

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:

Klepec, J. 2013. Vpliv vodocementnega razmerja in količine superplastifikatorja na reološke lastnosti svežih cementnih malt. Diplomaska naloga. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo. (mentorica Bokan-Bosiljkov, V., somentor Hočevar, A.): 63 str.

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:

Klepec, J. 2013. Vpliv vodocementnega razmerja in količine superplastifikatorja 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 Hočevar, A.): 63 pp.

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 ŠTUDIJ
GRADBENIŠTVA
SMER OPERATIVNO
GRADBENIŠTVO**

Kandidat:

JOŽEF KLEPEC

**VPLIV VODOCEMENTNEGA RAZMERJA IN
KOLIČINE SUPERPLASTIFIKATORJA NA REOLOŠKE
LASTNOSTI SVEŽIH CEMENTNIH MALT**

Diplomska naloga št.: 485/SOG

**INFLUENCE OF WATER - TO - CEMENT RATION AND
SUPERPLASTICIZER CONTENT ON RHEOLOGICAL
PROPETRIES OF FRESH CEMENT MORTARS**

Graduation thesis No.: 485/SOG

Mentorica:

izr. prof. dr. Violeta Bokan-Bosiljkov

Predsednik komisije:

doc. dr. Tomo Cerovšek

Somentor:

Andraž Hočevar, univ. dipl. inž. grad.

Član komisije:

prof. dr. Boštjan Brank

Ljubljana, 26. 04. 2013

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA

Stran z napako	Vrstica z napako	Namesto	Naj bo
-----------------------	-------------------------	----------------	---------------

IZJAVA

Podpisani Jožef Klepec izjavljam, da sem avtor diplomskega dela z naslovom »**Vpliv vodocementnega razmerja in količine superplastifikatorja na reološke lastnosti sveže cementne malte**«.

Izjavljam, da dovoljujem objavo elektronske različice v repozitoriju UL FGG.

Izjavljam, da je elektronska različica v vsem enaka tiskani različici.

Krasinec, 10.4.2013

(Podpis kandidata/-ke)

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	691.3.001.41(043.2)
Avtor:	Klepec Jožef
Mentor:	izr. prof. dr. Violeta Bokan Bosiljkov, univ. dipl. ing. grad.
Somentor:	Andraž Hočevar, univ. dipl. ing. grad.
Naslov:	Vpliv vodocementnega razmerja in količine superplastifikatorja na reološke lastnosti sveže cementne malte
Tip dokumenta:	Diplomska naloga – visokošolski študij
Obseg in oprema:	63 str., 12 sl., 20 pregl., 25 graf.
Ključne besede:	Sveža cementna malta, cementni kompoziti, razlez, reologija svežih cementnih malt, vodocementno razmerje, superplastifikator

Izvleček

V sklopu diplomske naloge smo opravili preiskave na svežih cementnih maltah, katerih glavni namen je bil preučiti kako vodocementno razmerje in količina superplastifikatorja vplivata na reološke lastnosti svežih cementnih malt. Na podlagi sestave betonov, ki so bile določene in preizkušene v okviru drugih diplomskih nalog, smo s pomočjo metode CEM določili sestavo štirih referenčnih malt, ostale mešanice pa smo dobili s korigiranjem referenčnih sestav, tako da smo spreminjali količino izbrane komponente (vode in superplastifikatorja). Vse mešanice so bile sestavljene iz agregata, cementa, vode in kemijskih dodatkov. Kot dodatek smo uporabili superplastifikator in aerant, uporabili pa smo tudi dve različni vrsti cementa. Raziskave smo opravili s pomočjo standardizirane metode določanja razleza na stresalni mizici za sveže malte in s pomočjo reometra ConTec Viscometer 5. Največ pozornosti smo namenili raziskavi z reometrom, s pomočjo katere smo lahko potrdili ugotovitve o vplivu vodocementnega razmerja in količine superplastifikatorja na reološke lastnosti svežih cementnih malt, podane v literaturi. Na koncu smo rezultate preiskav z reometrom primerjali z rezultati razleza na stresalni mizici.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT

UDC: 691.3.001.41(043.2)
Author: Klepec Jožef
Supervisor: Assoc. Prof. Violeta Bokan Bosiljkov, Ph.D.
Cosupervisor: Andraž Hočevar, B.Sc.
Title: Influence of water-to-cement ratio and superplasticizer content on rheological properties of fresh cement mortars
Document type: Graduation Thesis – Higher professional studies
Notes: 63 p., 12 fig., 20 tab., 25 graph.
Keywords: Fresh cement mortar, cement composites, rheology of fresh cement mortars, water-to-cement ratio, superplasticizer,

Abstract

In framework of this thesis we carried out tests on fresh cement mortars. The main purpose was to find out how the water-to-cement ratio and superplasticizer content determine rheological characteristics of fresh cement mortar. With the use of the CEM method we designed four reference mortar mixtures, based on the composition of concretes that had already been determined and analyzed in some other thesis. Additional mixtures were then made by modifying the reference mortars, composition in such way that the content of water or superplasticizer was varied. All mixtures were made of aggregate, cement, water and admixtures. As admixtures we used superplasticizer and air entraining agent. We also used two different types of cement. The tests were carried out using standard method of flow table tests for fresh mortars and non-standard measurement of rheological properties by using rheometer ConTec Viscometer 5. The main emphasis of the research work was on rheological measurements and the appertaining analyses of the obtained rheological parameters. Based on the analyses carried out we were able to confirm the findings from literature about the influence of water-to-cement ratio and superplasticizer content on rheological properties of fresh cement mortars. Finally, rheological parameters were compared with the results of flow table tests.

ZAHVALA

Za vso strokovno pomoč in vodenje pri izdelavi diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorici izr. prof. dr. Violeti Bokan Bosiljkov univ. dipl. inž. grad. ter somentorju Andražu Hočvarju univ. dipl. inž. grad. Posebej bi se zahvalil tudi Katedri za preizkušanje materialov in konstrukcij, ki mi je omogočila opravljanje preiskav v Konstrukcijsko – prometnem laboratoriju.

Zahvalil bi se svoji družini, ki me je celoten čas študija podpirala in me spodbujala, da sem dosegel svoj cilj. Rad bi se zahvalil tudi vsem svojim kolegom in sošolcem, ki so mi v vseh letih študija nudili pomoč, podporo in razumevanje. Največja zahvala pa gre moji ženi, ki mi je vedno stala ob strani in me spodbujala.

Hvala!

KAZALO VSEBINE

STRAN ZA POPRAVKE, ERRATA.....	I
IZJAVE	II
BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK	III
BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION AND ABSTRACT	IV
ZAHVALA.....	V
1 UVOD	1
2 CEMENTNI KOMPOZITI	3
2.1 Sestavine cementnih kompozitov	3
2.1.1 Agregat.....	3
2.1.1.1 Pridobivanje agregata.....	4
2.1.1.2 Granulometrijska sestava	4
2.1.1.3 Pridobivanje agregata v Sloveniji	6
2.1.1.4 Kakovost agregata.....	6
2.1.1.5 Vlažnost agregata.....	7
2.1.2 Voda	8
2.1.3 Cement.....	9
2.1.3.1 Proizvodnja cementa	10
2.1.3.2 Sestava cementa.....	11
2.1.3.3 Lastnosti cementa	12
2.1.3.4 Hidratacija cementa.....	13
2.1.3.5 Vrste cementov in označevanje.....	14
2.1.4 Dodatki	15
2.1.4.1 Mineralni dodatki	15
2.1.4.2 Kemijski dodatki.....	16
2.2 Lastnosti svežih cementnih kompozitov	19
2.3 Preizkušanje svežih cementnih kompozitov	21
2.4 Osnovne lastnosti cementnih kompozitov v strjenem stanju	23
2.4.1 Trdnost	24
2.4.2 Trajnost in volumska obstojnost	25
3 REOLOGIJA SVEŽIH CEMENTNIH KOMPOZITOV	26
3.1 Uvod v reologijo.....	26
3.2 Vpliv sestavin cementnih kompozitov na reološke lastnosti mešanic	28

3.3	Reometri in principi merjenja	29
3.3.1	Koaksialni valjasti reometri.....	29
3.3.2	Reometri z vzporednima ploščama.....	30
3.3.3	Mešalni reometri z rotorjem.....	31
4	PROJEKTIRANJE MEŠANICE CEMENTNIH KOMPOZITOV	32
4.1	Splošno	32
4.2	Metoda CEM	32
5	LASTNE PREISKAVE NA SVEŽIH CEMENTNIH KOMPOZITIH	35
5.1	Uvod in namen preiskav	35
5.2	Uporabljeni materiali	35
5.2.1	Agregat.....	35
5.2.2	Voda.....	36
5.2.3	Cement.....	36
5.2.4	Superplastifikator	37
5.2.5	Aerant.....	37
5.3	Postopki modifikacije	38
5.3.1	Manj vode.....	38
5.3.1.1	Vpliv V/C razmerja na lastnosti svežih cementnih kompozitov	38
5.3.2	Manj superplastifikatorja	39
5.4	Postopek priprave in sestava receptur cementnih kompozitov	39
5.4.1	Sestava receptur.....	39
5.4.2	Postopek mešanja.....	41
5.5	Metode preiskav.....	42
5.5.1	Določanje konsistence svežih cementnih kompozitov z razlezom.....	42
5.5.2	Preizkus z reometrom	44
6	REZULTATI.....	47
6.1	Mešanice s spreminjanjem V/C razmerja.....	48
6.2	Mešanice s spreminjanjem količine superplastifikatorja.....	57
7	ZAKLJUČEK.....	59
VIRI.....		61

KAZALO SLIK

Slika 1: Shematski prikaz sejanja agregata in pojasnilo pojmov [1].....	5
Slika 2: Stopnje vlage v agregatu: (a) osušen v peči, (b) zračno suh, (c) zasičen z vlago in (d) moker [1].....	8
Slika 3: Shematski prikaz proizvodnje cementa [1].....	10
Slika 4: Sistem označevanja cementov po standardu SIST EN 197-1 [1]	14
Slika 5: ConTec Viscometer 5: (levo) slika reometra v Konstrukcijsko – prometnem laboratoriju na FGG, (desno) slika posameznih sestavnih delov reometra [17].....	30
Slika 6: Reometer BTRHEOM [18]	30
Slika 7: ICAR Rheometer [19].....	31
Slika 8: Planetarni mešalec v Konstrukcijsko - prometnem laboratoriju na FGG.....	42
Slika 9: Stresalni mizi za preizkus z razlezom za malte (levo) in betone (desno) [26, 27].....	43
Slika 10: Dimenzije stresalnih miz za preizkus z razlezom [25, 28].....	43
Slika 11: Potek preizkusa z razlezom	44
Slika 12: Potek preizkusa z reometrom	45

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 1: Vpliv lastnosti agregata na lastnosti betona. [3]	6
Preglednica 2: Zahteve za predhoden pregled vode [4]	9
Preglednica 3: Najvišje še dovoljene vsebnosti škodljivih snovi v vodi [4]	9
Preglednica 4: Trdnostni razredi cementov [6]	13
Preglednica 5: Razredi preizkusnih metod svežih cementnih kompozitov po Tattersallu [13]	23
Preglednica 6: Kategorije preizkusnih metod svežih cementnih kompozitov po NIST [13] ...	23
Preglednica 7: Karakteristike cementa CEM I 42,5 R [5].....	36
Preglednica 8: Karakteristike cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R [21]	36
Preglednica 9: Karakteristike hiperplastifikatorja [22]	37
Preglednica 10: Karakteristike aeranta [22].....	38
Preglednica 11: Sestava mešanic mr1	40
Preglednica 12: Sestava mešanic mp1	40
Preglednica 13: Sestava mešanic ma1	41
Preglednica 14: Sestava mešanic md	41
Preglednica 15: Število obratov mešalca RILEM-CEN [23].....	42
Preglednica 16: Razlika med pripomočki za malto in beton [24, 25]	43
Preglednica 17: Rezultati pri mešanicah mr1	48
Preglednica 18: Rezultati pri mešanicah mp1	51
Preglednica 19: Rezultati pri mešanicah ma1	54
Preglednica 20: Rezultati pri mešanicah md z referenčno malto mp1e.....	57

KAZALO GRAFIKONOV

Grafikon 1: Mejne krivulje območja primernosti agregata [1].....	5
Grafikon 2: Vpliv vlažnosti okolja na pridobivanje trdnosti [1].....	24
Grafikon 3: Odvisnost trdnosti od vodocementnega razmerja [1].....	25
Grafikon 4: Modeli za opis tekočin [15].....	28
Grafikon 5: Vpliv posameznih sestavin na reološke lastnosti svežih cementnih kompozitov [14].....	29
Grafikon 6: Korelacijska krivulja med razlezom CEM in posedom betona [19].....	34
Grafikon 7: Zrnnavostna krivulja agregata 0/2.....	35
Grafikon 8: Vpliv vode na vrednosti τ_0/η [14].....	39
Grafikon 9: Primer momentno-hitrostnega diagrama, ki ga izriše reometer ob vsakem preizkusu.....	45
Grafikon 10 (levo): Strižna napetost na meji tečenja in dejanski razlez ob spreminjanju V/C razmerja pri mešanicah mr1.....	49
Grafikon 11 (desno): Koeficient viskoznosti ob spreminjanju V/C razmerja pri mešanicah mr1.....	49
Grafikon 12: Primer dobrih rezultatov meritev, ki so prikazane na T-N diagramu.....	49
Grafikon 13: Rezultati meritev mešanice mr15 (levo) in popravljene rezultati meritev (desno).....	50
Grafikon 14: Rezultati meritev mešanice mr110 (levo) in popravljene rezultati meritev (desno).....	50
Grafikon 15: Rezultati meritev mešanice mr115 (levo) in popravljene rezultati meritev (desno).....	50
Grafikon 16 (levo): Strižna napetost na meji tečenja, razlez s posedom (rumena črta) in dejanski razlez (modra črta) ob spreminjanju V/C razmerja pri mešanicah mp1.....	52
Grafikon 17 (desno): Koeficient viskoznosti ob spreminjanju V/C razmerja pri mešanicah mp1.....	52
Grafikon 18: Rezultati meritev mešanice mp110 (levo) in popravljene rezultati meritev (desno).....	53
Grafikon 19 (levo): Strižna napetost na meji tečenja in dejanski razlez ob spreminjanju V/C razmerja pri mešanicah ma1.....	55
Grafikon 20 (desno): Koeficient viskoznosti ob spreminjanju V/C razmerja pri mešanicah ma1.....	55
Grafikon 21 (levo): Strižna napetost na meji tečenja ob spreminjanju V/C razmerja -pri mešanicah mr1, mp1 in ma1.....	55

Grafikon 22 (desno): Koeficient viskoznosti ob spreminjanju V/C razmerja pri mešanicah mr1, mp1 in ma1	55
Grafikon 23: Dejanski razlezi ob spreminjanju V/C razmerja pri mešanicah mr1, mp1 in ma1	56
Grafikon 24 (levo): Strižna napetost na meji tečenja in razlez s posedom ob spreminjanju količine superplastifikatorja pri mešanicah md z referenčno malto mp1e.....	58
Grafikon 25 (desno): Koeficient viskoznosti ob spreminjanju količine superplastifikatorja pri mešanicah md z referenčno malto mp1e.....	58

OKRAJŠAVE IN SIMBOLI

Oznaka	Razlaga
CEM	Betonu ekvivalentna malta (concrete equivalent mortar)
V/C	Vodocementno razmerje
NIST	National Institute of Standards and Technology
P	Plastifikator
SP	Superplastifikator
HP	Hiperplastifikator
f_c	Tlačna trdnost
α_t	Koeficient linearnega toplotnega raztezka betona
τ	Strižna napetost
γ'	Strižna hitrost
η	Koeficient viskoznosti
τ_0	Strižna napetost na meji tečenja
T	Navor (upor proti striženju)
N	Hitrost vrtenja
H	Koeficient viskoznosti (odpornost proti naraščajoči hitrosti gibanja)
G	Navor na meji tečenja (sila, ki je potrebna za začetek gibanja)
R^2	Korelacijski faktor
T-N	Momentno-hitrostni diagram
SCC	Samozgoščevalni beton (self-compacting concrete)
R_0	Polmer zunanjega valja reometra
R_i	Polmer notranjega valja reometra
h	Višina malte na rebrih valja reometra
t_0	Čas od dodatka vode v mešanico do prve preiskave na reometru
t	Skupni čas od dodatka vode v mešanico do konca zadnje preiskave na reometru

1 UVOD

Cementni kompoziti so zaradi svojih pozitivnih lastnosti največkrat uporabljeni gradbeni materiali na svetu. Predvsem je tukaj mišljen beton, ki je v svežem stanju zaradi svoje sorazmerno lahke obdelave in vgradljivosti sposoben prevzeti raznorazne oblike opaža, v strjenem stanju pa ima odlično tlačno trdnost, prostorninsko obstojnost, obrabnost, v nekaterih primerih pa tudi vodotesnost. Ključnega pomena za uporabo je zagotovo tudi njegova ekonomska dostopnost. V osnovi je beton kompozit cementne paste in agregata, v zadnjem času se mu dodajajo tudi različni mineralni in kemijski dodatki, ki izboljšajo njegove lastnosti bodisi v svežem ali v strjenem stanju.

Čeprav so cementni kompoziti že dolgo poznani gradbeni materiali, se je v preteklosti veliko pozornosti namenjal predvsem lastnostim in raziskavam strjenih cementnih kompozitov. Danes pa se daje vse večji pomen tudi raziskavam cementnih kompozitov v svežem stanju. Čeprav so bile v preteklosti že razvite preizkusne metode za sveže cementne kompozite, ki so se tudi uveljavile v praksi, njihova uporaba postaja omejena, saj so bile te metode razvite za običajne cementne kompozite. V zadnjih letih so se namreč pričele uporabljati nove vrste cementnih kompozitov; samozgoščevalni betoni, lahko-vgradljivi betoni in betoni z različnimi dodatki, npr. elektrofiltrski pepel, apnenčeva moka, žindra, polimeri. Za tovrstne cementne kompozite so bile razvite in se še razvijajo nove preizkusne metode. Prednostni cilj novih metod je predvsem to, da bi obstoječo kombinacijo metod lahko nadomestili z eno samo metodo. Temu se zaenkrat najbolj približa metoda merjenja reoloških lastnosti svežega betona ali malte z reometrom, ki smo jo uporabili tudi v naših preiskavah.

Cementni kompoziti, ki smo jih pripravili za potrebe preizkusov, so bili projektirani na podlagi sestav betonov, ki sta jih Bojan Kresal in Nejc Andrejka že preizkusila v okviru svojih diplomskih nalog. Pri projektiranju maltnih mešanic smo uporabili metodo CEM (concrete equivalent mortar), katere namen je zmanjšanje količine betonskih mešanic za preizkušanje cementnih mešanic z dodatki. Beton nadomestimo z ekvivalentno malto, ki ima še zmeraj nekatere podobnosti z izhodiščnim betonom, s tem pa dosežemo bistveno zmanjšanje količin materialov v fazi projektiranja, poleg tega pa še olajšan postopek mešanja, vzorčenja in preizkušanja, ki ga obenem pocenimo in skrajšamo.

S CEM metodo smo dobili osnovne mešanice malt, ostale mešanice pa smo dobili s korigiranjem osnovnih sestav, tako da smo spreminjali količino posameznih komponent, največkrat vode in superplastifikatorja.

V diplomskem delu sem se posvetil študiju vpliva spreminjanja vodocementnega razmerja in količine superplastifikatorja na reološke lastnosti svežih cementnih kompozitov. Za ta namen smo izbrali dve vrsti preiskav. Prva preiskava je bila preiskava z razlezom na stresalni mizici, v skladu s standardom SIST EN 1015-3, drugo preiskavo pa smo izvedli s pomočjo koaksialnega valjastega reometra ConTec Viscometer 5, ki ima prirejen merilni sistem za merjenje na maltah. Dobljene rezultate sem nato podal v preglednicah ter grafikonih in jih ovrednotil.

2 CEMENTNI KOMPOZITI

Cementni kompoziti so gradbeni proizvodi, ki so sestavljeni iz agregata, cementa, vode in dodatkov. Z vnašanjem dodatkov izboljšujemo nekatere lastnosti cementnih kompozitov kot so: trajnost, izolativnost, obrabno odpornost, mehanske lastnosti, vodoneprepustnost, zmrzlinško odpornost, konsistenco... Največjo prostornino cementnih kompozitov zavzema agregat, ki predstavlja od 60 do 75 % celotne prostornine kompozita. Ostalih 25 do 40 % predstavlja cementna pasta, ki je sestavljena iz cementa, vode in različnih dodatkov (7 – 15 % cementa, 14 – 21 % vode). Iz cementne paste preko hidratacije in strjevanja nastane cementni kamen. [1]

2.1 Sestavine cementnih kompozitov

Danes imamo na trgu na voljo ogromno različnih vrst cementnih kompozitov. Delež posameznih komponent je v veliki meri odvisen od želenih lastnosti cementnih kompozitov v svežem ali strjenem stanju.

2.1.1 Agregat

Agregat je sipek material, ki ga v glavnem sestavljajo groba in fina zrna, nekaj pa je tudi zrnpraškastega materiala. Pravilna izbira vrste in kvalitete agregata močno vpliva na lastnosti cementnih kompozitov tako v svežem kot v strjenem stanju. Pri večini betonov agregat namreč zavzema od 60 do 70 % njegove prostornine (70 do 85 % mase), prav zaradi tega pa je izbira ustreznega agregata ključna tudi pri ekonomskem vidiku. [2]

Mineralni agregat lahko v splošnem opišemo kot trd, inerten, čist material, ki ga vgrajujemo v cementne kompozite. Njegova vloga je, da [1]:

- znižuje ceno betona (postopek pridobivanja ni drag),
- znižuje hidratacijsko temperaturo cementnim kompozitom (običajno je kemično inerten in deluje kot odvajalec toplote nastale s hidratacijo cementa),
- zmanjšuje krčenje cementnih kompozitov (na večino mineralnih agregatov voda ne deluje, zato lahko omejujejo krčenje cementne paste med hidratacijo in zaradi izsuševanja, ob primerni granulometrijski sestavi),

- ustvarja koheziven cementni kompozit, ki ga je lahko obdelovati v svežem stanju (če je granulometrijska sestava ustrezna).

Agregat lahko služi tudi za [1]:

- uravnavanje površinske trdote cementnih kompozitov (mineralni agregati so večinoma bolj odporni na obrus kot cementni kamen),
- ustvarjanje barvitosti površine cementnih kompozitov ali sposobnosti, da odbija svetlobo,
- kontrolo gostote,
- zvišanje požarne odpornosti cementnih kompozitov.

2.1.1.1 Pridobivanje agregata

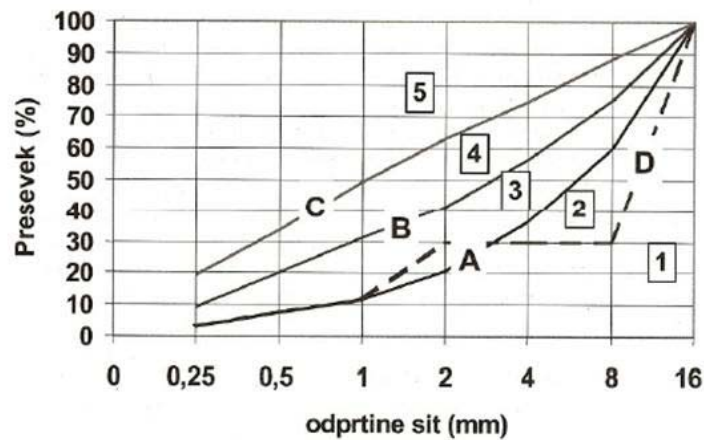
Za pridobivanje agregata poznamo tri načine. Prvi način je pridobivanje agregata v gramoznicah ali peskokopih po mokrem postopku. Pri takem načinu dobimo prodnati agregat, za katerega je značilno, da ima zaobljena zrna različnih oblik. Drugi način je pridobivanje agregata v kamnolomih po suhem postopku, pri katerem dobimo drobljeni agregat oglatih oblik. Tretji postopek je pridobivanje agregata v industrijskih obratih s temperaturno obdelavo, drobljenjem, rezanjem ali sekanjem. [3]

2.1.1.2 Granulometrijska sestava

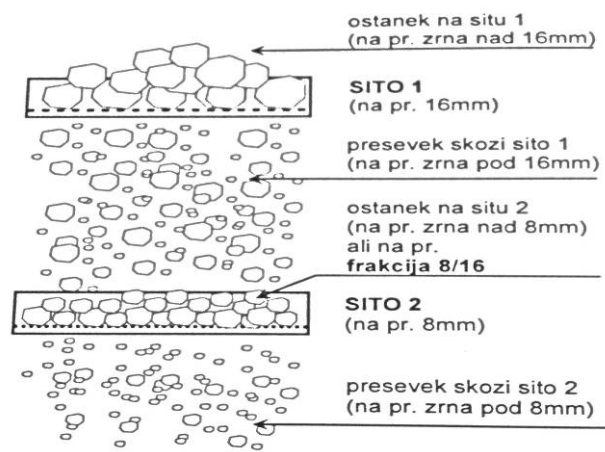
Granulometrijsko sestavo agregata določimo s pomočjo sejalne analize. Če je sestava ustrezna, nam omogoča izdelavo svežih cementnih kompozitov z ustreznimi plastičnimi lastnostmi (vgradljivost, kohezija, odpornost na izločanje vode) ter strjenih cementnih kompozitov z ustreznimi lastnostmi (trdnost, trajnost in izgled površine). Takšen agregat dobro zapolni celoten prostor v cementnih kompozitih in tako prepreči segregacijo svežih cementnih kompozitov.

Granulometrijsko sestavo predpisujejo standardi v obliki mejnih krivulj (Grafikon 1), znotraj katerih naj bi potekala tudi krivulja izbranega agregata. Krivulje predstavljajo presevek agregatnih zrn skozi določeno sito v procentih. Količino agregata, ki pade skozi zgornje sito in ostane na spodnjem situ, imenujemo frakcija (primer: frakcija 8/16 (Slika 1)). Pri posebnih vrstah cementnih kompozitov lahko določene frakcije tudi izpustimo ali pa uporabimo samo omejeno število frakcij, vendar pa je takšne modifikacije potrebno izvesti premišljeno in jih

spremljati s poskusi, da ne pride do segregacije svežih cementnih kompozitov ali do znatnih sprememb mehanskih lastnosti strjenih cementnih kompozitov. [1]



Grafikon 1: Mejne krivulje območja primernosti agregata [1]



Slika 1: Shematski prikaz sejanja agregata in pojasnilo pojmov [1]

V praksi so frakcije razdeljene na drobne (0/1, 0/2 ali 0/4) in grobe (4/8, 8/16, 16/32 ...). S temi frakcijami pripravimo mešanice, ki se uporabljajo v cementnih kompozitih [3]:

- 0/2 mm in 0/4 mm (malte),
- 0/8 mm,
- 0/16 mm,
- 0/32 mm,
- 0/45 mm in 0/63 mm (redko uporabljene).

2.1.1.3 Pridobivanje agregata v Sloveniji

V Sloveniji pridobivamo tako drobljen kot prodat agregat. Drobljen agregat je v veliki večini apnenčastega ali dolomitnega izvora, nekaj pa je tudi eruptivnega agregata in se pridobiva v kamnolomih (Kamna Gorica, Zagaj ...). Prodati agregat se pri nas pridobiva v porečjih večjih rek. V porečju Mure in Drave je večinoma silikatnega izvora, medtem ko je v porečju Save in Soče večinoma karbonatnega izvora.

Prodati agregati so v gradbeništvu zelo zaželeni, saj iz njih lahko pripravimo vse vrste cementnih kompozitov. Po lastnostih so zelo blizu tudi drobljeni apnenci. Drobljeni dolomitni agregati žal pogosto odstopajo od potrebne kakovosti zaradi prevelike vsebnosti finih delcev, prevelike drobljivosti, male žilavosti in slabše odpornosti proti zmrzovanju. Tako so po kvaliteti primerljivi z apnenčevim agregatom samo v nekaterih kamnolomih. [3]

2.1.1.4 Kakovost agregata

Pri kakovosti agregata govorimo o vsebnosti različnih primesi, ki jih agregat lahko vsebuje in z njimi negativno vpliva na lastnosti cementnih kompozitov [1]:

- praškasti delci (< 0,075 mm): zaradi velike specifične površine moramo dodati večjo količino vode,
- organske primesi: po naravi so kisle in tako zmanjšujejo alkalnost cementne paste, ki je nujna za proces hidratacije,
- soli: pospešujejo zgodnjo fazo hidratacije cementa in povzročajo korozijo armature,
- snovi, ki reagirajo: posamezni minerali in sulfidi.

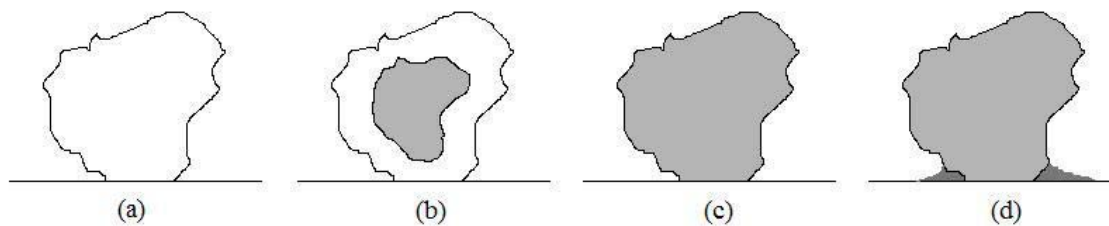
Preglednica 1: Vpliv lastnosti agregata na lastnosti betona. [3]

Lastnosti betona	Relevantne lastnosti agregata
Odpornost proti zmrzovanju/tajanju	Obstojnost
	Poroznost
	Struktura por
	Prepustnost
	Stopnja zasičenosti
	Natezna trdnost
	Tekstura in struktura
Odpornost proti sušenju in vlaženju	Zamuljenost in glineni delci
	Struktura por

Odpornost proti sušenju in vlaženju	Modul elastičnosti
Odpornost na povišane temperature	Termični koeficient ekspanzije
Erozijska odpornost	Trdnost
Alkalno-agregatna reakcija	Minerološko-patrografska sestava
Trdnost	Trdnost
	Tekstura
	Čistost
	Oblika zrn
	Največje zрно
Krčenje	Modul elastičnosti
	Oblika zrn
	Granulometrijska sestava
	Čistost
	Največje zрно
	Zamuljenost in glineni delci
Termični koeficient ekspanzije	Termični koeficient ekspanzije
	Modul elastičnosti
Termična prevodnost	Termična prevodnost
Specifična toplotna kapaciteta	Specifična toplotna kapaciteta
Prostorninska masa	Gostota
	Oblika zrn
	Granulometrijska sestava
	Največje zрно
Modul elastičnosti	Modul elastičnosti
	Poissonov koeficient
Drsnost	Polirnost
Ekonomičnost	Oblika zrn
	Granulometrijska sestava
	Največje zрно
	Potrebni obseg predelave
	Razpoložljivi izbor agregatov

2.1.1.5 Vlažnost agregata

V večini primerov agregat že vsebuje določeno količino vlage. Pomembno je, da ugotovimo v kolikšni meri ta vlaga vpliva na vgradljivost betona in spremembo vodocementnega razmerja. Po količini vlage v agregatu lahko agregate razdelimo na štiri stopnje.



Slika 2: Stopnje vlage v agregatu: (a) osušen v peči, (b) zračno suh, (c) zasičen z vlago in (d) moker
[1]

2.1.2 Voda

Voda je v cementnih kompozitih zelo pomembna komponenta, saj omogoči, da se v cementnih kompozitih prične odvijati kemijski proces hidratacije, ki povzroči sproščanje hidratacijske toplote in strjevanje materiala. [1] V grobem lahko rečemo, da je za uporabo v cementnih kompozitih primerna vsaka voda, ki je pitna ter nima posebnega okusa in vonja. Tudi vodo, ki ni pitna, lahko uporabimo za pripravo cementnih kompozitov, vendar je potrebno takšno vodo predhodno preiskati, saj voda lahko vpliva na čas vezanja, kakovost in trdnost cementnih kompozitov ter na zaščito armature proti koroziji.

Po izvoru lahko vodo razdelimo na [4]:

- 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 1008:2003: 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,
- komunalno vodo: ni primerna za uporabo.

Standard SIST EN 1008:2003 določa, da je pitna voda primerna za uporabo. Ostale vode lahko predhodno ocenimo s pomočjo spodnje preglednice (Preglednica 2). Če voda ne ustreza eni ali več zahtevam iz preglednice, jo lahko uporabimo samo, če dokažemo, da je skladna s točko 4.4 tega standarda. Standard predpisuje tudi kemične lastnosti vode, ki ne smejo biti presežene in so prikazane v spodnji preglednici (Preglednica 3).

Preglednica 2: Zahteve za predhoden pregled vode [4]

Zahteve	
Olja in masti	Ne več kot vidni sledovi.
Detergenti	Morebitna pena mora izginiti v dveh minutah.
Barva	Voda, ki ne prihaja iz industrije betona, se kvalitativno oceni kot blede rumena ali motna.
Izločene snovi	Voda iz procesov industrije betona mora ustrezati zahtevam iz dodatka A tega standarda
	Voda iz drugih virov ima lahko največ 4 ml usedlin.
Vonj	Voda iz procesov industrije betona ima dovoljen enak vonj kot pitna voda, rahel vonj po cementu in rahel vonj po žveplovodiku, ko je prisoten žlindrin cement.
	Voda iz drugih virov ima dovoljen enak vonj kot pitna voda. Po dodatku solne kisline na sme smrdeti po žveplovodiku.
Kislina	pH \geq 4
Humusne snovi	Barva se po dodatku NaOH oceni kvalitativno kot rumenkasto rjava ali motna.

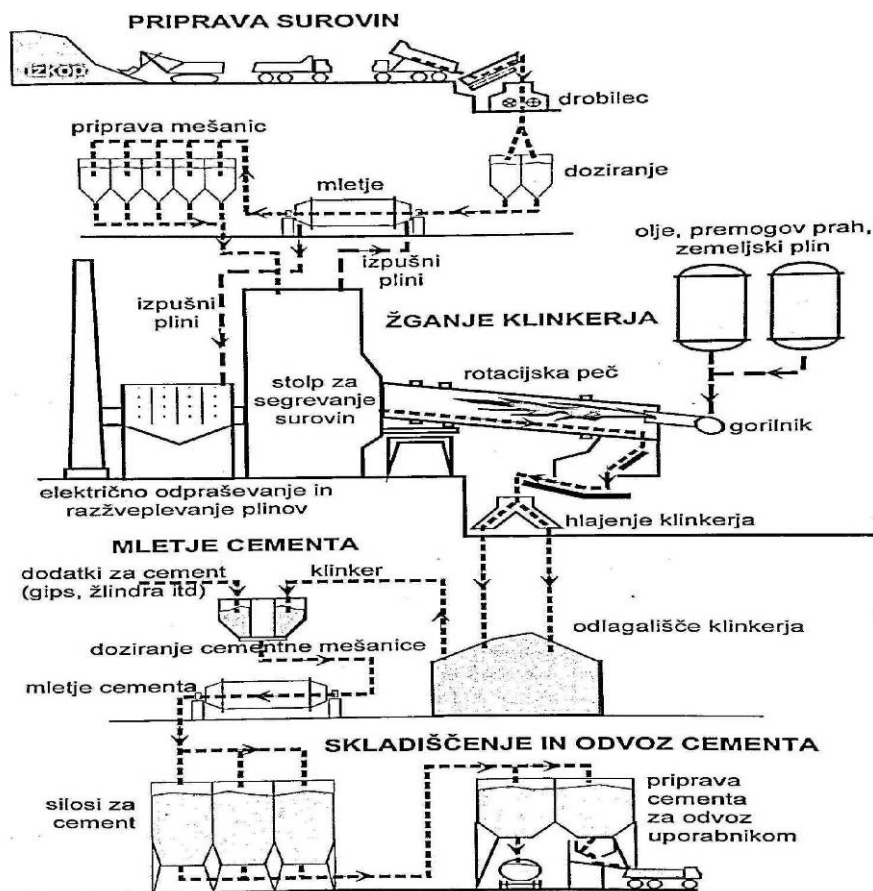
Preglednica 3: Najvišje še dovoljene vsebnosti škodljivih snovi v vodi [4]

Snov	Namen uporabe	Najvišja vsebnost mg/l
Kloridi (Cl ⁻)	Prednapeti beton ali zalivna masa	500
	Beton z armaturo ali vgrajeno kovino	1000
	Beton brez armature ali vgrajene kovine	4500
Sulfati (SO ₄ ²⁻)		2000
Alkalije		1500
Sladkorji	Škodljivo onesnaženje	100
Fosfati (P ₂ O ₅)		100
Nitrati (NO ₃ ⁻)		500
Svinec (Pb ²⁺)		100
Cink (Zn ²⁺)		100

2.1.3 Cement

Cement je fino zmlet silikatni material, ki ga uvrščamo med hidravlična veziva. Ko mu dodamo vodo, ta tvori cementno pasto, ki ob procesu hidratacije veže in se strjuje. Tako postopoma nastane cementni kamen. Če cementni pasti dodamo še ustrezni agregat, pasta deluje kot lepilo med zrnji agregata in tako dobimo enega najbolj poznanih in uporabljenih cementnih kompozitov današnjega časa, beton. [2]

2.1.3.1 Proizvodnja cementa



Slika 3: Shematski prikaz proizvodnje cementa [1]

Kot je razvidno iz zgornje slike (Slika 3) lahko postopek proizvodnje cementa razdelimo na štiri sklope:

- proizvodnja surovin,
- mletje surovinske moke,
- žganje klinkerja,
- mletje cementa.

Osnovna surovina za proizvodnjo cementnega klinkerja je lapor, ta pa je sestavljen iz apnenca in gline. Po izkopu v kamnolomu surovine potujejo do mlina, kjer se zmeljejo na ustrezno frakcijo, nato pa se shranijo v silosih. Ker pa razmerje surovin ponavadi ne ustreza, se za zadostitev zahtevam dodajajo različni dodatki (boksit, žgano apno, kremenčev pesek, piritni ogorki). Ko je razmerje ustrezno, se surovine zmeljejo v fino surovinsko moko, nato pa se s pomočjo zraka še ustrezno homogenizirajo in skladiščijo v silosih.

Sledi najpomembnejša faza pri proizvodnji cementa, to je žganje surovinske moke v rotacijski peči. V tej fazi pridobimo cementni klinker, iz katerega se nato izdelata cement. Faza žganja poteka v treh delih:

- najprej se surovinska moka skozi izmenjevalce toplote segreje na okoli 800 °C, temperatura plinske faze pa je okoli 1000 °C. Ta faza skrajša zadrževanje surovinske moke v rotacijski peči in poveča njeno zmogljivost,
- surovinska moka se nato segreva v rotacijski peči, ki ima obliko cevi ter je nekoliko nagnjena in se počasi obrača okoli svoje osi. Ko se surovinska moka segreje na okoli 1300 °C, razpadejo karbonati in glineni delci, tvoriti pa se pričnejo minerali klinkerja. Proti koncu rotacijske peči temperatura naraste na 1400 – 1450 °C, temu območju peči rečemo tudi cona sintranja. Tukaj potekajo najpomembnejše kemijske in fizikalne reakcije, material pa dobi tudi hidravlične lastnosti,
- sledi še zadnja faza pečenja, to je faza ohlajanja materiala. Material se deloma ohladi že na koncu peči, ohlajevanje pa se nadaljuje v hladilcu klinkerja, kjer se temperatura spusti pod 100 °C. Tako dobimo portland cementni klinker, ki je v obliki temno sivih krogel.

Zadnja faza pri proizvodnji cementa je mletje cementnega klinkerja. Dodana mu je sadra, lahko pa so zraven dodani še dodatki (tuf, žlindra, elektrofiltrski pepel in apnenec). Sadro je potrebno dodajati cementu, saj bi se v nasprotnem primeru, ko bi cementu dodali vodo, ta takoj strdil in ne bi bil primeren za vgrajevanje. Ko cement z dodatki s pomočjo mlina zmeljemo do ustrezne finosti, ga skladiščimo v silosih, od koder gre na tržišče v razsutem stanju ali v vrečah. [5]

2.1.3.2 Sestava cementa

Najpomembnejša sestavina cementa je portland cementni klinker (K). Standard SIST EN 197-1 podrobno opisuje zahteve o sestavi portland cementnega klinkerja. Vsebovati mora najmanj dve tretjini mase kalcijevih silikatov, pomembno pa je še razmerje med masami kalcijevega oksida (CaO) in silicijevega oksida (SiO₂), ki ne sme biti manjše od 2, magnezijev oksid (MgO) pa ne sme presegati 5 % mase. [6]

Večino mase cementnega klinkerja predstavljajo štiri minerali. Največ (40 – 70 %) je trikalcijevega silikata C₃S (alite), sledita mu (5 – 30 %) dikalcijev silikat C₂S (belite) in (7 – 15 %) trikalcijev aluminat C₃A, ostanek pa predstavlja tetraalkalcijev aluminoforit C₄AF. [1]

V cementu lahko poleg portland cementnega klinkerja najdemo še:

- granulirano plavžno žlindro (S),
- pucolanske materiale (P, Q),
- elektrofilterski pepel (V, W),
- žgani skrilavec (T),
- apnenec (L, LL),
- mikrosiliko (D),
- kalcijev sulfat,
- polnila.

2.1.3.3 Lastnosti cementa

Fizikalne lastnosti cementa preverjamo s pomočjo preiskav, ki so natančno opisane v standardih. Vzorce cementa odvezamo s posebno luknjičasto dvocevno sondo. Te vzorce nato razdelimo na tri dele, pri čemer prvi del uporabimo za osnovne preiskave, drugi del za primerjalne preiskave, tretji del pa shranimo za morebitne kasnejše preiskave.

Finost mletja je pri cementih zelo pomembna, saj vpliva na sam proces hidratacije. Drobnejša kot so zrna cementa, večja je površina zrn, višja je trdnost cementa, razvije se več hidrationske toplote in večje je krčenje.

Trdnost cementa razdelimo na standardno trdnost in na zgodnjo trdnost. Pri standardni trdnosti malto starimo 28 dni, medtem ko pri zgodnji trdnosti malto starimo 2 ali 7 dni. Nato po veljavnih standardih naredimo tlačni preizkus. V spodnji preglednici (Preglednica 4) so prikazani trdnostni razredi cementov. Črki N in R v preglednici označujeta razrede zgodnje trdnosti, pri čemer je N običajna zgodnja trdnost, R pa je visoka zgodnja trdnost. [6]

Preglednica 4: Trdnostni razredi cementov [6]

Trdnostni razred	Tlačna trdnost v Mpa			
	Zgodnja trdnost		Standardna trdnost	
	2 dneva	7 dni	28 dni	
32,5 N	-	$\geq 16,0$	$\geq 32,5$	$\leq 52,5$
32,5 R		-		
42,5 N	$\geq 10,0$	-	$\geq 42,5$	$\leq 62,5$
42,5 R		-		
52,5 N	$\geq 20,0$	-	$\geq 52,5$	-
52,5 R	$\geq 30,0$	-		

2.1.3.4 Hidratacija cementa

Hidratacija cementa je proces, ki nastopi, ko cement ali eno izmed njegovih komponent zmešamo z vodo. Pri tem, poleg prehodov brezvodnih komponent v ustrezne hidrate, pride tudi do kompleksnih kemijskih reakcij. Nekatere kemijske reakcije potekajo istočasno, nekatere pa zaporedno z različnimi hitrostmi in vplivajo ena na druge. [7]

Hitrost hidratacije cementa je odvisna od [1]:

- sestave klinkerja in količine primesi v mineralih klinkerja,
- mikrostrukture klinkerja, ki je odvisna od razmer pri žganju klinkerja,
- količine in oblike kalcijevega sulfata,
- finosti in granulacijske sestave cementa,
- vodocementnega razmerja pri pripravi mešanice,
- razmer pri zorenju mešanice,
- prisotnosti kemičnih dodatkov v mešanici.

Hidratacijo cementa lahko opišemo z dvema modeloma. Prvi in najpreprostejši model hidratacijo cementa opisuje kot proces raztapljanja ionov cementnih mineralov v vodi, ki mu sledi obaranje slabo topnih hidratov iz prenasočene raztopine. Drugi, bolj zapleten model, pa pravi, da hidratacijske reakcije v celoti potekajo na površini zrn cementnih mineralov. Študije so pokazale, da v prvi fazi hidratacija v glavnem poteka po prvem, enostavnejšem modelu. Kasneje, ko se gibljivost ionov zmanjša pa pride do spremembe mehanizma hidratacije, produkti takrat večinoma nastajajo preko difuzijskih procesov skozi hidratizirane silikatno-aluminatne plasti, ki prekrivajo zrna še nezreagiranih cementnih mineralov. [7]

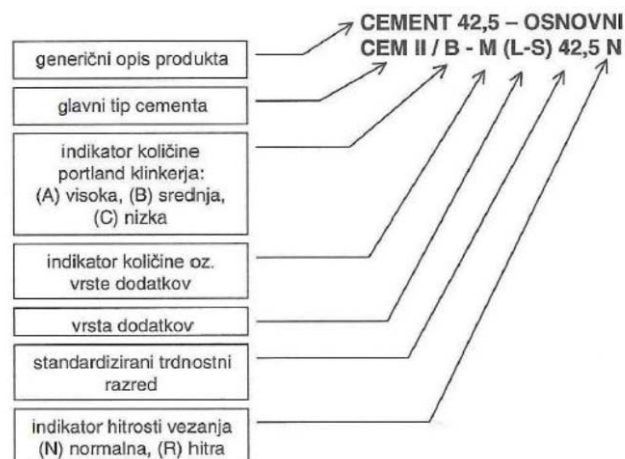
Hidratacija aluminatnih faz je vedno mnogo hitrejša od hidratacije silikatnih faz. Karakteristike cementa, kot so pričetek vezanja in izguba konsistence, so zelo povezane s hidrationskimi reakcijami aluminatov. Silikati pa imajo prevladujočo vlogo predvsem v fazi pridobivanja trdnosti. [7]

2.1.3.5 Vrste cementov in označevanje

Ker so pogoji gradenj in zahteve pri gradnji zelo različne, so tudi potrebne različne vrste cementov. Slovenski standard SIST EN 197-1, v katerem so predpisane zahteve, sestave in merila skladnosti za običajne cemente, razdeli 27 osnovnih vrst cementov v pet glavnih skupin:

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

Vsi cementi morajo biti označeni vsaj z oznako skupine in številko trdnostnega razreda (32,5, 42,5 ali 52,5. Temu je potrebno dodati še označbo zgodnje trdnosti cementa (N – običajna ali R – visoka). [6]



Slika 4: Sistem označevanja cementov po standardu SIST EN 197-1 [1]

2.1.4 Dodatki

Dodatki spreminjajo lastnosti cementnih kompozitov v svežem in tudi v strjenem stanju. Namen uporabe dodatkov je, da z njimi povečamo učinkovitost cementa ter posledično tudi ekonomičnost cementnih kompozitov. Z njimi dosegamo tiste lastnosti, ki so potrebne za izdelavo, transport, vgradnjo ali pa so zahtevane za dolgotrajno rabo cementnih kompozitov. Poznamo mineralne dodatke in kemijske dodatke.

2.1.4.1 Mineralni dodatki

To so naravni materiali ali industrijski odpadni materiali s pucolanskimi ali hidravličnimi lastnostmi, lahko pa imajo le funkcijo polnila. Pucolanske in hidravlične dodatke lahko uporabljamo kot nadomestek za del cementa v cementnih kompozitih. S tem cementnim kompozitom tudi spremenimo nekatere lastnosti, saj na primer pri pucolanskih dodatkih potečejo reakcije mineralnih dodatkov z minerali v cementni pasti. Nastane nova CSH faza, ki zapolni prazna mesta v cementni pasti, posledično pa se zgosti struktura cementnih kompozitov.

Poznamo kar nekaj mineralnih dodatkov, ki jih uporabljamo:

- mikrosilika,
- elektrofiltrski pepeli,
- apnenčeva moka,
- žindra,
- tufi,
- pucolani.

Z njihovo uporabo lahko pripomoremo k:

- pri svežih cementnih kompozitih:
 - povečanju obdelavnosti, zmanjšanju nagnjenosti k izcejanju vode, izboljšanju črpnosti, podaljšanju časa začetka vezanja in izboljšanju površinske obdelavnosti,

- pri strjenih cementnih kompozitih:
 - znižanju zgodnje in povečanju končne trdnosti, izboljšanju vezi med armaturo in cementnim kompozitom, znižanju toplote hidratacije, znižanju prepustnosti, povečanju odpornosti proti sulfatni reakciji, zmanjšanju izcvetenja, zaviranju korozije armature.

V praksi v Sloveniji največkrat uporabljamo apnenčevo moko, mikrosiliko, ki se jo dodaja do 10 % glede na maso cementa ter elektrofiltrski pepel, ki se ga lahko doda tudi do 50 % glede na maso cementa.

2.1.4.2 Kemijski dodatki

V tehnologiji betona so se prvič uporabili okoli leta 1945. Omogočajo nam, da izdelujemo cementne kompozite z želenimi lastnostmi. Dodajati jih je potrebno v malih količinah glede na maso cementa in niso nadomestek za cement. Možno jih je tudi kombinirati med seboj, vendar samo pod pogojem, da so med seboj kompatibilni.

Cementnim kompozitom jih dodajamo tik pred mešanjem ali pa med samim mešanjem. Glavni namen uporabe teh dodatkov je [2]:

- zmanjšati stroške izdelave cementnih kompozitov,
- lažje doseganje določenih lastnosti cementnih kompozitov kot z drugimi načini,
- vzdrževanje kvalitete cementnih kompozitov med mešanjem, transportom, vgradnjo in nego betona,
- premagovanje določenih nevšečnosti med posameznimi segmenti izdelave in vgradnje cementnih kompozitov.

Poznamo več vrst kemijskih dodatkov [8]:

- aeranti:
 - izboljšujejo obdelavnost svežih cementnih kompozitov,
 - zmanjšujejo izcejanje vode in segregacijo,
 - poveča se obstojnost proti zmrzovanju in tajanju.
- pospeševalci vezanja:
 - povečajo hitrost hidratacije cementa (skrajša se časvezanja, pospeši se razvoj zgodnje trdnosti),
 - če je pospeševalca preveč, se lahko poveča krčenje ob sušenju in oteži vgrajevanje.

- plastifikatorji in superplastifikatorji:
 - znižujejo potrebo po vodi,
 - zmanjšujejo potrebno količino cementa za doseganje visokih trdnosti,
 - izboljšujejo obdelavnost betona in delujejo kot zavlačevalci,
 - močno povišajo trdnost strjenih cementnih kompozitov,
 - zmanjša se krčenje in lezenje pri strjenih cementnih kompozitih.
- zavlačevalci:
 - zavrejo ali ustavijo proces hidratacije v sveži mešanici,
 - omogočajo daljši transport sveže mešanice.
- pigmenti:
 - služijo za obarvanje cementnih kompozitov.
- gostilci:
 - z njimi dosegamo večjo vodoneprepustnost,
 - zavlačujejo nastanek korozije armature.
- inhibitorji:
 - zavirajo razvoj korozije.
- dodatki za betoniranje pri nizkih temperaturah:
 - znižujejo ledišče vode.
- ostali dodatki:
 - ekspanditorji,
 - dodatki za zmanjševanje ekspanzije zaradi alkalnosilikatne reaktivnosti,
 - fungicidni in insekticijski dodatki,
 - dodatki za izboljšanje adhezije v betonski mešanici,
 - dodatki za nastanek plinske poroznosti,
 - dodatki za injekcijske mase ...

Plastifikatorji (P), superplastifikatorji (SP) in hiperplastifikatorji (HP) [9]

Za plastifikatorje (P), superplastifikatorje (SP) in hiperplastifikatorje (HP) lahko rečemo, da so najpomembnejša skupina kemijskih dodatkov za beton.

Osnovni namen uporabe P, SP in HP oz. dodatkov za zmanjševanje potrebe po vodi je:

- doseganje višjih trdnosti ob zmanjševanju vodocementnega razmerja (V/C) in enaki obdelavnosti mešanice,

- doseganje enake obdelavnosti mešanice ob zmanjševanju količine cementa in zniževanju hidratacijske toplote,
- omogočajo povečanje obdelavnosti pri določenem V/C razmerju,
- povečanje obdelavnosti za vgrajevanje v težko dostopne predele.

P, SP in HP so površinsko aktivne snovi, ki delujejo na principu zmanjšanja V/C razmerja, razlikujejo pa se po mehanizmu delovanja. P, SP in HP se z negativno nabitimi funkcionalnimi skupinami adsorbirajo na pozitivno nabito površino cementa. P in SP prve generacije se adsorbirajo na cementne delce, katerim je zaradi elektrostatičnega odboja enako nabitih delcev tako preprečeno združevanje. Tudi pri HP je mehanizem delovanja podoben, saj se prav tako adsorbirajo na cementne delce, vendar pa je v tem primeru združevanje cementnih delcev preprečeno zaradi steričnega – prostorskega odboja, ki ga povzročijo dolge glavne in stranske verige HP.

Učinek P, SP in HP je odvisen od kemijske in mineralne sestave cementa, količine cementa, vrste in sestave agregata, vrste in sestave mineralnih dodatkov, drugih kemijskih dodatkov, ki jih morebiti uporabljamo in pogojev dela.

P, SP in HP uporabimo, kadar želimo oziroma moramo:

- izboljšati lastnosti svežega betona:
 - zagotoviti zahtevano obdelavnost ob manjši vsebnosti zamesne vode, zagotoviti daljši čas zahtevane obdelavnosti.
- zmanjšati stroške betonskih del z lažjim in hitrejšim vgrajevanjem,
- pripraviti beton, ki ustreza specifičnim zahtevam:
 - predpisano V/C razmerje, minimalno začetno ali končno trdnost, določen čas obdelavnosti.
- betonirati v neugodnih vremenskih razmerah,
- izboljšati kvaliteto strjenega betona

P, SP in HP nam tako omogočajo, da lahko pripravimo homogen beton vseh konsistenčnih stopenj, pripravo transportnih betonov z dolgim časom obdelavnosti, vgrajevanje betonov v težjih pogojih ali v zahtevnejše konstrukcije, doseganje visokih zgodnjih in končnih trdnosti, pripravo vodonepropustnih betonov, uporabo nižje doze cementa za doseganje določene trdnosti, pospešitev strjevanja pri zimskem betoniranju in kompenzacijo padca trdnosti v aeriranih betonih.

Z zmanjšanjem V/C razmerja ne povečamo samo trdnosti betona, ampak pomembno vplivamo na povečanje njegove trajnosti. Betoni enake obdelavnosti in trdnosti, ki so pripravljene s P, SP ali HP, imajo nižjo vsebnost vode in cementa, zato so v strjenem stanju manj porozni, imajo manjšo stopnjo krčenja in s tem manj razpok, skozi katere v beton vstopajo agresivne snovi, ki povzročajo propadanje betona.

Pomembno je tudi vedeti, da se lahko P kombinirajo s SP, HP, zavlačevalci ali s pospeševalci. Paziti pa je potrebno, da so posamezni izdelki medsebojno kompatibilni.

Aeranti

Aeranti povzročijo, da v svežem cementnem kompozitu nastanejo zračni mikromehurčki, ki v strjenih cementnih kompozitih omogočajo sprostitev notranjih napetosti, nastalih zaradi povečanja volumna pri zmrzovanju vode v kapilarnih porah. Obenem prekinajo tudi kapilarni sistem por in tako zmanjšajo prodiranje vode oz. raztopin soli v notranjost prereza. Uporabljamo jih tudi, ko želimo izboljšati obdelavnost svežih cementnih kompozitov.

Glavni vzroki za uporabo aerantov so:

- izboljšanje trajnosti strjenih cementnih kompozitov,
- povečanje odpornosti strjenih cementnih kompozitov pri ciklikih zmrzovanja in tavanja,
- povečanje odpornosti strjenih cementnih kompozitov proti koroziji,
- izboljšava obdelavnosti, preprečevanje segregacije in izločanja vode svežih kompozitov.

2.2 Lastnosti svežih cementnih kompozitov

Zavedati se moramo, da so kasnejše lastnosti strjenih cementnih kompozitov v veliki meri odvisne od priprave in lastnosti svežih cementnih kompozitov. Narediti je potrebno takšno mešanico, ki ima ustrezno obdelavnost, da jo lahko pravilno vgradimo, da jo lahko dostavimo do mesta vgradnje in da ob tem ne segregira. Za lažjo pripravo takšne mešanice nam lahko pomagajo v nadaljevanju opisani pojmi, ki so močno povezani z lastnostmi svežih cementnih kompozitov. [10]

Mešanje

Da bi dosegli čimbolj homogeno mešanico cementnih kompozitov, je potrebno kar nekaj pazljivosti in truda ob pripravi. Že zaporedje dodajanja sestavin v mešalec lahko vpliva na končni produkt. Če je zaporedje drugačno, moramo temu ustrezno prilagoditi čas dodajanja vode v suho mešanico, skupno število obratov in hitrost vrtenja mešalca. Pri mešanju je prav tako pomembna tudi velikost lopatic glede na velikost bobna, oblika in stanje mešalca in lopatic.

Konsistenca in vgradljivost

Konsistenca določa plastičnost cementnih kompozitov. Za določanje konsistence lahko uporabimo različne metode, ki so predpisane v standardih: Ve-be metoda, metoda s posedom, metoda z razlezom, metoda z vibriranjem. Vse bolj so v uporabi tekoči cementni kompoziti, ki se uporabljajo pri gosto armiranih ali pri vitkih prerezih. V takšnem primeru homogenim cementnim kompozitom dodajamo superplastifikatorje, ki povzročijo, da mešanica »steče«.

Stopnjo vgradljivosti cementnih kompozitov določajo enostavnost vgrajevanja, konsolidacija sveže mešanice in njeno končno oblikovanje. Pomembno je, da mešanica med transportom, vgradnjo in med strjevanjem ne segregira (vsa zrna v mešanici so enakomerno razporejena).

Izcejanje vode

To je pojav, ko se na vrhu sveže mešanice pojavi plast vode. Pojav je posledica istočasne sedimentacije trdnih delcev (cementnih in drobnih agregatnih zrn) in potovanja vode znotraj mešanice proti površju. Na vrhu se pojavi plast s povečanim V/C, ki je neobstojna, ima slabe mehanske lastnosti in ima nizko odpornost proti zunanjim vplivom. Vpliv in obseg izcejanja vode lahko zmanjšamo z:

- ustrezno granulometrijsko sestavo agregata,
- kemijskimi dodatki,
- aeriranjem,
- dodatnimi in nadomestnimi cementnimi materiali,
- finejšimi cementi.

Konsolidacija

Pri vibriranju se delci svežih cementnih kompozitov spravijo v gibanje zaradi zmanjšanja medsebojnega trenja. Mešanica se prične obnašati kot gosta tekočina. Z vibriranjem dosežemo, da lahko uporabimo večja zrna agregata in posledično se zaradi zmanjšanja skupne površine zrn zmanjša tudi potreba po cementni pasti (cement in voda). Vendar pa moramo pri vibriranju paziti, da s prekomernim vibriranjem ne povzročimo segregacije mešanice in s tem vplivamo na kvaliteto strjenih cementnih kompozitov. [1]

Hidratacija, vezanje in strjevanje

Vežanje in hidratacija cementne paste je opisano v poglavju o cementu.

Ko se cementni kompoziti strdijo, njihova bruto prostornina ostane skoraj enaka, vsebujejo pa pore, ki so zapolnjene z vodo ali zrakom, kar pa zmanjšuje njihovo trdnost. Trdnost strjenih cementnih kompozitov zagotavlja trden del cementne paste. Manj kot je por, trdnejši je cementni kompozit. Prav zaradi tega moramo paziti, da je vode v svežem cementnem kompozitu minimalno potrebno za zahtevano plastičnost in obdelavnost.

Dobro je tudi, da poznamo količino toplote, ki se bo sprostila pri hidrataciji. Ta nam lahko v eni meri koristi pozimi (zaščiti beton pred nizkimi temperaturami), pri masivnih konstrukcijah (kot so pregrade) pa nam lahko škodi, saj toplota povzroči toplotne razlike, ki povzročijo notranje napetosti.

Pomembna je tudi hitrost vezanja med cementom in vodo, saj ta določa prehod mešanice iz plastičnega v trdno agregatno stanje. Reakcijski čas mora biti dovolj dolg, da omogoča transport in vgradnjo cementnih kompozitov. Ko jih vgradimo, pa seveda želimo, da se strdijo čim prej. [2]

2.3 Preizkušanje svežih cementnih kompozitov

Cementni kompoziti (v največji meri je tukaj mišljen beton) so zaradi svojih lastnosti že dolgo najbolj uporabljeni gradbeni materiali. Cementni kompoziti so v strjeni obliki že dobra preiskani, zato se zadnje čase ogromno truda namenja prav preizkušanju svežih cementnih kompozitov.

Pri vsakodnevni uporabi svežih cementnih kompozitov so nam v veliko pomoč različne preiskave. Nekatere so standardizirane, nekatere niso. Predvsem za običajne cementne kompozite so vse preiskave zelo dobro poznane in se uporabljajo že dolgo. Povsem drugače pa je pri novejših vrstah cementnih kompozitov kot so lahko-vgradljivi in samozgoščevalni cementni kompoziti ter betoni z dodatki (elektrofiltrski pepel, žindra, apnenčeva moka, polimeri), za katere se učinkovitejše preizkusne metode še razvijajo. Poudarek pri razvoju novih standardiziranih preizkusnih metod je predvsem na enostavnosti uporabe. Želimo si, da bi z eno preiskavo lahko nadomestili več drugih preiskav. V primeru ovrednotenja lastnosti svežih cementnih kompozitov je zaenkrat najbolj učinkovita preiskava merjenja reoloških lastnosti svežih cementnih kompozitov z reometrom, kjer dobimo dva parametra: napetost na meji tečenja in plastično viskoznost. [11]

Za preiskave svežih cementnih kompozitov je zelo pomembna lastnost obdelavnost sveže mešanice. Obdelovalnost je lastnost svežih cementnih kompozitov, da jih lahko ustrezno zamešamo, vgradimo, in skonsolidiramo tako, da imajo potem, ko se strdijo zahtevane lastnosti. Zaenkrat še ni metode, ki bi bila sposobna izmeriti vse vidike obdelavnosti. Z izrazom obdelavnost opišemo veliko lastnosti: tečenje sveže mešanice, konsistenco, črpnost, plastičnost, kompaktnost, stabilnost. Ocena teh lastnosti je velikokrat zelo subjektivna, zato je nepraktično, da bi za vsako posebej opravljali preizkuse. Obdelavnost je tako potrebno definirati kot eno izmed osnovnih lastnosti.

Zaradi velikega števila metod preskušanja svežih cementnih kompozitov je smiselno, da jih razdelimo v skupine. Načinov kako razdeliti preizkusne metode je več. Tattersall je razvrstil metode v tri razrede (Preglednica 5). Večina metod v njegovi klasifikaciji spada v II. in III. razred.

Preglednica 5: Razredi preizkusnih metod svežih cementnih kompozitov po Tattersallu [12]

Razred I Kvalitativno	Uporabimo samo za splošni opis brez kvalificiranja
Obdelavnost, tečenje, črpnost, zgoščevalnost ...	
Razred II Empirično kvantitativno	Uporabimo za preprost kvantitativen opis obnašanja pod določenimi pogoji
Posed, stopnja zgoščenosti, vebe čas, razlez ...	
Razred III Temeljno kvantitativno	Uporabimo strogo v skladu z definicijami standarda
Viskoznost, napetost na meji tečenja, mobilnost ...	

NIST (National Institute of Standards and Technology) je razdelil preizkuse v štiri skupine (Preglednica 6), glede na vrsto toka cementnih kompozitov, ki se ustvari med preizkušanjem. Ta razdelitev je zaenkrat najbolj dosledna glede na trenutno razumevanje reologije in obdelavnosti cementnih kompozitov.

Preglednica 6: Kategorije preizkusnih metod svežih cementnih kompozitov po NIST [12]

Kategorija	Definicija
Omejen tok	Material teče zaradi lastne teže ali pod določenim pritiskom skozi ozko odprtino.
Prosti tok	Material teče zaradi lastne teže ali pa vanj prodira predmet zaradi gravitacije.
Preizkus z vibriranjem	Material teče zaradi vibracij.
Rotacijski reometri	Material je prestrižen med dvema vzporednima površinama, pri čemer se ena ali obe vrtita.

2.4 Osnovne lastnosti cementnih kompozitov v strjenem stanju

Lastnosti strjenih cementnih kompozitov so posledica zelo velikega števila različnih parametrov. Odvisne so od kvalitete agregata, cementa, vode in dodatkov, od interakcije med temi materiali, od postopkov izdelave in končnih elementov, največji del mehanskih lastnosti pa je odvisen od ustvarjene strukture strjenih cementnih kompozitov.

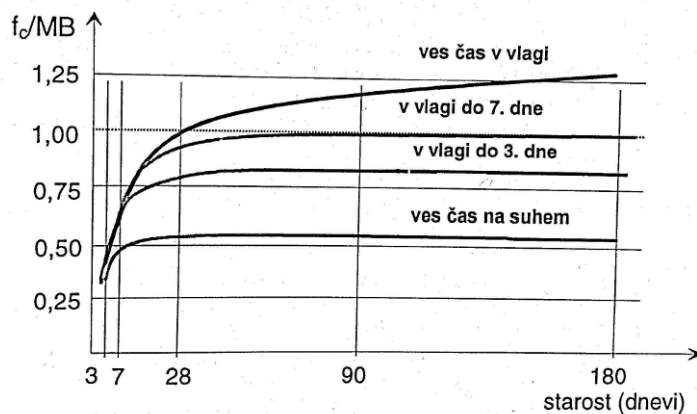
2.4.1 Trdnost

Če hočemo, da trdnost cementnih kompozitov s časom narašča, morajo biti izpolnjeni naslednji pogoji:

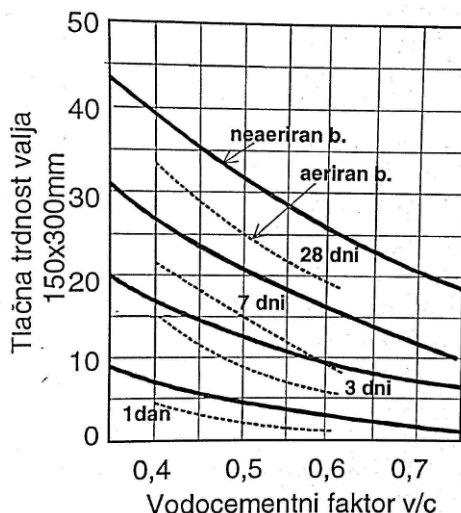
- prisoten mora biti nehidratiziran cement,
- relativna vlažnost ne sme pasti pod 80 %,
- temperatura mora biti nad lediščem.

Ko govorimo o trdnosti cementnih kompozitov, imamo največkrat v mislih tlačno trdnost (f_c). Definirana je kot maksimalna izmerjena odpornost cementnega kompozita na osno tlačno obremenitev pri starosti 28 dni. Preizkušamo jo na vzorcih v obliki kock ali valjev, izrazimo pa jo običajno v megapaskalih (MPa). Na trdnost cementnih kompozitov zelo vpliva tudi vodocementno razmerje (V/C); večje kot je, manjša je trdnost. Na spodnjih dveh grafikonih (Grafikon 2 in 3) sta prikazana vpliva vlažnosti okolja in V/C na trdnost cementnih kompozitov.

Sedemdnevna trdnost znaša okoli 75 % 28 dnevne, medtem ko 56 in 90 dnevna trdnost znašata še od 10 do 15 % več kot 28 dnevna. [2]



Grafikon 2: Vpliv vlažnosti okolja na pridobivanje trdnosti [1]



Grafikon 3: Odvisnost trdnosti od vodocementnega razmerja [1]

Pomembna je tudi natezna trdnost cementnih kompozitov, čeprav je bistveno manjša od tlačne trdnosti. Glede na obremenitev poznamo dve vrsti natezne trdnosti: upogibno natezno trdnost in cepilno natezno trdnost. Upogibna natezna trdnost znaša od 15 do 20 % tlačne trdnosti f_c . Pomembna je pri dimenzioniranju hodnikov in plošč položenih na razmeroma podajno podlago. Cepilna natezna trdnost pa je pomembna pri računu obremenitev, ki povzročajo razpoke v betonu. Njena velikost znaša od 7 do 10 % tlačne trdnosti f_c . [1]

2.4.2 Trajnost in volumska obstojnost

Trajnost je vsekakor odlika cementnih kompozitov, saj je zelo pomembno, da ohranijo svoje fizikalne lastnosti navkljub različnim vremenskim vplivom, obrabi, vdoru kemikalij ... Z različnimi dodatki, načini izdelave, vgrajevanjem in nego lahko cementnim kompozitom močno podaljšamo njihovo življenjsko dobo. Da pa lahko izdelamo dovolj trajne cementne kompozite, moramo poznati vplive okolja, ki jim bodo izpostavljeni.

Strjeni cementni kompoziti rahlo spreminjajo svojo prostornino (0,1 do 0,8 ‰) zaradi temperaturnih sprememb, obremenitev in spremembe vlage okolja. Koeficient linearnega toplotnega raztezka betona ($\alpha_t = 10^{-6} / ^\circ\text{C}$) je enakega velikostnega reda kot pri jeklu, kar cementnim kompozitom omogoča sodelovanje z armaturo. [1]

3 REOLOGIJA SVEŽIH CEMENTNIH KOMPOZITOV

3.1 Uvod v reologijo

Reološke lastnosti svežih cementnih kompozitov vplivajo na njihovo vgradljivost in sposobnost zgoščevanja. Po definiciji je reologija veda, ki preučuje tečenje in deformiranje snovi. Snov je lahko elastična ali tekoča. V reologiji raziskujemo povezave med silo, deformacijami in časom. Velikokrat srečamo tudi izraz viskometrija, ki je podskupina reologije. Z njo preiskujemo povezave med napetostjo in deformacijami. Viskoznost, ki iz tega izhaja, je definirana kot upor proti tečenju oz. upor tekočine proti deformaciji. Večji kot je upor, večja je viskoznost. V praksi se še vedno veliko uporabljajo enostavni načini preizkušanja, med katere sodi posed stožca. Zavedati se je potrebno, da imata dva cementna kompozita z istim posedom lahko zelo različno obdelavnost. Še najbolj zanesljiva je ocena izkušenega delavca, vendar pa je ta zaradi različnih dejavnikov lahko velikokrat subjektivna. Znanstveniki so zato iskali boljši način za merjenje lastnosti svežih cementnih kompozitov in na podlagi raziskav prišli do zaključka, da so sveži cementni kompoziti (beton) še najbolj podobni Binghamovi tekočini. Tako se je pričela uporabljati reologija na svežih cementnih kompozitih.

Vzrokov za izvajanje reološke meritve je več :

- da bi razumeli odnose med posameznimi sestavinami v materialu in dobili vpogled v strukturo vzorca materiala, saj med obliko in velikostjo delcev ter viskoznostjo obstaja povezava,
- reološke preizkuse uporabljamo za kontrolo kakovosti surovin, procesnih pogojev in končnih produktov,
- rezultate, pridobljene pri izvajanju meritev, lahko uporabimo pri načrtovanju procesne opreme (učinkovitost črpalke je pogojena z reološkimi lastnostmi svežih cementnih kompozitov),
- rezultate iz preiskav lahko uporabimo za preizkušanje ustreznosti novih izdelkov.

Strižni tok, s pomočjo katerega naprave merijo parametre, se lahko ustvari na več načinov:

- tok med dvema vzporednima ploščama,
 - iz teoretičnega vidika je to idealen model za merjenje viskoznosti, pomanjkljivost pa je težavna izvedba v praksi,

- krožni tok med dvema vrtečima se cilindroma,
 - to je zaradi natančnosti podatkov najpogosteje uporabljen model v viskometriji, čeprav ima tudi ta nekaj pomanjkljivosti:
 - učinek površine in dna (top and bottom effect),
 - zdrs na površini zunanega in notranjega cilindra,
 - konstantna strižna hitrost ob visoki rotacijski hitrosti,
- tok skozi cev,
 - s takšnim modelom se ne da določiti strižne napetosti na meji tečenja (ni primeren za nenevtonske tekočine),
- krožni tok med dvema paralelnima ploščama,
 - s takšnim modelom lahko ocenimo elasto-plastično obnašanje.

Tekočine lahko na podlagi njihovih lastnosti tečenja razdelimo v štiri skupine:

- newtonska tekočina,
- nenevtonska tekočina, časovno neodvisna,
- nenevtonska tekočina, časovno odvisna,
- visko-elastična tekočina.

Za newtonske tekočine je značilno, da imajo konstantno viskoznost pri različnih strižnih hitrostih. To so preproste tekočine, kot so voda, glicerol in olje.

Za nenevtonske tekočine, ki so časovno neodvisne, je viskoznost odvisna od strižne hitrosti. Nenevtonske tekočine lahko razdelimo na tri podskupine:

- tekočine, ki se jim ob večanju strižne hitrosti manjša viskoznost,
- tekočine, ki se jim ob večanju strižne hitrosti večja viskoznost,
- material, ki ima neko napetost na meji tečenja, vendar se med tečenjem lahko obnaša kot newtonska tekočina ali tekočini, ki se jima z večanjem strižne hitrosti, viskoznost manjša ali večja.

Med zadnjo podskupino zgoraj naštetih tekočin spadajo tudi cementni kompoziti (beton), pri katerih je na začetku opazna strižna napetost na meji tečenja, medtem ko steče, pa se obnaša kot newtonska tekočina. [13]

Kot smo že na začetku omenili, so sveži cementni kompoziti (beton) najbolj podobni Binghamovi tekočini. Binghamov model tekočine upošteva napetost na meji tečenja (τ_0) in ohranja linearno odvisnost med strižno napetostjo svežega cementnega kompozita (betona)

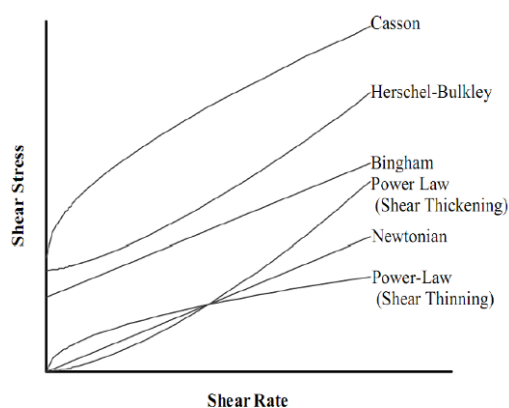
(τ) in strižno hitrostjo (γ), ki sta povezani s koeficientom viskoznosti η . Binghamov model lahko torej zapišemo z enačbo:

$$\tau = \tau_0 + \eta \cdot \gamma$$

τ_0 in η sta dve konstanti, ki predstavljata obnašanje materiala, vendar pa jih ne moremo neposredno določiti. Zato s pomočjo teh dveh konstant izpeljemo enačbo s parametri, ki jih lahko merimo. Enačba predstavlja obnašanje tekočine med vrtečimi se valji in obnašanjem tekočine med gibanjem po cevi. Rezultat preiskave z reometrom je tako največkrat zapisan v obliki:

$$T = G + HN$$

T predstavlja navor (upor proti striženju), N je hitrost vrtenja, H koeficient viskoznosti (odpornost cementnega kompozita proti naraščajoči hitrosti gibanja) in G je navor na meji tečenja (navor, pri katerem se gibanje cementnega kompozita ustavi – dinamični navor). Praviloma se meri dinamični navor na meji tečenja, meritev poteka od največje hitrosti proti najmanjši hitrosti vrtenja. [14]



Grafikon 4: Modeli za opis tekočin [15]

3.2 Vpliv sestavin cementnih kompozitov na reološke lastnosti mešanic

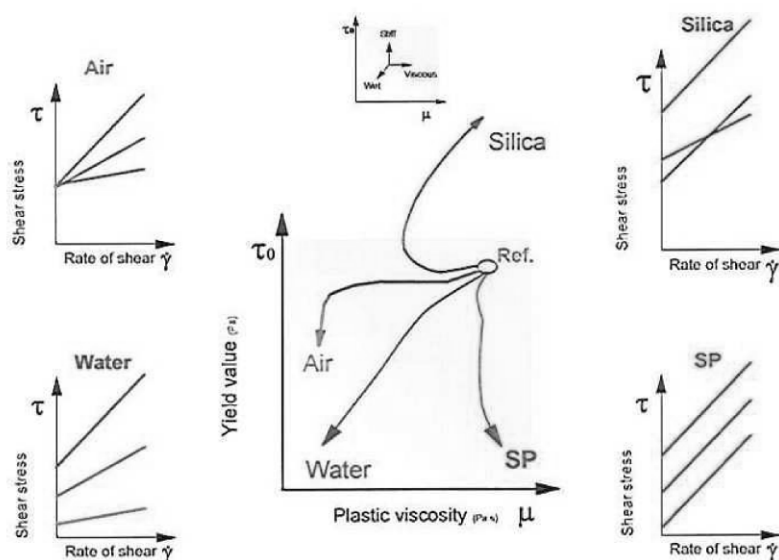
Najlažje je vplive posameznih sestavin cementnih kompozitov prikazati na reografu (Grafikon 5). Ta prikazuje razmerje med strižno napetostjo na meji tečenja in viskoznostjo.

Če dodajamo vodo, vidimo, da se pomikamo proti izhodišču reografa. Posledica je zmanjšanje strižne napetosti na meji tečenja in viskoznosti.

Če je vsebnost zraka v manjših količinah, bo to pomenilo zmanjšanje viskoznosti. Ko pa je vsebnost zraka večja, se spremeni tudi napetost na meji tečenja.

Plastifikatorji in superplastifikatorji povzročijo spreminjanje napetosti na meji tečenja, medtem ko viskoznost ostaja približno enaka.

Cementni kompoziti s prodnatim agregatom bodo imeli precej manjšo viskoznost od tistih z drobljenim agregatom. Razlika v napetosti na meji tečenja bo manjša. [11]



Grafikon 5: Vpliv posameznih sestavin na reološke lastnosti svežih cementnih kompozitov [13]

3.3 Reometri in principi merjenja

Reometri so naprave za merjenje strižne napetosti pri različnih hitrostih striženja materiala. Zaradi sestave cementnih kompozitov, ki vsebujejo velike in trdne delce agregata, reometri pa so bili prvotno namenjeni meritvam na polimerih in homogenih tekočinah, se je razvilo veliko različnih vrst reometrov, ki naj bi bili primerni za izvajanje raziskav na svežih cementnih kompozitih.

3.3.1 Koaksialni valjasti reometri

Delujejo na principu vrtenja zunanjega ali notranjega valja. Površini obeh valjev sta narebreni, kar preprečuje zdrs materiala. Najbolj znana predstavnika sta ConTec Viscometer 5 (Slika 5) in CEMAGREF-IMG. ConTec Viscometer 5 smo uporabljali tudi pri naših

raziskavah. Je tipični predstavnik valjastih reometrov, pri katerem se vrti zunanji valj. Njegova slabost je, da je sorazmerno velik in je tako primeren zgolj za uporabo v laboratorijih. CEMAGREF-IMG je sicer še precej večji, vendar pa je pritrjen na prikolico in tako uporaben tudi na terenu. [15]



Slika 5: ConTec Viscometer 5: (levo) slika reometra v Konstrukcijsko – prometnem laboratoriju na FGG, (desno) slika posameznih sestavnih delov reometra [16]

3.3.2 Reometri z vzporednima ploščama

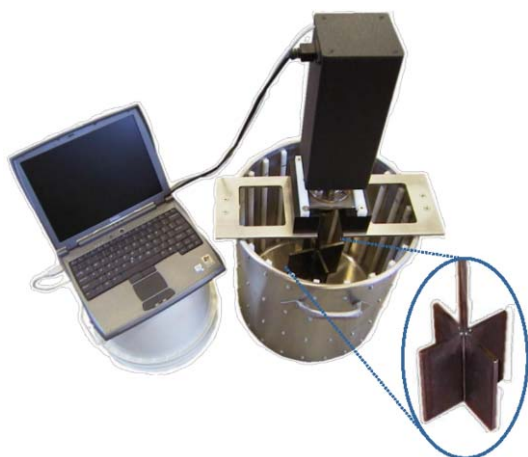
Rezultate dobimo na podlagi vrtenja dveh horizontalnih plošč, ki strižeta beton med njima. Dobljene vrednosti pri teh reometrih so običajno višje od rezultatov pri koaksialnih reometrih. Eden od predstavnikov tega tipa reometrov je BTRHEOM (Slika 6). [15]



Slika 6: Reometer BTRHEOM [17]

3.3.3 Mešalni reometri z rotorjem

Imajo rotor, ki je sestavljen iz navpične osi in na njo nameščenih lopatic. Med vrtenjem lopatic v cementnem kompozitu (betonu) se ustvarja upor, ki ga merimo. Razlike med reometri so predvsem v obliki lopatic. Predstavniki teh reometrov so: ICAR Rheometer (Slika 7), ki je zaradi svoje velikosti zelo primeren tudi za na teren, IBB rheometer, Two-point rheometer, ConTec Rheometer-4SCC, Fresh concrete Rheometer eBT2. [15]



Slika 7: ICAR Rheometer [18]

4 PROJEKTIRANJE MEŠANICE CEMENTNIH KOMPOZITOV

4.1 Splošno

Cementni kompoziti so po svoji sestavi dokaj heterogen material. Že z majhnimi spremembami v njihovi sestavi lahko bistveno vplivamo na lastnosti strjenih cementnih kompozitov. V zadnjem času se je povečala tudi uporaba različnih dodatkov, ki pa imajo različne vplive na različne mešanice. Sestavo je potrebno prilagoditi tako zahtevam posamezne konstrukcije kakor tudi vplivom okolja v katerem se konstrukcija nahaja. Prav zaradi tega je njihova sestava in proizvodnja zelo zahtevna. Da bi ugotovili ali smo sprojehtirali ustrezno sestavo cementnih kompozitov, se poslužujemo različnih preiskav, kar pa nam lahko vzame kar nekaj danes vse bolj dragocenega časa in v končni fazi tudi denarja. Prav zaradi želje po hitrejšem in cenovno ugodnejšem testiranju se je za potrebe projektiranja mešanic betonov razvila metoda CEM.

4.2 Metoda CEM

Glavni namen razvoja CEM metode (Concrete equivalent mortar) je, da bi zmanjšali količino mešanic za preizkušanje in pospešili izvajanje testiranj, ki so potrebna za določitev optimalnih količin dodatkov v betonu. Ta namen dosežemo tako, da betonu poiščemo njemu ekvivalentno malto, ki ima primerljive reološke lastnosti z betonom.

Ekvivalentna malta je bila prvotno definirana kot mešanica betona, presejana skozi sito 5 mm in tisti del, ki ostane na situ, izločimo. Presevek pa se imenuje malta enakovredna betonu. Takšna mešanica dovoljuje uporabo mešalcev za malto. Pomembno je tudi, da so reološke lastnosti direktno in enostavno povezljive z reološkimi lastnostmi betonov. Ker pa je tak proces določanja ekvivalentne malte zamuden, je bilo potrebno najti metodo, ki bi omogočala projektiranje betonu ekvivalentne malte brez sejanja. Raziskovalci so tako s pomočjo računa izločili grobe frakcije agregata nad 5 mm.

Ob upoštevanju naštetih kriterijev je bilo potrebno nato izbrati preizkuse, ki bodo opredelili ekvivalentno malto. Ključnega pomena je bilo, da je metoda uporabna tako za malte kot tudi za betone in da se jo lahko prenese v prakso. Da bi to dosegli, je bilo upoštevanih nekaj preprostih kriterijev:

- hitrost – da omogoča hitro izvedbo velikega števila preizkusov,

- preprostost – da je uporabna za tiste, ki imajo na voljo standardno opremo,
- vsestranskost – da je uporabna za različne konsistence,
- zanesljivost – da obstaja dobra povezava z reološkimi lastnostmi betona.

Ob upoštevanju teh kriterijev je bila izbrana metoda z razlezom.

Za namen preiskave je bilo sestavljenih pet mešanic, od katerih vsaka temelji na drugačnem principu sestave:

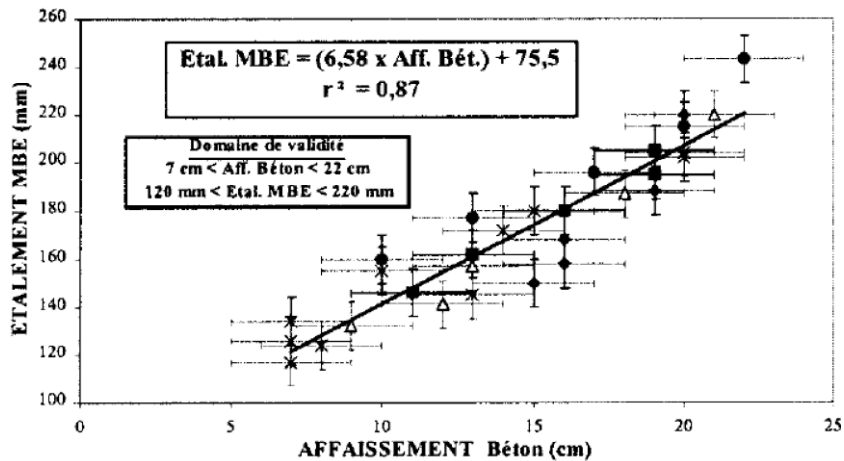
1. Cement in agregat v razmerju s sestavo betona (klasična cementna malta),
2. Cement in agregat v razmerju s sestavo betona, dodana so groba zrna agregata pod 5 mm,
3. Cement in agregat v razmerju s sestavo betona, dodano je toliko finega agregata, da je specifična površina zrn enaka v malti in betonu,
4. Cement in agregat v razmerju s sestavo betona, dodana so fina in groba zrna agregata pod 5 mm, tako da je skupni masni delež agregata v malti enak deležu agregata v betonu,
5. Cement in agregat v razmerju s sestavo betona, dodana so fina in groba zrna agregata pod 5 mm v takšni količini, da je skupna specifična površina zrn v malti enaka kot v betonu.

V/C razmerje malte mora biti enako V/C razmerju betona.

Potrebna količino agregata 0/4 v malti se izračuna tako, da količini agregata frakcije 0/4, ki je v betonu, prištejemo še nadomestek v obliki frakcije 0/4 za vsa ostala večja zrna, ki so v betonu. To lahko izračunamo s pomočjo mase agregata.

V mešanicah 3 in 5 je omenjena specifična površina zrn agregata. Princip CEM metode je, da se grobi agregat zamenja z drobnim agregatom na tak način, da je specifična površina drobnih zrn v malti enaka skupni specifični površini grobih in finih zrn v betonu.

Na podlagi izvedenih preizkusov na teh mešanicah ob dodajanju različnih superplastifikatorjev so ugotovili, da so reološke lastnosti betonov in njim ekvivalentnih malt med seboj povezane. Korelacijski faktor je znašal $R^2=0,87$ (Grafikon 6).



Grafikon 6: Korelacijska krivulja med razlezom CEM in posedom betona [18]

S pomočjo CEM metode lahko primerjamo reološke lastnosti in tudi ostale lastnosti svežih betonov in malt. Zelo uporabna je pri določanju količine in vrste dodatka v betonu. V primeru, da poznamo ustrezno korelacijo, lahko ocenimo razlez ali posed betona. Zavedati pa se moramo, da se korelacija določa za vsako mešanico posebej in ni univerzalna (razen pri betonih, kjer spreminjamo samo količino dodatka), temveč se jo določa eksperimentalno. [19]

5 LASTNE PREISKAVE NA SVEŽIH CEMENTNIH KOMPOZITIH

5.1 Uvod in namen preiskav

Poudarek pri eksperimentalnem delu diplomske naloge je bil na preiskavah reoloških lastnosti svežih cementnih malt, ki so bile sestavljene na podlagi sestave izbranih betonov iz drugih diplomskih nalog po metodi CEM. Vse preiskave so bile opravljene v Konstrukcijsko – prometnem laboratoriju Fakultete za gradbeništvo in geodezijo. Glavni cilj preiskav je bil določiti in opisati vpliv V/C razmerja in količine superplastifikatorja na reologijo malte.

Za potrebe raziskav je bilo zasnovanih 17 različnih mešanic cementnih malt, ki so bile sestavljene na podlagi v drugih diplomskih nalogah že preizkušeni betonov.

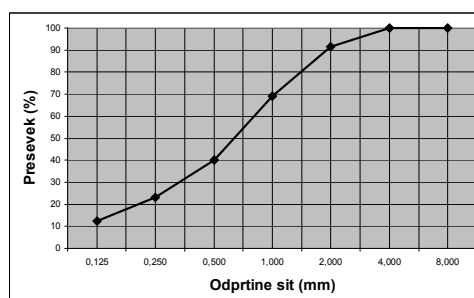
Osnovo so nam predstavljale 4 osnovne malte, ki smo jim nato po korakih zmanjševali V/C razmerje ali količino superplastifikatorja.

Da smo lahko ocenili vpliv V/C razmerja in količine superplastifikatorja na reologijo svežih cementnih malt, smo izvedli preiskavo z razlezom po standardu SIST EN 1015-3. Poleg te standardne preiskave smo izvedli tudi preiskavo z rotacijskim reometrom ConTec Viscometer 5, ki nam je dala še natančnejši vpogled v reologijo svežih cementnih malt, saj ima prirejen merilni sistem za merjenje na maltah.

5.2 Uporabljeni materiali

5.2.1 Agregat

Za agregat v naših svežih cementnih kompozitih smo uporabili zračno suh drobljen apnenčev agregat frakcije 0/2.



Grafikon 7: Zrnavostna krivulja agregata 0/2

5.2.2 Voda

Uporabili smo pitno vodo iz ljubljanskega vodovodnega omrežja.

5.2.3 Cement

Za naše preiskave sta bili uporabljeni dve vrsti cementa. Prvi je bil cement CEM I 42,5 R. To je portlandski cement trdnostnega razreda 42,5 z visoko zgodnjo trdnostjo (R). Sestavljen je iz minimalno 95 % klinkerja in sadre kot regulatorja vezanja. Primeren je tudi za najzahtevnejše gradnje, kjer se zahtevajo visoke začetne in končne trdnosti. [5]

Preglednica 7: Karakteristike cementa CEM I 42,5 R [5]

Kemijske zahteve	Zahteve standarda	Dosežene vrednosti
Vsebnost sulfata (SO ₃)	< 4,0 %	< 3,0 %
Mehanske in fizikalne lastnosti		
Zgodnja trdnost, 2 dneva	> 20 MPa	> 28 MPa
Standardna trdnost, 28 dni	42,5 – 62,5 MPa	> 54 MPa
Čas začetka vezanja	> 60 min	> 100 min
Prostorninska obstojnost	< 10 min	< 1 min
Prostorninska teža	3,05 – 3,10 g/cm ³	

Drugi uporabljeni cement je bil cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R. To je portlandski cement z dvema dodatkom: apnencem (LL) in žlindro (S). Trdnostni razred je 42,5 z visoko zgodnjo trdnostjo. Vsebuje minimalno 80 % portlandskega klinkerja, 6 – 20 % mešanega dodatka (apnenec, žindra), maksimalno 5 % polnil in sadro kot regulator vezanja. Namenjen je za najzahtevnejše gradnje, pri katerih se zahtevajo visoke začetne trdnosti. Združljiv je z najrazličnejšimi dodatki za betone. [20]

Preglednica 8: Karakteristike cementa CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R [20]

Kemijske zahteve	Zahteve standarda	Dosežene vrednosti
Vsebnost sulfata (SO ₃)	≤ 4,0 %	2,8 %
Vsebnost klorida	≤ 0,1 %	0,05 %
Mehanske in fizikalne lastnosti		
Zgodnja trdnost, 2 dneva	≥ 20 MPa	27 MPa
Standardna trdnost, 28 dni	42,5 – 62,5 MPa	52 MPa
Čas začetka vezanja	≥ 60 min	180 min
Prostorninska obstojnost	≤ 10 min	≤ 1 min

5.2.4 Superplastifikator

V naših raziskavah smo uporabili visoko učinkovit superplastifikator nove generacije (hiperplastifikator), ki je narejen na osnovi polikarboksilatov. Njegova uporaba nam omogoča:

- močno zmanjšanje vsebnosti zamesne vode ob nespremenjeni obdelavnosti cementnega kompozita in s tem povečanje trdnosti,
- močno izboljšanje obdelavnosti ob nespremenjeni vsebnosti zamesne vode,
- mnogo počasnejši padec obdelavnosti s časom kot pri uporabi običajnih superplastifikatorjev.

Omenjeni superplastifikator se veže na cementne delce in zaradi svoje strukture polimerne molekule obdajo cementne delce ter s tem preprečijo njihovo združevanje. Adsorpcija poteka postopno, zato je čas povečane obdelavnosti daljši kot pri običajnih superplastifikatorjih. Doziramo ga od 0,2 do 1,5 % glede na maso cementa: odvisno od V/C razmerja, zelene obdelavnosti in vrste cementa. [21]

Preglednica 9: Karakteristike hiperplastifikatorja [21]

Lastnosti	Deklarirane vrednosti z dopustnimi odstopanji
Izgled	Tekočina rjavo rumene barve
Gostota, 20°C	1,06 ± 0,02 kg/dm ³
pH	3 ± 1
Vsebnost vodotopnih kloridov	Ne vsebuje kloridov
Vsebnost alkalij	< 3 %

5.2.5 Aerant

V naše cementne mešanice smo aerant dodajali z namenom povečanja stabilnosti sveže mešanice. Uporabljeni aerant se dozira v majhnih količinah od 0,02 – 0,3 % glede na težo cementa. V mešanico ga doziramo razredčenega v vodi. [2, 21]

Preglednica 10: Karakteristike aeranta [21]

Lastnosti	Deklarirane vrednosti z dopustnimi odstopanji
Izgled	Tekočina rumeno-rjave barve
Gostota, 20°C	$1,01 \pm 0,02 \text{ kg/dm}^3$
Vsebnost suhe snovi	$5,0 \pm 0,5 \%$
pH	12 ± 1
Vsebnost vodotopnih kloridov	Ne vsebuje kloridov
Vsebnost alkalij	$< 1 \%$

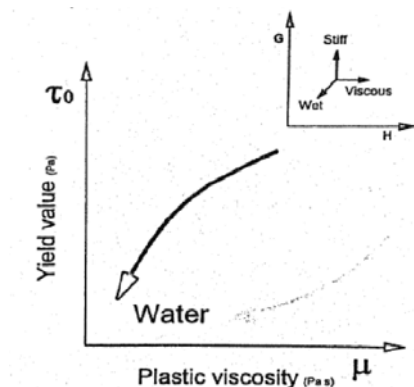
5.3 Postopki modifikacije

5.3.1 Manj vode

Pri skupinah mešanic, ki so podrobneje opisane v poglavju sestava receptur, mr1, mp1 in ma1 smo na podlagi etalonske mešanice v vsaki skupini pripravili še tri mešanice, ki smo jih dobili tako, da smo zmanjšali količino vode za 5, 10 ali 15 %.

5.3.1.1 Vpliv V/C razmerja na lastnosti svežih cementnih kompozitov

V/C razmerje v veliki meri vpliva na lastnosti svežih cementnih kompozitov. Da bi zagotovili popolno hidratacijo je praviloma potrebno V/C razmerje okrog 0,4. Zavedati pa se moramo, da je pri takšnem V/C razmerju brez dodatka plastifikatorja ali superplastifikatorja obdelavnost cementnih kompozitov praviloma težka. V praksi se zato uporabljajo višja V/C razmerja. Da bi spremenili V/C razmerje lahko zmanjšamo oz. dodamo vodo ali pa dodamo oz. zmanjšamo cement. S takšnimi ukrepi dosežemo praviloma enako trdnost strjenih cementnih kompozitov, vpliv na lastnosti svežih cementnih kompozitov pa je različen. Plastična viskoznost se povečuje hitreje, ko zmanjšujemo količino vode, kakor če povečujemo količino cementa.



Grafikon 8: Vpliv vode na vrednosti τ_0/η [13]

5.3.2 Manj superplastifikatorja

Skupino mešanic md smo pripravili tako, da smo glede na etalonsko mešanico mp1e v vsaki mešanici zmanjšali količino superplastifikatorja za 5, 10, 15, 25 ali 35 %. V/C razmerje je ostalo enako.

5.4 Postopek priprave in sestava receptur cementnih kompozitov

5.4.1 Sestava receptur

Vsi cementni kompoziti, ki so bili uporabljeni v preiskavi, so bili sestavljeni iz že prej opisanih materialov (agregata, cementa, vode in kemijskih dodatkov). Ker smo uporabili agregat drobne frakcije 0/2, se naši cementni kompoziti tehnično imenujejo malte. Za potrebe preizkusov je bilo sestavljenih več vrst malt, ki smo jih razdelili v skupine.

SKUPINA MEŠANIC mr1

Pri prvi skupini mešanic smo uporabili princip zmanjševanja vode. Mešanica mr1e je predstavljala etalon, v ostalih mešanicah pa smo zmanjšali količino vode za 5, 10 in 15 % glede na mešanico mr1e. V teh mešanicah smo uporabili cement CEM I 42,5 R.

Preglednica 11: Sestava mešanic mr1

Materiali (g)	Mešanice			
	mr1e	mr15	mr110	mr115
Agregat	6050	6050	6050	6050
Cement ¹	2600	2600	2600	2600
Voda	1362	1294	1226	1158
¹ uporabljen je bi cement CEM I 42,5 R				

SKUPINA MEŠANIC mp1

Druga skupina mešanic malte mp1 je imela podobno sestavo kot prva skupina. Razlika je bila le v tem, da smo tem mešanicam dodali superplastifikator. Etalon je predstavljala mešanica mp1e, v ostalih mešanicah pa smo zopet zmanjšali količino vode za 5, 10 in 15 %. Količina superplastifikatorja je ostala pri vseh mešanicah enaka. Tudi pri teh mešanicah smo uporabili cement CEM I 42,5 R.

Preglednica 12: Sestava mešanic mp1

Materiali (g)	Mešanice			
	mp1e	mp15	mp110	mp115
Agregat	6050	6050	6050	6050
Cement ¹	2600	2600	2600	2600
Voda	1362	1294	1226	1158
Dodatek ²	7,8	7,8	7,8	7,8
¹ uporabljen je bil cement CEM I 42,5 R				
² za dodatek smo uporabili superplastifikator				

SKUPINA MEŠANIC ma1

V tej skupini mešanic smo ohranili podobno sestavo kot v prvih dveh skupinah. V mešanicah skupine ma1 smo poleg superplastifikatorja dodali še aerant. Količina superplastifikatorja in aeranta se v posameznih mešanicah ni spreminjala. Etalon je predstavljala mešanica ma1e, ostalim mešanicam pa smo zopet zmanjšali količino vode za 5, 10 in 15 %. Za pripravo teh mešanic smo uporabili cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R.

Preglednica 13: Sestava mešanic ma1

Materiali (g)	Mešanice			
	ma1e	ma15	ma110	ma115
Agregat	6045	6045	6045	6045
Cement ¹	2600	2600	2600	2600
Voda	1360	1292	1224	1156
Dodatek ²	2,6	2,6	2,6	2,6
Dodatek ³	1,56	1,56	1,56	1,56
¹ uporabljen je bil cement CEM II/A-M (LL-S) 42,5 R				
² za dodatek smo uporabili superplastifikator				
³ za dodatek smo uporabili aerant				

SKUPINA MEŠANIC md

Pri tej skupini mešanic etalon predstavlja mešanica mp1e. V mešanicah md smo glede na mešanico mp1e zmanjševali količino superplastifikatorja za 5, 10, 15, 25 in 35 %. V teh mešanicah smo uporabili cement CEM I 42,5 R.

Preglednica 14: Sestava mešanic md

Materiali (g)	Mešanice					
	mp1e	md5	md10	md15	md25	md35
Agregat	6050	6040	6040	6040	6040	6040
Cement ¹	2600	2600	2600	2600	2600	2600
Voda	1362	1356	1356	1356	1356	1356
Dodatek ²	7,8	7,41	7,02	6,63	5,85	5,07
¹ uporabljen je bil cement CEM I 42,5 R						
² za dodatek smo uporabili superplastifikator						

5.4.2 Postopek mešanja

Mešalec

Naše mešanice smo pripravljali s pomočjo specialnega mešalca RILEM-CEN (Slika 8). Ta se hkrati obrača okoli svoje vzdolžne osi, istočasno pa tudi planetarno okoli pogonske osi. Mešalec nam omogoča dve hitrosti mešanja (Preglednica 15).



Slika 8: Planetarni mešalec v Konstrukcijsko - prometnem laboratoriju na FGG

Preglednica 15: Število obratov mešalca RILEM-CEN [22]

Hitrost mešanja	Število obratov okoli lastne osi (o/min)	Število obratov okoli pogonske osi (o/min)
I	140 ± 5	62 ± 5
II	285 ± 10	125 ± 10

Postopek mešanja

Najprej smo stehali vse komponente, ki smo jih potrebovali za naše cementne mešanice. Nato smo v posodo mešalca dodali cement in pričeli z mešanjem na prvi hitrosti. V prvih 30 sekundah smo počasi dodajali vodo in morebitne kemijske dodatke. Nato smo v naslednjih 30 sekundah dodali še agregat. Mešalec smo prekopili na drugo hitrost. Po preteku 30 sekund smo mešalec ustavili in očistili morebitne prilepljene delce na stenah posode mešalca. Nato smo mešali na drugi hitrosti še 60 sekund in vzorec je bil pripravljen za preiskave. [22]

5.5 Metode preiskav

5.5.1 Določanje konsistence svežih cementnih kompozitov z razlezom

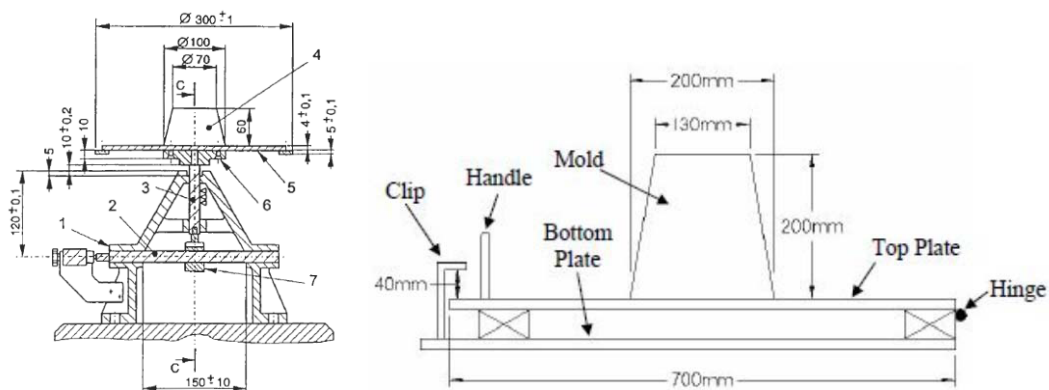
Poznamo dva postopka za preizkušanje razleza. Prvi je namenjen preizkušanju malt in je podrobno opisan v standardu EN 1015-3:1999, drugi pa je namenjen preizkušanju betonov in je opisan v standardu SIST EN 12350-5:2009. Postopka sta v osnovi zelo podobna. Največja razlika je ravno v dimenzijah stresalnih miz in njihovem delovanju ter sami konstrukcijski zasnovi (oblika in podrobne dimenzije so prikazane na spodnjih dveh slikah (Slika 9 in 10)). Manjše razlike so še med nabijačema in merilnima trakovoma (Preglednica 16). Rezultat preizkusov je v obeh primerih velikost razleza podana v mm. Razlez se meri v dveh pravokotnih smereh, nato pa se izračuna povprečje. [23, 24]

Preglednica 16: Razlika med pripomočki za malto in beton [23, 24]

Pripomoček	Pri malti	Pri betonu
Nabijač	Okrogel, premera 40 mm, dolžine cca. 200 mm in mase 0,25 kg	Kvadraten, dimenzije 40 x 40 mm, dolžine cca. 200 mm, masa ni predpisana
Merilni trak	Zmogljivost merjenja premerov do 300 mm na milimeter natančno	Zmogljivost merjenja premerov do 700 mm na milimeter natančno



Slika 9: Stresalni mizi za preizkus z razlezom za malte (levo) in betone (desno) [25, 26]



Slika 10: Dimenzije stresalnih miz za preizkus z razlezom [24, 27]

Postopek preizkusa

Na začetku preizkusa najprej obrišemo in navlažimo ploščo stresalne mizice in notranjo stran konusnega kalupa. Kalup postavimo na sredino stresalne mizice in vanj v dveh plasteh vgradimo cementno mešanico. Pri tem vsako plast nabijemo z lesenim nabijačem z desetimi udarci. Ko je vgrajevanje končano, kalup vertikalno dvignemo z enakomerno hitrostjo. Nato pričnemo s stresanjem mizice. Hitrost stresanja mora biti konstantna in ne prehitra (cca. en padec na sekundo). Po 15-ih padcih izmerimo razlez cementne mešanice v dveh pravokotnih smereh. Rezultat preizkusa je povprečna vrednost teh dveh razlezov.



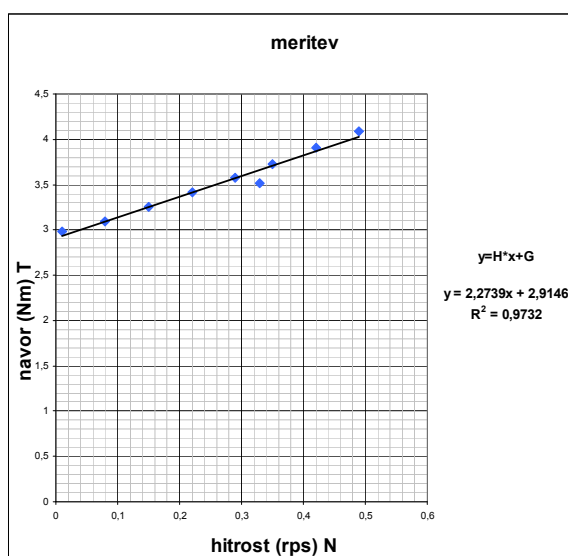
Slika 11: Potek preizkusa z razlezom

5.5.2 Preizkus z reometrom

V naših preiskavah smo uporabljali napravo ConTec Viscometer 5, ki jo uvrščamo med koaksialne valjaste reometre. Sestavljena je iz zunanega in notranjega cilindra, merilnega tipala, električnega motorja in računalnika. Deluje po sistemu zunanega (vrteči) in notranjega (fiksne) cilindra. Premer zunanega cilindra (posode) je 20 cm, premer notranjega merilnega valja pa je 17 cm. Zunanji cilinder se vrti z določeno hitrostjo, notranji cilinder pa meri navor, ki ga povzroča merjena tekočina. Zunanja posoda se najprej 5 sekund vrti z najvišjo hitrostjo (0,49 o/s), da se vzpostavi ravnotežje v mešanici. Nato se hitrost postopoma zmanjšuje v osmih korakih (0,49, 0,42, 0,36, 0,29, 0,22, 0,15, 0,08 in 0,01 o/s), ki trajajo po 5 sekund, do hitrosti 0,01 o/s. Na koncu se posoda zavrti še z hitrostjo 0,33 o/s in reometer odčita še zadnjo deveto vrednost preiskave. Dobljeni podatki se prenašajo na računalnik, kjer jih nato s programom FreshWin shranimo. Kot rezultat meritev dobimo momentno-hitrostni diagram, iz katerega program izračuna faktorja H (odpor proti spremembi strižne hitrosti) in G (navor, pri katerem se tečenje umiri). [28, 29]



Slika 12: Potek preizkusa z reometrom



Grafikon 9: Primer momentno-hitrostnega diagrama, ki ga izriše reometer ob vsakem preizkusu

Tako shranjene podatke lahko izvozimo v Microsoft Excel, kjer jih s pomočjo spodnjih enačb preračunamo v τ_0 (strižna napetost na meji tečenja) in η (koeficient viskoznosti).

- Enačba za preračun H v η :

$$\eta = H \cdot \frac{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right)}{\left(8 \cdot \pi^2 \cdot h \right)}$$

- Enačba za preračun G v τ_0 :

$$\tau_0 = G \cdot \frac{\left(\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_0^2} \right)}{\left(4 \cdot \pi \cdot h \cdot \ln \left(\frac{R_0}{R_i} \right) \right)}$$

R_0 – polmer zunanega valja reometra

R_i – polmer notranjega valja reometra

h – višina malte na rebrih valja reometra

Postopek meritve

Samo izvajanje meritev je popolnoma avtomatizirano. Meritev na enem vzorcu traja okrog 5 minut. Meritev se prične že, ko v mešalec dodamo vodo, saj program od nas zahteva, da označimo čas dodajanja vode. Nato zmešano malto vlijemo v posodo, ki jo vstavimo v reometer in še enkrat dobro premešamo. Reometer zapremo in poženemo program. Ko je prvi cikel končan: shranimo podatke, odpremo reometer, še enkrat premešamo malto, očistimo merilni valj, izmerimo višino do kod sega malta na merilnem valju, zapremo reometer in znova poženemo program. Ta postopek nato ponovimo še enkrat, tako da dobimo tri rezultate meritev.

6 REZULTATI

Rezultate raziskav sem razdelil na dve poglavji. V prvem poglavju sem opisal vpliv zmanjševanja V/C razmerja na reološke lastnosti sveže cementne malte, v drugem poglavju pa sem opisal rezultate vpliva količine superplastifikatorja na reološke lastnosti sveže cementne malte.

V obeh poglavjih so rezultati najprej podani v obliki preglednic in nato še v obliki grafov za vsako skupino mešanic malt posebej. Na grafiikonih v prvem poglavju je prikazan vpliv V/C razmerja na strižno napetost na meji tečenja, na dejanski razlez in na koeficient viskoznosti. Na koncu so tudi trije grafikoni, s katerimi sem primerjal vse tri skupine mešanic, pri katerih sem opazoval vpliv V/C razmerja na reološke lastnosti sveže cementne malte. Na grafiikonih v drugem poglavju pa je prikazan vpliv količine superplastifikatorja na strižno napetost na meji tečenja, na razlez s posedom (velikost razleza preden pričnemo z stresanjem stresalne mizice) in na koeficient viskoznosti.

6.1 Mešanice s spreminjanjem V/C razmerja

SKUPINA MEŠANIC mr1

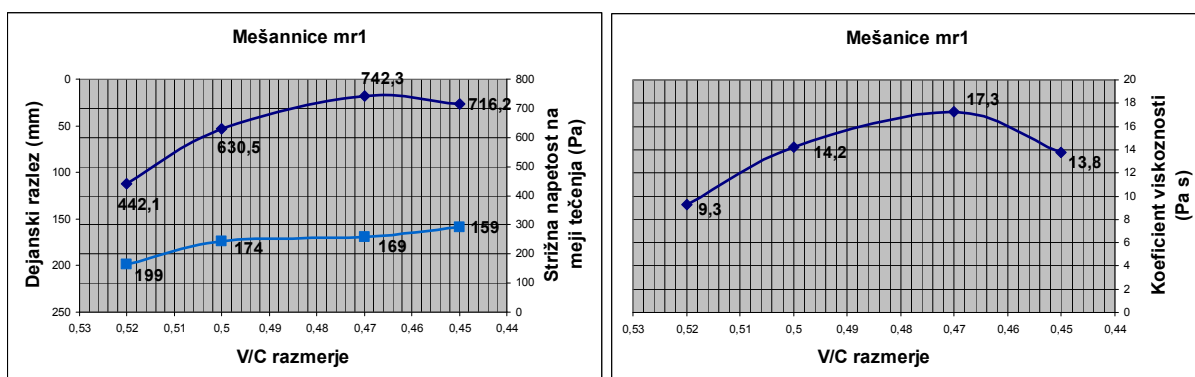
Najprej smo izvedli raziskave na mešanicah skupine mr1. To so sveže cementne malte brez dodatkov. Pri teh mešanicah smo postopoma zmanjševali V/C razmerje in ugotavljali njegov vpliv na obdelavnost in na reološke lastnosti sveže cementne malte. V preglednici 17 so prikazani rezultati raziskav pri mešanicah skupine mr1.

Preglednica 17: Rezultati pri mešanicah mr1

	Mešanice			
	mr1e	mr15	mr110	mr115
Dejanski razlez (mm)	199	174	169	159
Povp. τ_o (Pa)	442,1	630,5	742,3	716,2*
Povp. η (Pa s)	9,3	14,2	17,3	13,8*
t_0	00:10:59	00:11:38	00:09:01	00:10:26
t	00:22:06	00:24:15	00:19:48	00:21:59
h (m)	0,124	0,124	0,124	0,155
V/C razmerje	0,52	0,50	0,47	0,45
Povp. τ_o – povprečna napetost na meji tečenja				
Povp. η - povprečni koeficient viskoznosti				
t_0 – čas od dodatka vode v mešanico do prve preiskave na reometru				
t – skupni čas od dodatka vode v mešanico do konca zadnje preiskave na reometru				
h – višina, do katere je merilna glava reometra potopljena v malto				
* meritev ni več uporabna (presuha malta)				

Za lažjo predstavo in razlago sem zgornje podatke predstavil v grafikonih 10 in 11. Grafikona prikazujeta kako se spreminjata koeficient viskoznosti (η) in strižna napetost na meji tečenja (τ_o) v odvisnosti od V/C razmerja pri mešanicah mr1. Na grafu 10, kjer je prikazana strižna napetost na meji tečenja, sem zraven dodal tudi vrednosti dejanskega razleza, saj sta ti dve količini povezani. Vsaka točka na grafikonu pripada eni malti, vrstni red pa je takšen kot v preglednici zgoraj. Ob analizi obeh grafikonov lahko takoj opazimo, da imata obliko narobe obrnjene črke U, kar je v nasprotju s pričakovanimi rezultati. V literaturi namreč zasledimo, da parametra η in τ_o ob zmanjševanju V/C razmerja naraščata oz. da se ob dodajanju vode oba parametra približujeta izhodišču. [12] Če pogledamo natančneje, opazimo, da le zadnja točka v grafikonu, ki predstavlja malto mr115, odstopa od teoretičnih in naših predpostavk. To je samo potrdilo naše opažanje v laboratoriju, ko smo pri malti mr115 ugotovili, da je bila vrednost razleza samo 159 mm, kar pomeni, da je bila malta mr115 pregosta oz. presuha, da bi lahko pridobili uporabne meritve s pomočjo reometra ConTec Viscometer 5. Uporabljeni

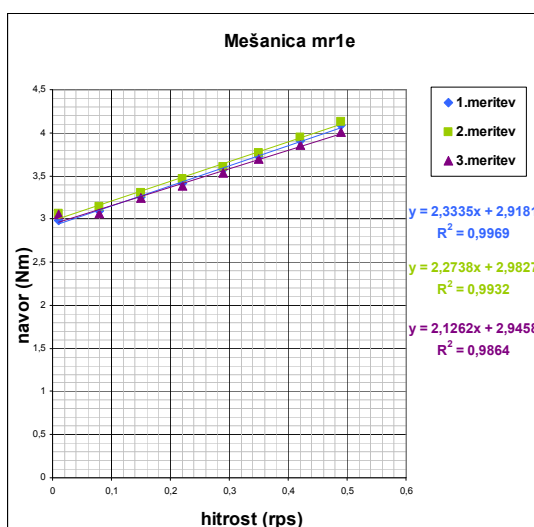
reometer namreč omogoča merjenje reoloških parametrov samo na mešanicah, ki so ustrezno plastične do tekoče. Tudi če pogledamo tri krivulje preiskav pri malti mr115 na momentno-hitrostnem diagramu (T-N), lahko vidimo, da so odstopanja precej večja kot pri ostalih maltah, kar nam tudi potrjuje, da malta ni bila primerna za izvajanje raziskav na uporabljenem reometru.



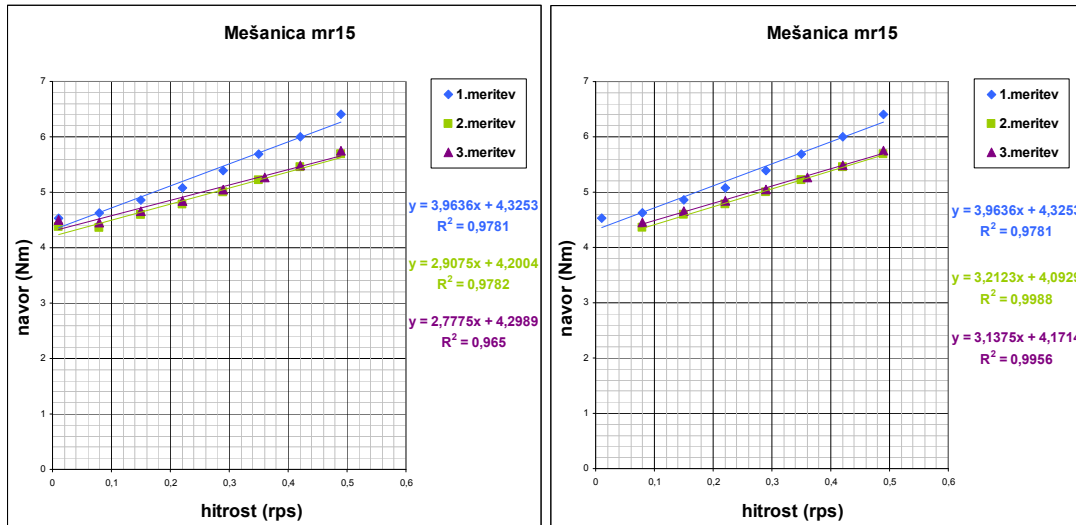
Grafikon 10 (levo): Strižna napetost na meji tečenja in dejanski razlez ob spreminjanju V/C razmerja pri mešanicah mr1

Grafikon 11 (desno): Koeficient viskoznosti ob spreminjanju V/C razmerja pri mešanicah mr1

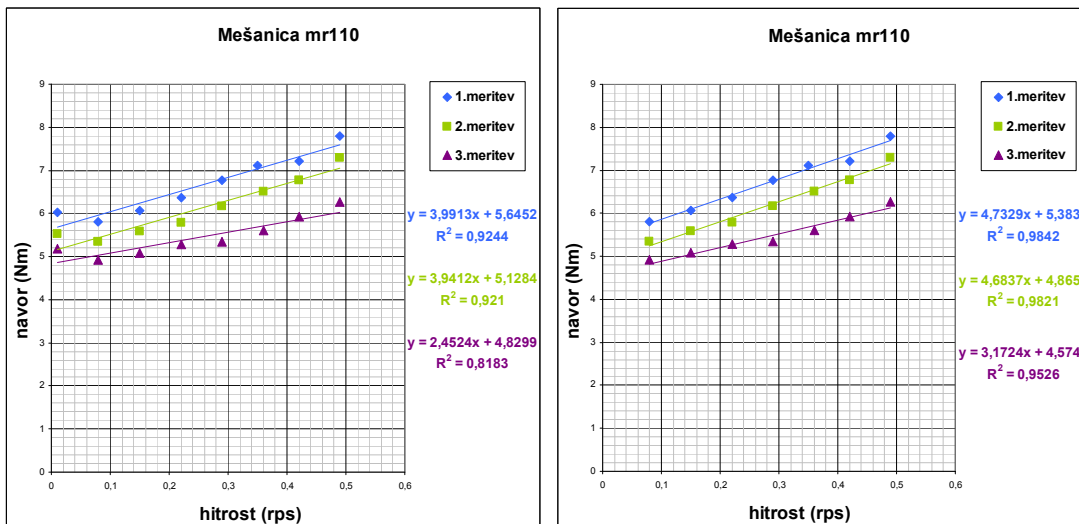
V nadaljevanju so prikazani T-N diagrami tistih mešanic, pri katerih smo odstranili vrednosti meritev, ki so preveč odstopale in T-N diagram mešanice mr1e, ki prikazuje zelo lepo ujemanje vseh treh meritev. Pri mešanici mr15 smo pri 2. in 3. meritvi odstranili prvi rezultat, pri mešanici mr110 smo pri vseh treh meritvah odstranili prvi rezultat, pri mešanici mr115 pa smo pri 1. in 2. meritvi odstranili prvi rezultat ter tretjo meritev v celoti.



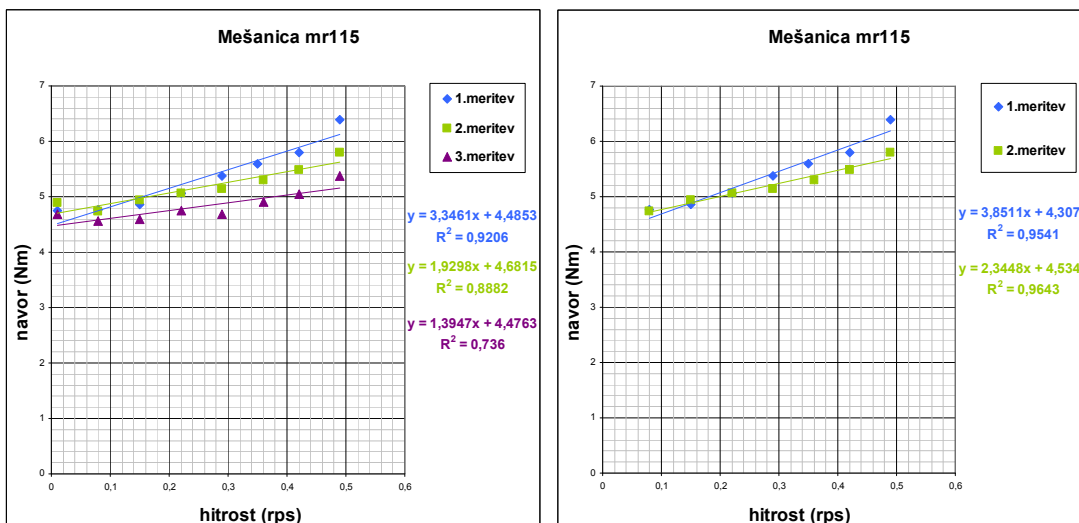
Grafikon 12: Primer dobrih rezultatov meritev, ki so prikazane na T-N diagramu



Grafikon 13: Rezultati meritev mešanice mr15 (levo) in popravljene rezultati meritev (desno)



Grafikon 14: Rezultati meritev mešanice mr110 (levo) in popravljene rezultati meritev (desno)



Grafikon 15: Rezultati meritev mešanice mr115 (levo) in popravljene rezultati meritev (desno)

SKUPINA MEŠANIC mp1

Naslednja skupina mešanic v raziskavi je bila skupina mp1. To je skupina svežih malt, ki temelji na mešanicah mr1, le da je v teh dodan še superplastifikator. Tudi v teh mešanicah smo postopoma zmanjševali le V/C razmerje in ugotavljali njegov vpliv na obdelavnost in reološke lastnosti sveže cementne malte. V preglednici 18 so prikazani rezultati raziskav pri mešanicah mp1.

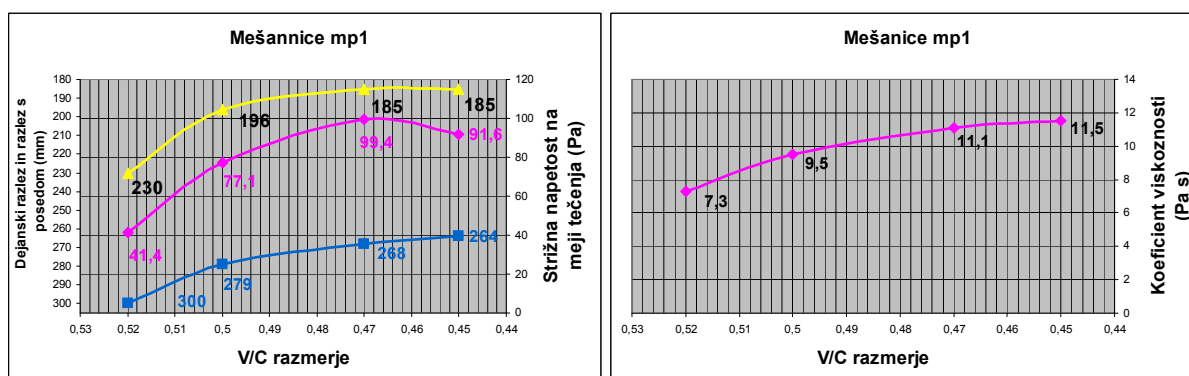
Preglednica 18: Rezultati pri mešanicah mp1

	Mešanice			
	mp1e	mp15	mp110	mp115
Razlez s posedom (mm)	230	196	185	185
Dejanski razlez (mm)	300 (11)	279	268	264
Povp. τ_o (Pa)	41,4	77,1	99,4	91,6
Povp. η (Pa s)	7,3	9,5	11,1	11,5
t_0	00:12:00	00:11:52	00:11:49	00:12:00
t	00:19:13	00:18:21	00:19:10	00:19:03
h (m)	0,113	0,113	0,113	0,111
V/C razmerje	0,52	0,50	0,47	0,45
Količina dodatka ¹	0,3 %	0,3 %	0,3 %	0,3 %
Razlez s posedom – razlez malte pred pričetkom stresa stresalne mizice				
(11) – število udarcev pri katerih smo dosegli maksimalen razlez				
Povp. τ_o – povprečna napetost na meji tečenja				
Povp. η – povprečni koeficient viskoznosti				
t_0 – čas od dodatka vode v mešanico do prve preiskave na reometru				
t – skupni čas od dodatka vode v mešanico do konca zadnje preiskave na reometru				
h – višina, do katere je merilna glava reometra potopljena v malto				
¹ za dodatek smo uporabili superplastifikator				

Če pogledamo rezultate pri mešanicah mp1 in jih primerjamo z rezultati pri mešanicah mr1, lahko opazimo, da je 0,3 % dodanega superplastifikatorja glede na količino cementa povzročilo drastično zmanjšanje vrednosti strižne napetosti na meji tečenja in zmanjšanje koeficienta viskoznosti. Prav tako opazimo, da se je zelo povečal tudi razlez malte. Že pri razlezu s posedom, ki smo ga dobili s standardiziranim preizkusom razleza s posedom (postopek kot pri betonu, le da smo tukaj uporabili stožec za preiskavo razleza malte), lahko opazimo, da je za približno 20 – 30 mm večji od dejanskega razleza mešanic mr1. Dejanski razlez mešanic mp1 pa je večji za okoli 100 mm. Zanimivo je tudi, da smo pri mešanici mp1e že pri 11 udarcih dosegli maksimalen razlez 300 mm. Tako lahko sklepamo, da je ta mešanica imela previsoko V/C razmerje glede na količino dodanega superplastifikatorja oz. je bilo 0,3 % dodanega superplastifikatorja prevelik odmerek za V/C = 0,52.

Superplastifikator nam namreč omogoča večjo sposobnost tečenja mešanice, uporabo nižjih vrednosti V/C razmerja, lažjo obdelavnost in boljšo vgradljivost.

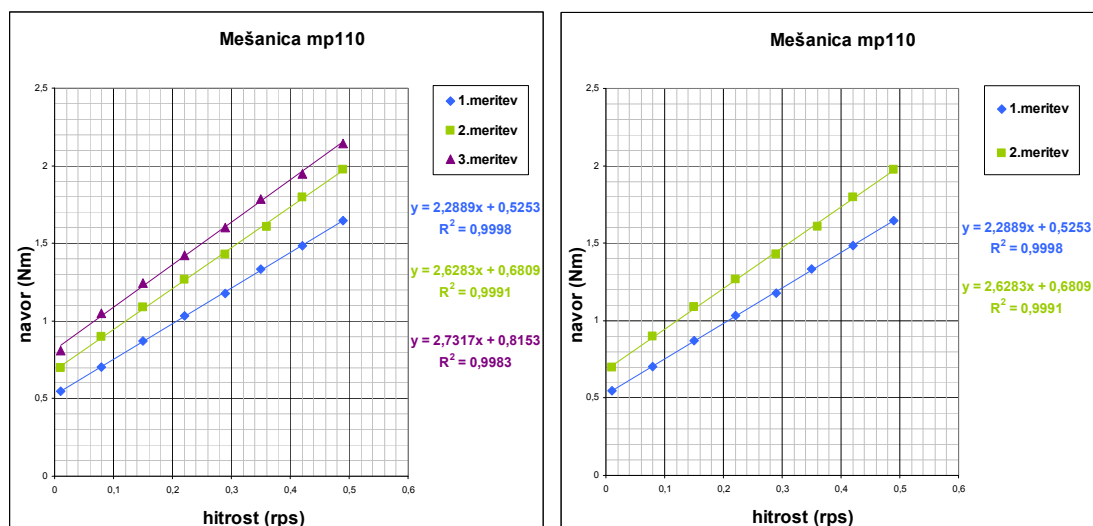
Na grafikonih 16 in 17 je prikazano spreminjanje strižne napetosti na meji tečenja, dejanskega razleza in koeficienta viskoznosti v odvisnosti od V/C razmerja. Če pogledamo koeficient viskoznosti, opazimo, da stalno narašča z zmanjševanjem V/C razmerja, tako kot smo pričakovali iz predelane literature. Vendar pa ko pogledamo grafikon strižne napetosti na meji tečenja, ponovno opazimo, da ima obliko narobe obrnjene črke U in tudi pri teh mešanicah znova od pričakovanih rezultatov odstopa samo zadnja mešanica mp115. Če pogledamo še dejanski razlez, vidimo da se je tudi ta med zadnjima dvema mešanicama zmanjšal zgolj za 4 mm, medtem ko so pri razlezu s posedom vrednosti enake. Tudi razlika med koeficientoma viskoznosti med zadnjima dvema mešanicama je zelo majhna. Iz vsega tega lahko sklepamo, da je zmanjšanje strižne napetosti na meji tečenja pri zadnji točki posledica neustrezne konsistence malte za preiskave s ConTec Viscometer 5, saj se po rezultatih razlezov v malti ni zgodila kakšna večja sprememba. Če upoštevamo 5 % napako meritve, bi lahko bil rezultat strižne napetosti na meji tečenja pri zadnjih dveh točkah podoben, okrog 95 Pa. To pa se sklada z rezultatom razleza.



Grafikon 16 (levo): Strižna napetost na meji tečenja, razlez s posedom (rumena črta) in dejanski razlez (modra črta) ob spreminjanju V/C razmerja pri mešanicah mp1

Grafikon 17 (desno): Koeficient viskoznosti ob spreminjanju V/C razmerja pri mešanicah mp1

Na grafikonu 18 so na T-N diagramu prikazni rezultati meritev na mešanici mp110 pred in po obdelavi podatkov, ko smo izločili tretjo meritev v celoti.



Grafikon 18: Rezultati meritev mešanice mp110 (levo) in popravljene rezultati meritev (desno)

SKUPINA MEŠANIC ma1

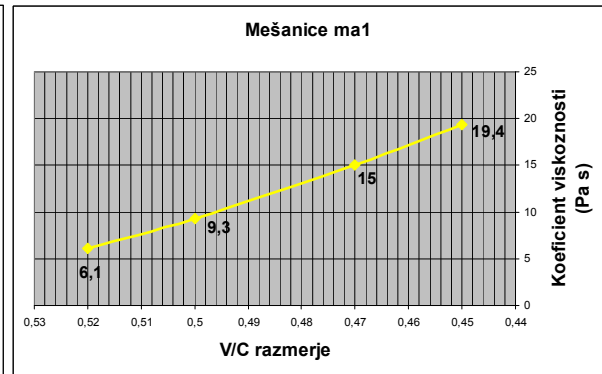
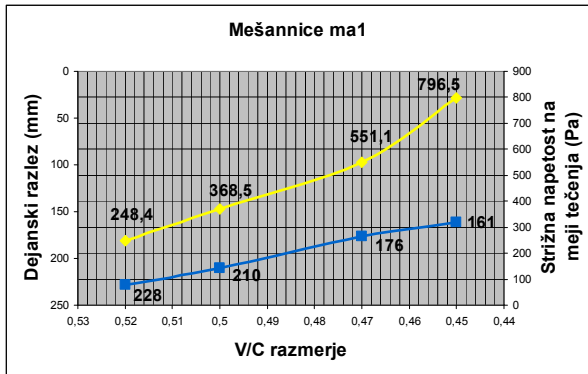
Skupina mešanic ma1 je bila zadnja od treh skupin mešanic, na katerih smo ugotavljali vpliv zmanjševanja V/C razmerja na reološke lastnosti sveže cementne malte. Skupino mešanic ma1 predstavljajo sveže malte, ki so podobne mešanicam mr1, le da sta v teh dodana superplastifikator in aerant. Tudi pri teh mešanicah smo postopno zmanjševali le V/C razmerje. V preglednici 19 so prikazani rezultati raziskav pri mešanicah ma1.

Preglednica 19: Rezultati pri mešanicah ma1

	Mešanice			
	ma1e	ma15	ma110	ma115
Dejanski razlez (mm)	228	210	176	161
Povp. τ_0 (Pa)	248,4	368,5	551,1	796,5
Povp. η (Pa s)	6,1	9,3	15,0	19,4
t_0	00:12:07	00:11:37	00:12:08	00:12:06
t	00:23:25	00:18:15	00:19:08	00:22:08
h (m)	0,130	0,130	0,126	0,122
Prostorninska teža (g/dm³)	2062	2060	2092	2130
V/C razmerje	0,52	0,50	0,47	0,45
Količina dodatka ¹	0,1 %	0,1 %	0,1 %	0,1 %
Količina dodatka ²	0,06 %	0,06 %	0,06 %	0,06 %
Povp. τ_0 – povprečna napetost na meji tečenja				
Povp. η – povprečni koeficient viskoznosti				
t_0 – čas od dodatka vode v mešanico do prve preiskave na reometru				
t – skupni čas od dodatka vode v mešanico do konca zadnje preiskave na reometru				
h – višina, do katere je merilna glava reometra potopljena v malto				
¹ za dodatek smo uporabili superplastifikator				
² za dodatek smo uporabili aerant				

Če ponovno primerjamo rezultate v tabelah pri vseh treh skupinah mešanic, lahko opazimo, da se vrednosti rezultatov v mešanicah ma1 dokaj enakomerno povečujejo glede na ostale mešanice.

Na grafikonih 19 in 20 je prikazano spreminjanje strižne napetosti na meji tečenja, dejanskega razleza in koeficienta viskoznosti v odvisnosti od V/C razmerja pri mešanicah ma1. Že takoj opazimo, da se ob zmanjševanju V/C razmerja pri tej skupini mešanic povečujeta tako koeficient viskoznosti kot tudi strižna napetost na meji tečenja. Tudi razlez se glede na skupine mešanic mr1 in mp1 zmanjšuje enakomerno. To je prva skupina mešanic pri kateri so se v celoti potrdila naša pričakovanja na podlagi preučene teorije.



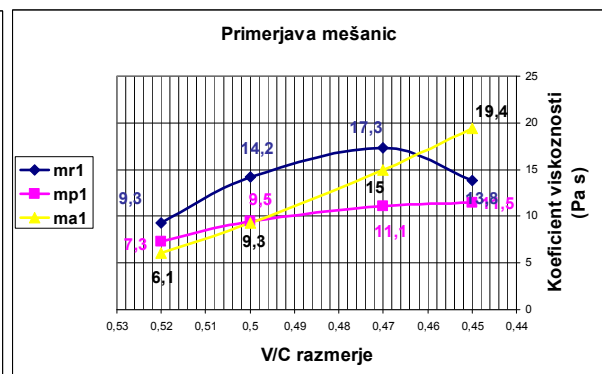
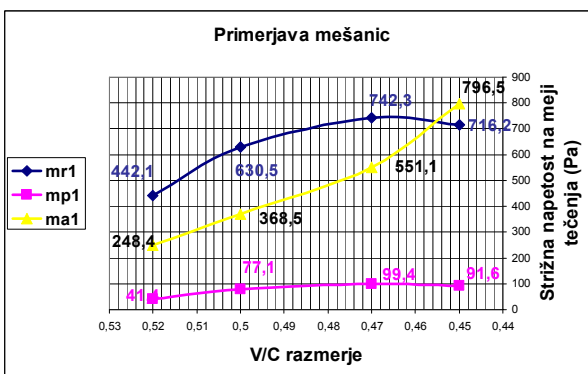
Grafikon 19 (levo): Strižna napetost na meji tečenja in dejanski razlez ob spreminjanju V/C razmerja pri mešanicah ma1

Grafikon 20 (desno): Koeficient viskoznosti ob spreminjanju V/C razmerja pri mešanicah ma1

Pri tej skupini mešanic ni bilo potrebno korigirati dobljenih rezultatov na reometru ConTec Viscometer 5, saj so se rezultati v T-N diagramih lepo ujemali in smo dobili ustrezne korelacijske faktorje (R^2).

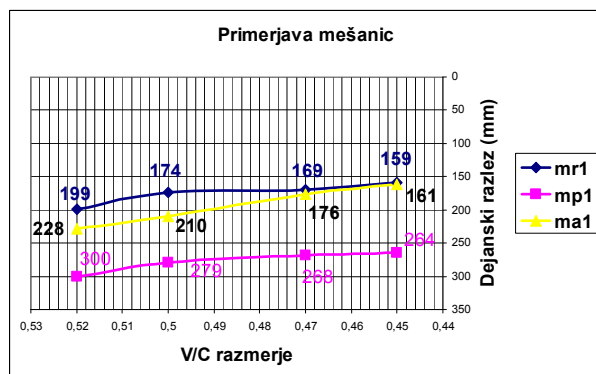
PRIMERJAVA REZULTATOV MED MEŠANICAMI mr1, mp1 in ma1

Da bi lažje videli kako spreminjane V/C razmerja vpliva na reološke lastnosti obravnavanih malt, sem rezultate vseh treh skupin mešanic prikazal na grafiikonih 21, 22 in 23, ki prikazujejo spreminjanje koeficienta viskoznosti, strižne napetosti na meji tečenja in razleza v odvisnosti od V/C razmerja pri mešanicah mr1, mp1 in ma1.



Grafikon 21 (levo): Strižna napetost na meji tečenja ob spreminjanju V/C razmerja -pri mešanicah mr1, mp1 in ma1

Grafikon 22 (desno): Koeficient viskoznosti ob spreminjanju V/C razmerja pri mešanicah mr1, mp1 in ma1



Grafikon 23: Dejanski razlezi ob spreminjanju V/C razmerja pri mešanicah mr1, mp1 in ma1

Iz zgornjih grafikonov in tabel rezultatov v posameznih skupinah mešanic malt lahko vidimo, da ima V/C razmerje precej velik vpliv na strižno napetost na meji tečenja, viskoznost in na velikost razleza malt. Večje kot je V/C razmerje, bolj so malte tekoče in s tem lažje obdelavne.

Če odmislimo podatka pri malti mr115, lahko ugotovimo, da povečevanje V/C razmerja zmanjšuje tako strižno napetost na meji tečenja, kakor tudi viskoznost. S tem smo tudi potrdili predhodne predpostavke, da se obe količini ob povečevanju V/C razmerja približujeta izhodišču.

Rezultate, ki najbolj sledijo ugotovitvam iz literature, dobimo pri mešanicah ma1, ki sta jim dodana superplastifikator (0,1 %) in aerant (0,06 %). Pri teh mešanicah opazimo, da se enakomerno zmanjševanje V/C razmerja odraža tudi na relativno enakomerno porazdeljenih rezultatih pri strižni napetosti na meji tečenja in pri viskoznosti. Prav tako se tudi dejanski razlez mešanic dokaj enakomerno zmanjšuje. Pri vseh treh rezultatih nekoliko odstopa le malta ma110, kar pa je lahko posledica tudi morebiti drugačnega odvzema agregata.

6.2 Mešanice s spreminjanjem količine superplastifikatorja

SKUPINA MEŠANIC md

Zadnja skupina raziskovanih mešanic je bila skupina md z referenčno malto mp1e. Ta skupina mešanic temelji na referenčni malti mp1e, ki ji postopoma zmanjšujemo količino superplastifikatorja od 5 – 35 %. V preglednici 20 so prikazani rezultati raziskav pri mešanicah md z referenčno malto mp1e.

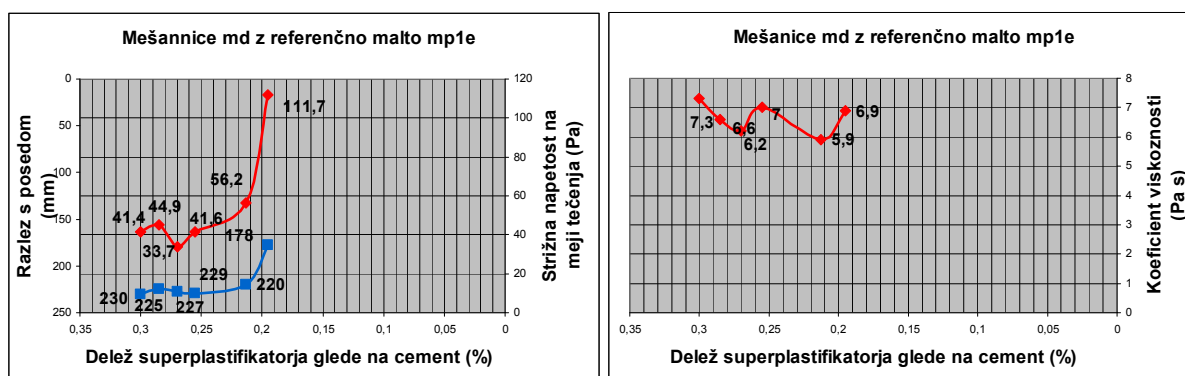
Preglednica 20: Rezultati pri mešanicah md z referenčno malto mp1e

	Mešanice					
	mp1e	md5	md10	md15	md25	md35
Razlez s posedom (mm)	230	225	227	229	220	178
Dejanski razlez (mm)	300 (11)	300 (11)	300 (9)	300 (12)	300	269
Povp. τ_0 (Pa)	41,4	44,9	33,7	41,6	56,2	111,7
Povp. η (Pa s)	7,3	6,6	6,2	7,0	5,9	6,9
t_0	00:12:00	00:13:05	00:09:22	00:33:50*	00:10:16	00:10:39
t	00:19:13	00:19:06	00:14:44	00:40:30*	00:15:10	00:15:38
h (m)	0,113	0,109	0,112	0,112	0,111	0,112
V/C razmerje	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52	0,52
Količina dodatka ¹	0,3 %	0,28 %	0,27 %	0,25 %	0,21 %	0,19 %
Razlez s posedom – razlez malte pred pričetkom stresanja stresalne mizice						
Vrednosti pri oklepajih predstavljajo število udarcev stresalne mizice, ko dosežemo maksimalen razlez						
Povp. τ_0 – povprečna napetost na meji tečenja						
Povp. η – povprečni koeficient viskoznosti						
t_0 – čas od dodatka vode v mešanico do prve preiskave na reometru						
t – skupni čas od dodatka vode v mešanico do konca zadnje preiskave na reometru						
h – višina, do katere je merilna glava reometra potopljena v malto						
¹ za dodatek smo uporabili superplastifikator						
* velik časovni razmak pri meritvi je verjetno posledica napačnega vnosa časa dodajanja vode v mešanico						

Iz preglednice 20 lahko razberemo, da rezultati strižne napetosti na meji tečenja in koeficienta viskoznosti zelo nihajo. Na podlagi literature [13] smo pričakovali, da naj zmanjšanje količine superplastifikatorja ne bi znatno vplivalo na koeficient viskoznosti, medtem ko naj bi se strižna napetost na meji tečenja povečevala.

Če najprej pogledamo razleze, lahko ugotovimo, da so bile vse malte zelo tekoče. Pri dejanskem razlezu vidimo, da smo skoraj pri vseh mešanicah dosegli maksimalen razlez prej kot v 15-ih udarcih stresalne mizice. Zaradi tega bomo za lažjo primerjavo rezultatov uporabili vrednosti razleza s posedom.

Za lažjo predstavbo je na grafikonih 24 in 25 prikazano spreminjanje strižne napetosti na meji tečenja, razleza s posedom in koeficienta viskoznosti v odvisnosti od zmanjševanja količine superplastifikatorja v mešanicah. Ob podrobnejši analizi ugotovimo, da so se naša pričakovanja, kljub temu, da rezultati nihajo, izpolnila. Rezultati koeficienta viskoznosti so nekoliko nihali okrog povprečne vrednosti, kar lahko pripišemo napaki meritve na reometru, zato lahko rečemo, da se viskoznost malte s spreminjanjem količine superplastifikatorja ni spremenila. Malce drugačne rezultate smo dobili pri strižni napetosti na meji tečenja. Vrednosti rezultatov so se bistveno povečale šele pri malti md35, ko smo količino superplastifikatorja zmanjšali na 0,19 %. Manjše naraščanje rezultatov je mogoče zaslediti od malte md15, pri kateri je količina superplastifikatorja 0,25 %, ter nato pri malti md25, ki ima 0,21 % superplastifikatorja glede na količino cementa.



Grafikon 24 (levo): Strižna napetost na meji tečenja in razlez s posedom ob spreminjanju količine superplastifikatorja pri mešanicah md z referenčno malto mp1e

Grafikon 25 (desno): Koeficient viskoznosti ob spreminjanju količine superplastifikatorja pri mešanicah md z referenčno malto mp1e

Iz zgornjih grafikonov lahko sklepamo, da smo pri maltah s količino superplastifikatorja večjo od 0,25 % dosegli zasičenje. To nam potrjujejo tudi razlezi s posedom malt mp1e, md5, md10 in md15, ki so skoraj identični, kakor tudi dejanski razlezi, pri katerih smo dosegli maksimalen razlez pred 15-imi udarci s stresalno mizico. Če bi hoteli ta sklep potrditi, bi bilo potrebno izdelati še dodatne mešanice, ki bi imele količino superplastifikatorja med 0,25 % in 0,19 % in opraviti dodatne preiskave.

7 ZAKLJUČEK

Sveži cementni kompoziti so izredno zapleteni materiali. Kljub velikemu številu opravljenih raziskav ostaja še veliko vprašanj brez odgovora. To lahko pripišemo tehnologiji in razvoju novih kemijskih in mineralnih dodatkov, ki se bodo vsekakor razvijali tudi v prihodnje.

Raziskave, ki sem jih opravljal v okviru svoje diplomske naloge, sem izvedel s pomočjo standardizirane metode določanja razleza na stresalni mizici za sveže malte in s pomočjo reometra ConTec Viscometer 5, ki nam ponuja boljše možnosti analize reoloških lastnosti svežih malt. Ugotavljam, da je reometer bolj primeren in daje boljše rezultate pri maltah, ki so bolj tekoče ali ustrezno plastične. Zato bi ga bilo smotrno uporabljati za določanje reoloških lastnosti lahkogradljivih in SCC mešanic.

V diplomski nalogi sem preučeval kako V/C razmerje in količina superplastifikatorja vplivata na reološke lastnosti svežih cementnih malt. V prvem delu sem želel potrditi predpostavke iz literature, ki pravijo, da povečevanje V/C razmerja povzroči, da se tako strižna napetost na meji tečenja kakor tudi koeficient viskoznosti zmanjšujeta proti izhodišču. V raziskavah pa sem tezo preverjal v nasprotni smeri, saj smo V/C razmerje pri skupinah mešanic mr1, mp1 in ma1 zmanjševali, posledično pa naj bi se strižna napetost na meji tečenja in koeficient viskoznosti povečevala. Na podlagi dobljenih rezultatov in grafikonov, razen pri skupini mešanic ma1, smo bili sprva v rahli dilemi glede veljavnosti ugotovitev v literaturi, saj je imel graf konkavno obliko. Šele podrobnejši pregled rezultatov nam je razkril, da od pričakovanih rezultatov odstopa samo malta mr115, kateri smo V/C razmerje zmanjšali za 15 %. Iz tega lahko sklepamo, da je bila omenjena malta najbrž pregosta oz. presuha za pridobitev uporabnih rezultatov z reometrom ConTec Viscometer 5.

V drugem delu sem želel potrditi drugo ugotovitev v literaturi, ki pravi, da se pri zmanjševanju količine superplastifikatorja koeficient viskoznosti bistveno ne spremeni, medtem ko naj bi se strižna napetost na meji tečenja zviševala. Iz grafikonov smo lahko razbrali, da se koeficient viskoznosti, ob predpostavljene 5 % napaki meritve, ni bistveno spreminjal. Pri strižni napetosti na meji tečenja pa smo opazili, da se je pričela zviševati šele pri mešanicah, ki so imele delež superplastifikatorja manjši od 0,25 % (md15), pred tem pa so bile vrednosti dokaj enakovredne. Iz tega lahko sklepamo, da je pri mešanicah, ki so imele delež superplastifikatorja večji kot 0,25 % verjetno prišlo do zasičenja superplastifikatorja.

Povzamemo lahko, da so dobljeni rezultati praviloma potrdili ugotovitve iz literature, če izvzamemo malto mr115. Naše ugotovitve o vplivu V/C razmerja in količine superplastifikatorja na reologijo malte pa lahko strnemo v sledeči izjavi:

- Spreminjanje V/C razmerja je na reološke lastnosti sveže malte vplivalo pričakovano. Ob zviševanju V/C razmerja sta se tako strižna napetost na meji tečenja kakor tudi koeficient viskoznosti približevala izhodišču.
- Spreminjanje količine superplastifikatorja ja na reološke lastnosti sveže malte prav tako vplivalo pričakovano. Ob zmanjševanju količine superplastifikatorja se koeficient viskoznosti ni bistveno spremenil, medtem ko se je strižna napetost na meji tečenja zviševala.

Raziskave na svežih cementnih kompozitih bodo tudi v prihodnosti vse bolj pridobivale na veljavi, saj v praksi potrebe po novih in bolj učinkovitih dodatkih vedno bolj naraščajo. Vse bolj težimo k cementnim kompozitom, ki omogočajo boljšo in lažjo vgradnjo, dosegajo višje trdnosti in so bolj obstojni, ko se strdijo. Poleg tega naj bi v prihodnje vanje vključevali večje količine materialov, ki predstavljajo odpadek ali vzporedni proizvod v drugih industrijah.

Tempo dela nam narekuje, da so raziskave opravljene čim hitreje, da so stroški čim nižji in rezultati raziskav verodostojni. Zaradi tega se bodo tudi v prihodnje raziskave na področju svežih betonov vse bolj osredotočale na preiskave betonom ekvivalentnih malt.

VIRI

- [1] Žarnić, R. 2005. Lastnosti. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Katedra za preskušanje materialov in konstrukcij: 350 str.
- [2] 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.
- [3] Ukrainczyk, 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.
- [4] SIST EN 1008:2003. Voda za pripravo betona – Zahteve za vzorčenje, preskušanje in ugotavljanje primernosti vode za pripravo betona, vključno vode, pridobljene iz procesov v industriji betona.
- [5] Lafarge. 2013.
<http://www.lafarge.si/> (Pridobljeno 22. 2. 2013.)
- [6] SIST EN 197-1:2002. Cement – 1. del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente.
- [7] Ipavec, A., Vuk, T. 2010. Vpliv veziva na fazno sestavo strjenega betona. V: Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F. (ur.). Beton 21. stoletja : 6. redna letna Konferenca ZBS, Lipica, 25. – 26. marec, 2010. Ljubljana, Svet strokovnjakov Združenja za beton Slovenije: str. 68-77.
- [8] 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.
- [9] Černilogar, L. 2010. Dodatki za beton: plastifikatorji, superplastifikatorji, hiperplastifikatorji. Gradbenik. 12/2010 – 01/2011: str. 100 – 103.
- [10] Nevil, A.M. 1976. Svojstva betona, Beograd, Građevinska knjiga: 530 str.
- [11] Kavčič, F., Hočevar, A. 2010. Reološke preiskave superplastifikatorjev: eksperimenti na malti in betonu. Srečanje TKK Srpenica, oktober 2010.
- [12] Koehler, E.P., Fowler, D.W. 2003. Summary of concrete workability methods, Research report ICAR-105-1, Austin, TX, Aggregates Foundation for Technology, Research and Education: 92 str.
- [13] Wallewik, O.H. 2009. Introduction to rheology of fresh concrete, ICI rheocenter course. Reykjavik, Innovation center Iceland: 219 str.

- [14] Hočevar, A., Bokan-Bosiljkov, V., Kavčič, F. 2010. Preskušanje svežih betonov – uvod v reologijo. V: Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F. (ur.). Konferenčni zbornik : 32. zborovanje gradbenih konstruktorjev Slovenije, Bled, 7. - 8. oktober, 2010. Ljubljana, Slovensko društvo gradbenih konstruktorjev: str. 207-216.
- [15] Hočevar, A., Bokan-Bosiljkov, V., Kavčič, F. 2010. Uporabna vrednost meritev reoloških lastnosti svežega betona. V: Lopatič, J. (ur.), Markelj, V. (ur.), Saje, F. (ur.). Beton 21. stoletja : 6. redna letna Konferenca ZBS, Lipica, 25. – 26. marec, 2010. Ljubljana, Svet strokovnjakov Združenja za beton Slovenije: str. 95-104.
- [16] Slika sestavnih delov reometra ConTec Viscometer 5.
<http://www.contec.is/page14.htm> (Pridobljeno 20. 2. 2013.)
- [17] Slika reometra BTRHEOM.
<http://www.lcpc.fr/english/products/catalogue-of-mlpc-r-equipment/fiche-268/article/btrheom-1123> (Pridobljeno 20. 2. 2013.)
- [18] Slika reometra ICAR Rheometer.
<http://img.docstoccdn.com/thumb/orig/76674216.png> (Pridobljeno 20. 2. 2013.)
- [19] Schwartzentruber, A., Catherine, C. 1999. La méthode du mortier de béton équivalent (MBE) – Un nouvel outil d'aide à la formulation des bétons adjuvantés, Materials and Structures 33. 2000: str. 475 – 482.
- [20] Salonit Anhovo. 2013.
http://www.salonit.si/proizvodi_in_storitve/cementi/2011122210551525/
(Pridobljeno 22. 2. 2013.)
- [21] Tkk Srpenica. 2013.
<http://www.tkk.si/> (Pridobljeno 22. 2. 2013.)
- [22] Žarnić, R., Bosiljkov, V., Bokan-Bosiljkov, V., Dunjič, B. 2005/2006. Gradiva vaje. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 140 str.
- [23] EN 1015-3:1999. Methods of test for mortar for masonry – Part 3: Determination of consistence of fresh mortar (by flow table).
- [24] SIST EN 12350-5:2009. Preskušanje svežega betona – 5. del: Preskus z razlezom.
- [25] Slika pripomočkov za test za razlez malte.
http://www.abmbv.nl/img/large/controls_63_l0040_a.jpg
(Pridobljeno 22. 2. 2013.)
- [26] Slika pripomočkov za test za razlez betona.
<http://www.matest.com/imgprodotti/C192KIT.JPG> (Pridobljeno 22. 2. 2013.)

- [27] Shema pripomočka za test za razlez betona.
<http://lecture.civilengineeringx.com/concrete-workability/flow-table-test/>
(Pridobljeno 22. 2. 2013.)
- [28] Slika reometra ConTec Viscometer 5.
<http://www.contec.is/page11.htm> (Pridobljeno 22. 2. 2013.)
- [29] Hočevar, A., Kavčič, F., Bokan-Bosiljkov, V. 2013. Reološki parametri svežih betona – usporedba reometra.
http://www.casopis-gradjevinar.hr/assets/Uploads/JCE_65_2013_2_1_rad-765.pdf (Pridobljeno 20. 3. 2013.)