40 |
| | povp. | 35,93 | 72,59 | 109,87 | 139,19 | 31,99 | 71,58 | 115,47 | 162,33 |
| Pl. Visko znost [PA S] | 1 | 7,80 | 8,16 | 8,60 | 8,63 | 6,20 | 7,54 | 8,79 | 9,22 |
| | 2 | 7,00 | 8,10 | 8,50 | 8,29 | 6,86 | 7,54 | 8,25 | 8,96 |
| | 3 | 7,07 | 7,92 | 8,30 | 8,58 | 6,96 | 7,39 | 7,61 | 8,48 |
| | povp. | 7,29 | 8,06 | 8,46 | 8,50 | 6,68 | 7,49 | 8,22 | 8,89 |
| RAZLEZ S POSEDOM [mm] | | 195 | 180 | 165 | 145 | 220 | 175 | 159 | 145 |
| RAZLEZ [mm] | | 285 | 270 | 255 | 240 | 295 | 260 | 240 | 220 |

| MEŠANICA | | MT1B | | | | MT1C | | | |
|---------------------------------|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| ČAS [min] | | 0 | 20 | 40 | 60 | 0 | 20 | 40 | 60 |
| SNMT [Pa] | 1 | 179,18 | 512,14 | 796,98 | 858,74 | 20,29 | 30,97 | 43,86 | 52,17 |
| | 2 | 211,34 | 544,83 | 748,96 | 835,00 | 21,88 | 28,68 | 40,73 | 54,74 |
| | 3 | 248,00 | 585,25 | 735,76 | | 26,07 | 27,65 | 37,12 | 55,68 |
| | povp. | 212,84 | 547,41 | 760,57 | 846,87 | 22,75 | 29,10 | 40,57 | 54,20 |
| Pl. Visko znost [PA S] | 1 | 12,49 | 9,32 | 3,40 | 1,11 | 3,83 | 3,56 | 3,46 | 4,42 |
| | 2 | 11,82 | 6,43 | 4,05 | 3,88 | 3,99 | 4,12 | 3,47 | 3,68 |
| | 3 | 10,88 | 5,60 | 3,73 | | 3,37 | 4,49 | 4,29 | 3,60 |
| | povp. | 11,73 | 7,12 | 3,73 | 2,49 | 3,73 | 4,05 | 3,74 | 3,90 |
| RAZLEZ S POSEDOM [mm] | | 120 | 110 | 105 | 105 | 285 | 270 | 250 | 225 |
| RAZLEZ [mm] | | 210 | 175 | 150 | 145 | 325 | 320 | 315 | 290 |