

Univerza
v Ljubljani
Fakulteta
*za gradbeništvo
in geodezijo*

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



Univerzitetni program Gradbeništvo,
Konstrukcijska smer

Kandidat:

Matjaž Jelušič

Tlačna trdnost vlaknastih betonov

Diplomska naloga št.: 3093

Mentor:

izr. prof. dr. Franc Saje

Somentor:

doc. dr. Drago Saje

Ljubljana, 24. 12. 2009

IZJAVA O AVTORSTVU

Podpisani **MATJAŽ JELUŠIČ** izjavljam, da sem avtor diplomske naloge z naslovom:
»**TLAČNA TRDNOST VLAKNASTIH BETONOV**«.

Izjavljam, da se odpovedujem vsem materialnim pravicam iz dela za potrebe elektronske separatoteke FGG.

Izjavljam, da prenašam vse materialne avtorske pravice v zvezi z diplomsko nalogo na UL, Fakulteto za gradbeništvo in geodezijo.

Ljubljana, 4. december 2009

(podpis)

BIBLIOGRAFSKO-DOKUMENTACIJSKA STRAN IN IZVLEČEK

UDK:	691.32(043.2)
Avtor:	Matjaž Jelušič
Mentor:	izr. prof. dr. France Saje
Somentor:	asis. dr. Drago Saje
Naslov:	Tlačna trdnost vlaknastih betonov
Obseg in oprema:	73 str., 18 pregl., 37 sl., 1 en.
Ključne besede:	tlačna trdnost, mikroarmirani betoni, jeklena vlakna, polipropilenska vlakna, agregat, cement, hidratacija, temperatura, vlažnost preskušanca

Izvleček

V diplomskem delu obravnavamo analizo časovnega razvoja tlačne trdnosti vlaknastih betonov običajne in visoke trdnosti. Betonske mešanice, ki smo jih povzeli iz doktorske disertacije asist. dr. D. Sajeta, so nam služile kot primerljive mešanice vlaknastobetonskim mešanicam z različnimi vsebnostmi vlaken. Uporabili smo dve vrsti jeklenih vlaken enakih lastnosti, z različnima dolžinama (16, 30 mm), in polipropilenska vlakna. Delež vlaken v betonu se je gibal med 0.5 in 2.0% njegove prostornine. Poleg vpliva vlaken na časovni razvoj tlačne trdnosti smo pri vlaknastih betonih običajne trdnosti primerjali tudi vpliv agregata. Uporabili smo agregata iz kamnoloma v Kresnicah in iz kamnoloma v Lažah. Pri starostih betona 1 dan, 3, 7, 28 in 90 dni smo merili tlačno trdnost osemnajstih različnih betonov. Na razvoj tlačne trdnosti betonov imajo vpliv tudi zunanji dejavniki, kot so klimatski pogoji (temperatura okolice, relativna vlažnost ...) in vlažnost vzorca. Da bi zajeli vpliv temperature, smo tlačno trdnost primerljivih betonskih mešanic običajne in visoke trdnosti merili pri različnih zunanjih temperaturah. Vpliv vlažnosti preskušancev na velikost osemindvajsetdnevne tlačne trdnosti smo analizirali na preskušancih, ki smo jih na dan preskusa vzeli iz vode, jih pustili sušiti različno dolgo (0.25 ure, 2 uri, 24 ur) in jih preskusili. V okviru eksperimentalnih raziskav smo ugotovili, da imajo uporabljena vlakna, tako po vrsti kot po količini, majhen vpliv na časovni razvoj tlačne trdnosti betona.

BIBLIOGRAPHIC-DOCUMENTALISTIC INFORMATION

UDC: 691.32(043.2)
Author: Associate Professor Franc Saje, Ph.D.
Supervisor: Teaching Assistant Drago Saje, Ph.D.
Title: Compressive Strength of Fibre Reinforced Concrete
Notes: 73 p., 18 tab., 37 fig., 1 eq.
Key words: compressive strength, fibre reinforced concrete, steel fibres, polypropylene fibres, aggregate, cement, hydration, temperature, humidity of the specimen

Abstract

The thesis features an analysis of the time development of compressive strength of fibre reinforced normal and high strength concrete. Concrete mixtures, taken from the doctoral dissertation of assistant Dr Drago Saje, were used as comparable mixtures to fibre reinforced concrete mixtures with different volume shares of fibres. Two types of steel fibres were used, both featuring the same characteristics but having different lengths (16 and 30 mm), as well as polypropylene fibres. The percentage of fibres in the concrete ranged from 0.5 to 2.0% of its volume. In addition to examining the influence of fibre on the development of compressive strength, fibre reinforced concrete of normal strength was also studied in terms of the influence of aggregate. Aggregates from quarries in Kresnice and Laže were used. The time development of compressive strength was measured in 18 different concrete mixtures when the concrete was one day, three, seven, twenty-eight and ninety days old. External factors, such as climate conditions (temperature of the surroundings, relative humidity...) and the humidity of the specimen also influence on the compressive strength of concrete. To take into account the influence of temperature, the compressive strength of concrete mixtures of normal and high strength was measured at different outside temperatures. The influence of the specimen humidity on the magnitude of twenty-eight day compressive strength was analysed on specimens taken out of water on the day of the examination, left to dry for differently long periods (0.25 hours, 2 hours, 24 hours), and then examined. Within the scope of our experimental research it was discovered that the fibres used in the experiment have little influence, considering both type and by quantity, on the time development of compressive strength of concrete.

ZAHVALA

Za pomoč pri nastajanju diplomske naloge se iskreno zahvaljujem mentorju izr. prof. dr. F. Sajetu, somentorju asist. dr. D. Sajetu in prijatelju B. Bandlju univ. dipl. inž. grad.. Za nasvete in potrpežljivost pri delu v laboratoriju na FGG se zahvaljujem doc. dr. V. Bokan-Bosiljkovi in laborantu F. Čeponu dipl. inž. grad..

Zahvaljujem se tudi svoji družini, predvsem staršema, ki sta mi skozi vsa leta študija stala ob strani in me podpirala.

Zahvaljujem se štipenditorju, podjetju Primorje d.d. za finančno podporo v času študija.

KAZALO VSEBINE

1	UVOD	1
2	SPLOŠNO O BETONU	3
2.1	Uvod v beton	3
2.2	Mineralni agregat	3
2.3	Cement.....	7
2.3.1	Splošno o cementu	7
2.3.2	Portland cement.....	9
2.3.3	Aluminatni cement	10
2.3.4	Označbe običajnih cementov	10
2.4	Voda	13
2.5	Dodatki betonu.....	14
2.5.1	Kemijski dodatki	14
2.5.2	Mineralni dodatki.....	16
3	VLAKNASTI BETON	19
3.1	Splošno.....	19
3.2	Vrste vlaken	21
3.3	Interakcija med vlakni in kompozitnim materialom	21
3.4	Lastnosti otrdelega mikroarmiranega betona	24
3.4.1	Žilavost	24
3.4.2	Udarna trdnost.....	25
3.4.3	Trdnost	25
3.4.4	Odpornost na utrujanje	25

3.4.5	Odpornost na obrus	25
3.4.6	Zmrzljinska odpornost	25
3.4.7	Korozijska odpornost	25
4	TLAČNA TRDNOST	27
4.1	Splošno	27
4.2	Struktura betona	27
4.2.1	Formiranje strukture betona	27
4.2.2	Makrostruktura betona	31
4.2.3	Mikrostruktura betona	32
4.3	Trdnost betona	32
4.4	Mehanizem porušitve betona	34
4.5	Merjenje tlačne trdnosti	36
5	EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE	37
5.1	Uporabljeni materiali	37
5.1.1	Agregat	37
5.1.2	Cement	39
5.1.3	Voda	40
5.1.4	Kemijski dodatki	41
5.1.5	Vlakna	42
5.2	Sestava betonskih mešanic in priprava preskušancev	43
5.3	Časovni razvoj tlačne trdnosti betona	52
5.4	Rezultati in analiza razvoja tlačne trdnosti vlaknastih betonov	53
5.4.1	Vpliv vrste betona na časovni razvoj tlačne trdnosti betona	55
5.4.2	Vpliv vlaken na časovni razvoj tlačne trdnosti betonov	56

5.4.2.1	Vpliv vrste vlaken na časovni razvoj tlačne trdnosti betona.....	57
5.4.2.2	Vpliv količine vlaken na časovni razvoj tlačne trdnosti betona.....	59
5.4.3	Vpliv vrste agregata na časovni razvoj tlačne trdnosti betona	61
5.4.4	Vpliv različnih zunanjih temperatur pri pripravi betonskih mešanic na časovni razvoj tlačne trdnosti betona	66
5.4.5	Vpliv vlažnosti preskušanca na merjenje tlačne trdnosti betona	69
6	ZAKLJUČKI	71
VIRI	75

KAZALO PREGLEDNIC

Preglednica 2.1:	Karakteristične vrednosti cementov po SIST EN 197-1:2002	13
Preglednica 5.1:	Fizikalne in kemijske lastnosti uporabljene mivke iz Moravč	38
Preglednica 5.2:	Fizikalne in kemijske lastnosti apnenčevega agregata iz Kresnic	38
Preglednica 5.3:	Fizikalne in kemijske lastnosti apnenčevega agregata iz Laž	39
Preglednica 5.4:	Delež mineralov v cementnem klinkerju uporabljenega cementa	40
Preglednica 5.5:	Sestavine, fizikalno-kemijske in mehanske lastnosti uporabljenega cementa	40
Preglednica 5.6:	Osnovne lastnosti Antikorodina	41
Preglednica 5.7:	Sestava, fizikalno-mehanske lastnosti mikrosilike (TTK Serpenica)	41
Preglednica 5.8:	Lastnosti uporabljenih jeklenih vlaken IRMA	42
Preglednica 5.9:	Lastnosti uporabljenih polipropilenskih vlaken (Grace Krenit)	43
Preglednica 5.10:	Opis priprave vzorcev, poteka meritev in zbiranja rezultatov	44
Preglednica 5.11:	Sestava preiskovanih betonskih mešanic betona običajne trdnosti z vsebnostjo agregata iz separacije Kresnice	47
Preglednica 5.12:	Sestava preiskovanih betonskih mešanic betona visoke trdnosti z vsebnostjo agregata iz separacije Kresnice	49
Preglednica 5.13:	Sestava preiskovanih betonskih mešanic betona običajne trdnosti z vsebnostjo agregata iz separacije Laže	51
Preglednica 5.14:	Sestava ponovljenih kontrolnih osnovnih betonskih mešanic betona običajne in visoke trdnosti	52
Preglednica 5.15:	Povprečne tlačne trdnosti betonov v MPa pri različnih starostih in pripadajoče standardne deviacije	54
Preglednica 5.16:	Izmerjene temperature pri preskusu tlačnih trdnosti betonov	65
Preglednica 5.17:	Izmerjene temperature pri preskusu tlačne trdnosti betona NC, HSC, NC-P in HSC-P	67

KAZALO SLIK

Slika 2.1:	Deleži sestavin betona (Žarnić, 2003)	3
Slika 2.2:	Zaklinjenost zrniv (Muravljov, 2000).....	5
Slika 2.3:	Shematski prikaz sejanja agregata (Žarnić, 2003)	6
Slika 2.4:	Sejalne krivulje – na vodoravni osi so podane odprtine sit, na navpični pa delež materiala, ki se je presejal skozi sito (Žarnić, 2003)	7
Slika 2.5:	Časovni razvoj trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerja (Žarnić, 2003).....	8
Slika 2.6:	Sistem označevanja cementov po standardu SIST EN 197-1:2001.....	11
Slika 3.1:	Vpliv velikosti agregata na razpored vlaken (Muravljov, 2003).....	19
Slika 3.2:	Oblike vlaken.....	20
Slika 3.3:	Delovni diagrami betonov, mikroarmiranih z različnimi količinami vlaken različnih tipov (Zajc, 1994)	23
Slika 3.4:	Delovni diagrami za: zelo trdno vlakno in za krhko matrico (a) ter za kompozite z zelo nizko (b), srednjo (c) in visoko vsebnostjo vlaken (d) (Zajc, 1994)	24
Slika 4.1:	Vpliv vodocementnega razmerja na sestavo cementnega kamna (Žarnić, 2003)	28
Slika 4.2:	Shematski prikaz sestave cementnega kamna za tri karakteristične vrednosti vodocementnega razmerja (Muravljov, 2000).....	28
Slika 4.3:	Faze formiranja strukture betona (Muravljov, 2003).....	29
Slika 4.4:	Razvoj hidratacijske toplote v prvih urah vezanja cementne paste (Žarnić, 2003)	30
Slika 4.5:	Vpliv vlažnosti okolja na razvoj tlačne trdnosti (Žarnić, 2003)	30
Slika 4.6:	Oblike makrostrukture betona (Muravljov, 2007).....	31
Slika 4.7:	Trdnost betona v odvisnosti od količine vgrajene vode (Muravljov, 2007).....	32
Slika 4.8:	Sovisnost med tlačno trdnostjo betona in vodocementnim razmerjem (Muravljov, 2007).....	33
Slika 4.9:	Obnašanje tlačno obremenjenega betonskega elementa (Muravljov,2007)	34
Slika 4.10:	Pojav nateznih napetosti v osrednjem delu tlačnoobremenjenega betonskega preskušanca (Muravljov, 2007)	34
Slika 4.11:	Porušitev tlačnoobremenjene betonske prizme (Muravljov, 2007).....	35

Slika 4.12:	Osnovni tipi porušitve betona (Muravljov, 2007).....	35
Slika 5.1:	Prikaz deležev ostanka mivke MP-GB na sitih.....	38
Slika 5.2:	Vrste uporabljenih vlaken	42
Slika 5.3:	Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov NC in HSC.....	56
Slika 5.4:	Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov NC-JVK-0.5%, NC-JVD-0.5% in NC-PPV-0.5%	57
Slika 5.5:	Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov HSC-JVK-0.5%, HSC-JVD-0.5% in HSC-PPV-0.5%	58
Slika 5.6:	Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov NC, NC-JVK-0.5%, NC-JVK-1.0% in NC-JVK-2.0%	60
Slika 5.7:	Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov HSC, HSC-JVK-0.5%, HSC-JVK-1.0% in HSC-JVK-2.0%	61
Slika 5.8:	Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov NC in NCL	62
Slika 5.9:	Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov NC-JVK-0.5% in NCL-JVK-0.5%	63
Slika 5.10:	Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov NC-JVK-1.0% in NCL-JVK-1.0%	63
Slika 5.11:	Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov NC-JVK-2.0% in NCL-JVK-2.0%	64
Slika 5.12:	Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov NC in NC-P	67
Slika 5.13:	Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov HSC in HSC-P.....	68
Slika 5.14:	Vpliv vlažnosti betonskega preskušanca na merjenje tlačne trdnosti betona.....	70
Slika 5.15:	Pojav obroča v preskušancu	70

1 UVOD

V svetu je beton, zaradi svojih številnih dobrih lastnosti, eden najpogosteje uporabljenih gradbenih materialov. Izstopata predvsem dve lastnosti: velika tlačna trdnost in razmeroma nizka cena. Ostale lastnosti betona so v primerjavi s tlačno trdnostjo znatno slabše in pogosto njegovo uporabnost celo omejujejo, vendar pa jih lahko s primernimi ukrepi izboljšamo. Danes znamo s sestavo ustrezne betonske mešanice in dodajanjem raznih dodatkov izboljšati določene lastnosti betona in ga tako uporabiti za določen namen.

Ideja, da se v svežo betonsko mešanico primešajo vlakna anorganskega ali organskega izvora, se je porodila v želji, da bi betonu izboljšali njegove lastnosti, kot so upogibna trdnost, udarna trdota, žilavost in odpornost na utrujanje. Leta 1874 so v Kaliforniji prijaviли prvi patent betona, ki so se mu z dodanim granuliranim odpadnim železom izboljšale lastnosti.

Sodobni razvoj za mikroarmiranje primernih vlaken in s tem tudi mikroarmiranih betonov se je začel v šestdesetih letih prejšnjega stoletja. Danes za mikroarmiranje uporabljamo vlakna, ki so obstojna v alkalni cementni matrici in bistveno izboljšajo lastnosti nastalega kompozitnega materiala ter imajo primerno ceno.

Čeprav dodajanje vlaken beton podraži in čeprav vmešanje vlaken v svežo betonsko mešanico zahteva poseben pristop, pa imajo konstrukcije in konstrukcijski elementi, izdelani iz mikroarmiranih betonov, številne prednosti pred primerljivimi konstrukcijami in konstrukcijskimi elementi, izdelanimi iz betona brez dodane mikroarmature. Mikroarmirani betoni so se uveljavili predvsem pri podzemskih gradnjah, sanacijah, proizvodnji betonskih izdelkov, izgradnji objektov ali delov objektov, ki so v času uporabe izpostavljeni velikim upogibnim ali bočnim pritiskom, utrujanju ali udarcem, in pri izgradnji objektov ali delov objektov, katerih površina je močno izpostavljena obrabi.

V času eksperimentalnih raziskav smo razmišljali predvsem o vplivu vlaken na časovni razvoj tlačne trdnosti betonov, dokler se nam ni ponudila priložnost, glede na pridobljene rezultate,

da analizo časovnega razvoja tlačne trdnosti betonov razširimo še na vpliv agregata, pogoje okolice in vlažnost preskušancev. Tako smo dobili dodatno znanje o vplivu teh dveh parametrov na časovni razvoj tlačne trdnosti betonov.

V drugem poglavju diplomske naloge smo predstavili osnovne sestavine betona: mineralni agregat, cement, vodo, dodatke in njihove lastnosti.

V tretjem poglavju smo predstavili vlaknaste betone in njihove lastnosti. Našteli smo vrste vlaken, ki se uporabljajo v vlaknastih betonih, njihove lastnosti in vpliv na medsebojno delovanje s kompozitnim materialom.

Tlačno trdnost in parametre, ki vplivajo na njen razvoj, smo obširneje predstavili v četrtem poglavju.

V petem poglavju diplomske naloge smo predstavili uporabljene materiale, sestavo mešanic, pripravo preskušancev in način izvajanja meritev. Za opisom priprave in izvedbe meritev navajamo pridobljene rezultate meritev in analiziramo vpliv posameznih parametrov na časovni razvoj tlačne trdnosti betona.

Pravilna priprava, vgradnja in negovanje betona na gradbišču imajo pomemben vpliv na njegove lastnosti. Ker se pogoji ob vgradnji betona na gradbišču pogosto precej razlikujejo od laboratorijskih, so tudi lastnosti betonov z enako sestavo mešanice različne.

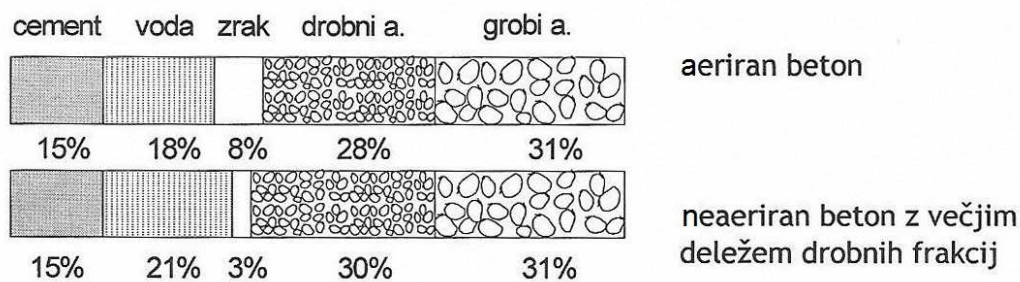
2 SPLOŠNO O BETONU

2.1 Uvod v beton

Beton je keramični kompozitni material. Sestavljen je iz:

- mineralnega agregata,
- cementa,
- vode,
- dodatkov.

Osnovni materiali v betonu so vezivno sredstvo – cement, mineralni agregat in voda. Po zamešanju se v betonu začnejo kemični procesi med sestavinami. Reakcija med cementom in vodo se imenuje hidratacija. Med njo se cementna pasta s sproščanjem toplote preoblikuje v cementni kamen, ki je osnovni gradnik otrdelega betona. S pomočjo dodatkov pa dobimo zelo prilagodljiv in v gradbeništvu najpogosteje uporabljen material.



Slika 2.1: Deleži sestavin betona (Žarnić, 2003)

2.2 Mineralni agregat

Mineralni agregat zajema med 70% in 80% skupne mase betona in v splošnem predstavlja njegovo glavno in najtršo sestavino. Betonu daje skelet in ima bistven vpliv na lastnosti, tako svežega kot strjenega betona (Muravljov, 2007). Agregat je v splošnem sestavljen iz grobih in finih zrn.

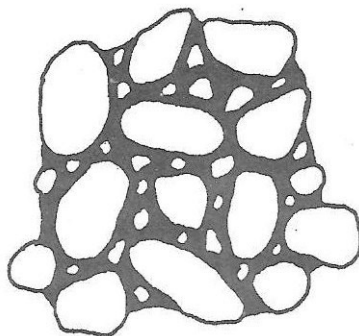
Mineralni agregat razvrščamo na različne načine:

- glede na način nastanka ločimo: magmatski, metamorfni, sedimentni,
- glede na način priprave in obliko ločimo: prodnat, drobljen.

Agregat mora biti čist in mora izpolnjevati celo vrsto zahtev, da je primeren za uporabo v betonu. Zahteve so naslednje:

- mineraloško-petrografska sestava in ugotavljanje prisotnosti snovi, ki bi lahko kakorkoli vplivale na hidratacijo in strjevanje betona ter na mehanske lastnosti in obstojnost strjenega betona, morajo biti v določenih mejah, v primeru armiranega betona pa je pomembno tudi, da ne povzročajo korozije armature,
- agregat ne sme vsebovati organskih snovi (masti), ker zavirajo hidratacijo,
- posamezna zrna agregata ne smejo biti obvita z glino, ker le ta onemogoča dobro povezavo med cementno pasto in zrnji agregata,
- agregat ne sme vsebovati grudic gline,
- zrna morajo imeti zadostno odpornost proti drobljenju,
- zrna ne smejo biti preveč vpojna,
- agregat mora vsebovati malo slabo oblikovanih – ploščatih in podolgovatih zrn,
- zrna agregata morajo imeti zadostno zmrzlinško odpornost,
- agregat ne sme vsebovati velike količine amorfnega silicijevega dioksida, ker le-ta povzroča alkalno-silikatno reakcijo v betonu, pri kateri prihaja do notranjih napetosti in posledično razpok v betonu, kar vodi v postopno razpadanje betona.

Za pripravo betona se uporabljajo prodnati in drobljeni agregati. Prodnati agregati zaradi svojih zaobljenih robov omogočajo lažje vgrajevanje betona. Poraba vode je manjša in posledično je manjše tudi vodocementno ali vodovezivno razmerje. Zaradi nehomogenosti pa lahko prodnati agregati vsebujejo veliko organskih snovi in zaradi slabše kontrole mineraloške sestave predstavljajo večjo nevarnost alkalno-silikatne reakcije v betonu. Danes se za betone večinoma uporablja drobljen agregat, ker je bolj homogen in se zrna agregata zaradi ostrih robov med seboj zaklinjajo (slika 2.2), kar pripomore k izboljšanju mehanski lastnosti betona.



Slika 2.2: Zaklinjenost zrn (Muravljov, 2000)

Lastnosti betonov so tako pogosto odvisne od vsebnosti vrste agregata in njihova vloga v betonu je (Žarnić, 2003):

- znižujejo ceno betona,
- ustrezno sestavljeni po frakcijah ustvarjajo koheziven beton,
- znižuje hidrationsko temperaturo betona,
- zmanjšujejo krčenje betona.

Poleg navedenega lahko agregati služijo za:

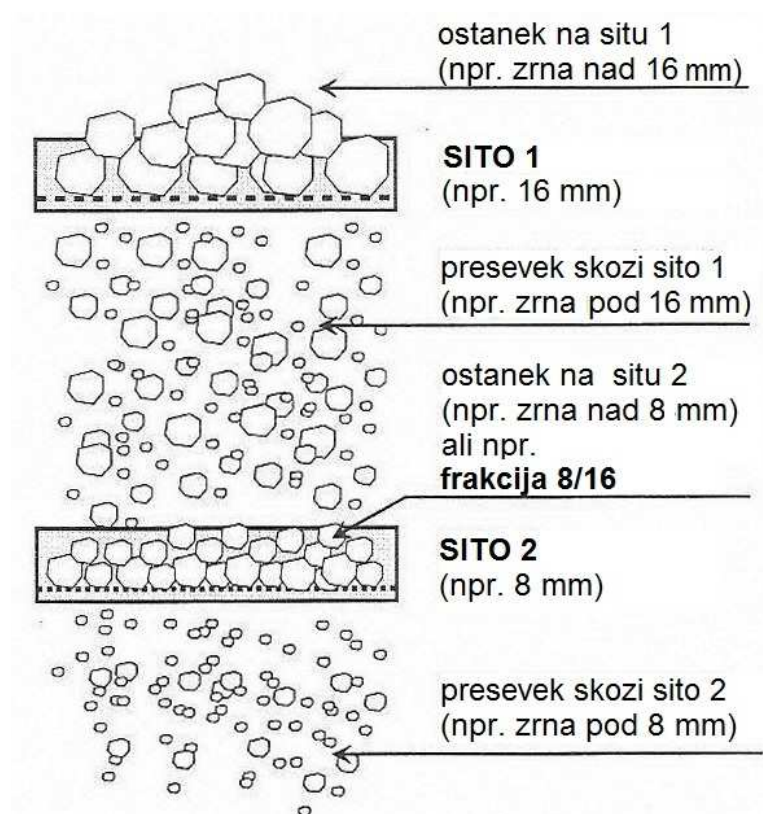
- uravnavanje površinske trdote,
- ustvarjanje barvitosti betonske površine,
- kontrole gostote,
- zvišanje požarne odpornosti betona.

Beton mora vsebovati določen delež grobih in finih frakcij (slika 2.2). Ustrezna granulometrijska sestava agregata omogoča izdelavo svežega betona ustreznih plastičnih lastnosti (vgradljivost, kohezija, odpornost na izločanje vode) in otrdelega betona ustreznih lastnosti (trdnost, trajnost in izgled površin). Ustrezno granuliran agregat dobro zapolnjuje celoten prostor in onemogoča segregacijo sveže betonske mešanice (Žarnić, 2003).

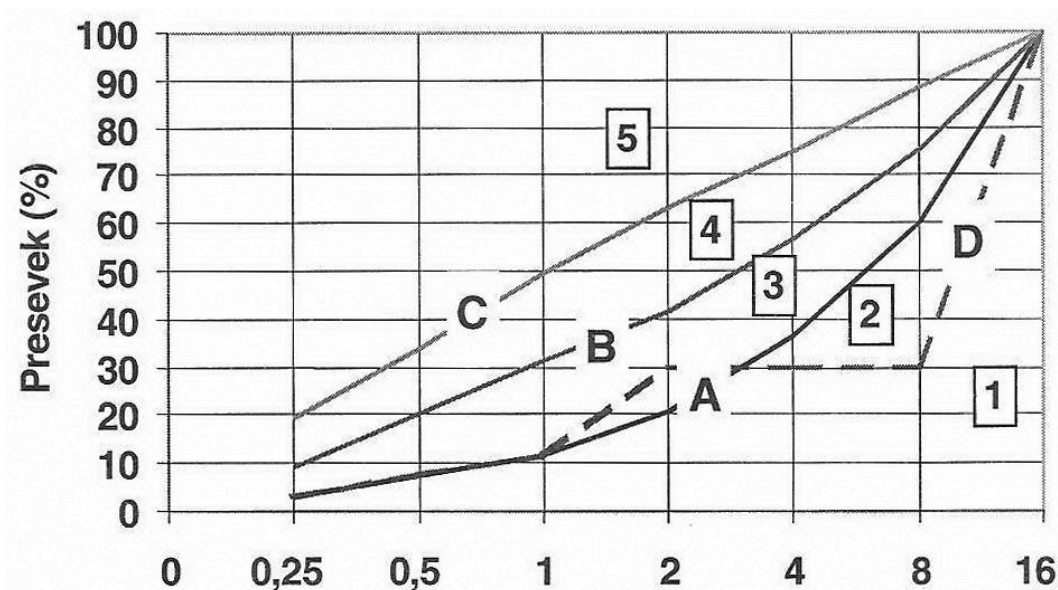
Zrnavost ali granulometrijsko sestavo agregata določamo s pomočjo mejnih krivulj in sejalne analize. Vzorec agregata presejemo skozi niz sit, ki so postavljena eno nad drugim, sito z največjimi odprtinami je na vrhu. Zanima nas, koliko materiala se je presejalo skozi

posamezno sito. Osnovni komplet sit vsebuje sita z odprtinami 1, 2, 4, 8, 16, 31.5 in 63 mm. Za posebne zahteve vmes dodajamo sita 5.6, 11.2, 22.4 in 45 mm. Polnilni material, s katerim dosežemo posebne lastnosti v betonu, pa zahteva še uporabo sit 0.063, 0.125, 0.25 in 0.5 mm. V procesu projektiranja sveže betonske mešanice je proces priprave ustrezne granulometrijske sestave agregata ena najbolj občutljivih in pomembnih faz.

Pri projektiranju betona govorimo o tem, koliko posamezne frakcije potrebujemo. Frakcija je količina materiala, ki je ostal med dvema sitoma. Označimo jo po sistemu d/D , kjer d pomeni velikost odprtine sita, na katerem se je material zaustavil, in D velikost odprtine sita nad sitom d (npr. frakcija 8/16). Razmerje D/d ne sme biti manjše od 1.4. Shema sejanja agregata je prikazana na sliki 2.3, na sliki 2.4 pa so prikazane sejalne krivulje.



Slika 2.3: Shematski prikaz sejanja agregata (Žarnić, 2003)



Slika 2.4: Sejalne krivulje – na vodoravni osi so podane odprtine sit, na navpični pa delež materiala, ki se je presejal skozi sito (Žarnić, 2003)

2.3 Cement

2.3.1 Splošno o cementu

Cement je silikatni material in osnovno hidravlično vezivo v betonu. Sestavljajo ga predvsem minerali apna, kremenca, aluminijevega in železovega oksida (Žarnić, 2003). Cement pridobivamo z mletjem cementnega klinkerja in mineralnih dodatkov, kot so sadra, žindra, naravni ali umetni pucolani, apnenci in elektrofiltrski pepel. Dodatki spreminjajo hitrost vezanja cementa, vplivajo na trdnost betona, povečujejo odpornost betona v agresivnih okoljih in uravnavajo količino sproščene hidratacijske toplote (Muravljov, 2000). Po mešanju z vodo se v procesu hidratizacije židka cementna pasta v določenem času pretvori v trdo in trdno keramično vezivo – cementni kamen (Žarnić, 2003).

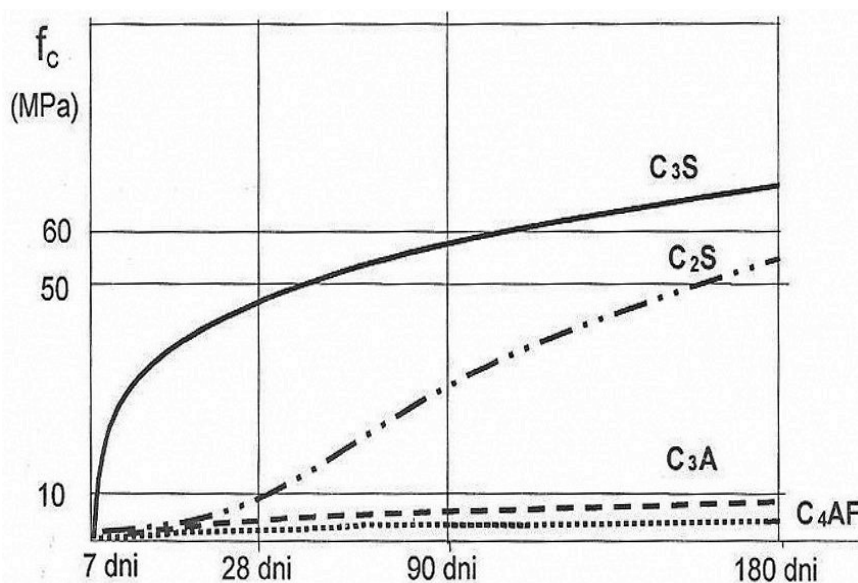
Cementni klinker je glavna sestavina cementa. Pridobivamo ga s sintranjem bazičnih (karbonatnih materialov – apnenec) in kislih (glinenih materialov) komponent. Zahteve glede sestave cementnega klinkerja so podane v standardu SIST EN 197-1. V cementnem klinkerju predstavljata vsaj dve tretjini mase minerala alit in belit. Masno razmerje v cementnem

klinkerju med CaO in SiO₂ mora biti večje od 2, prisotnost prostih MgO in CaO moramo omejiti, ker v večjih količinah negativno vplivata na lastnosti cementa. Cement vsebuje tudi alkalije, Na₂O in K₂O.

Cementni klinker je sestavljen iz štirih mineralov:

- alit – trikalcijev silikat (C₃S – 3CaO·SiO₂),
- belit – dikalcijev silikat (C₂S – 2CaO·SiO₂),
- trikalcijev aluminat (C₃A – 3CaO·Al₂O₃),
- tetrakalcijev aluminat ferit (C₄AF – 4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃).

Alit sestavlja več kot polovico cementnega klinkerja. Je visoko reaktiven in daje betonu visoke zgodnje trdnosti. Večji kot je odstotek tega minerala, večja je zgodnja trdnost. Ob vezavi sprošča veliko toplote. Belit reagira počasi in počasi pridobiva na trdnosti. Zanj je značilna nizka hidratacijska toplota. Trikalcijev aluminat v začetnih dneh hidratacije sprošča veliko toplote. Prispeva tudi k zgodnji trdnosti betona. Je zelo občutljiv na sulfatno korozijo, zato ga poskušamo omejiti pod 5% celotne mase cementa. Tetrakalcijev aluminat ferit je produkt vhodnih surovin, ki jih uporabljamo za zmanjšanje temperature pri sintranju. Povzroča počasno strjevanje in je odporen proti sulfatni koroziji. Cementu daje značilno sivo barvo.



Slika 2.5: Časovni razvoj trdnosti posameznih mineralov cementnega klinkerja (Žarnić, 2003)

Časovni potek naraščanja trdnosti posameznih mineralov cementa je prikazan na sliki 2.5. Trdnost najhitreje pridobiva alit C_3S , saj že po dveh do treh dneh doseže več kot polovico trdnosti, ki jo ima po 28-ih dneh. Belit C_2S na začetku veže počasneje, vendar dalj časa pridobiva na trdnosti. Najmanj pa k trdnosti prispevata trikalcijev aluminat C_3A in tetrakalcijev aluminat ferit C_4AF .

Cement lahko vsebuje tudi mineralne dodatke, kot so: cementni klinker, granulirana plavžna žindra, naravni pucolani, naravni kalcinirani pucolani, elektrofiltrski pepel, žgani skrilavec, apnenec, mikrosiliki, kalcijev sulfat, polnila.

Obstajata dve večji skupini cementov:

- silikatni,
- aluminatni.

Delimo ju na več vrst:

- portland cement,
 - metalurški cement,
 - pucolanski cement,
- aluminatni cement.

2.3.2 Portland cement

Portland cement je najbolj uporabljena vrsta cementa. Materiali, ki jih uporabljamo za proizvodnjo portland cementa, morajo vsebovati točno določeno količino kalcija, silicija, aluminijskega oksida in železa. Med pečenjem ti materiali medsebojno reagirajo, nastanejo združeni proizvodi, ki so v kemijskem ravnotežju.

Portland cement lahko mešamo z žindro ali s pucolanom. Cement, ki vsebuje večje količine omenjenih dodatkov, se imenuje:

- metalurški cement – vsebuje večjo količino žindre (od 31% do 85%),
- pucolanski cement – vsebuje večjo količino pucolana (nad 30%).

Metalurški in pucolanski cementi so bolj odporni na agresivno delovanje sulfatnih soli, ki se nahajajo v vodi ali v tleh, razvijejo manj hidratacijske toplote kot portland cement in imajo manjšo začetno trdnost, ki se s časom veča in kasneje lahko doseže enako vrednost kot pri ustreznem portland cementu (Žarnić, 2003).

Žlindra in pucolani vplivajo na lastnosti sveže betonske mešanice:

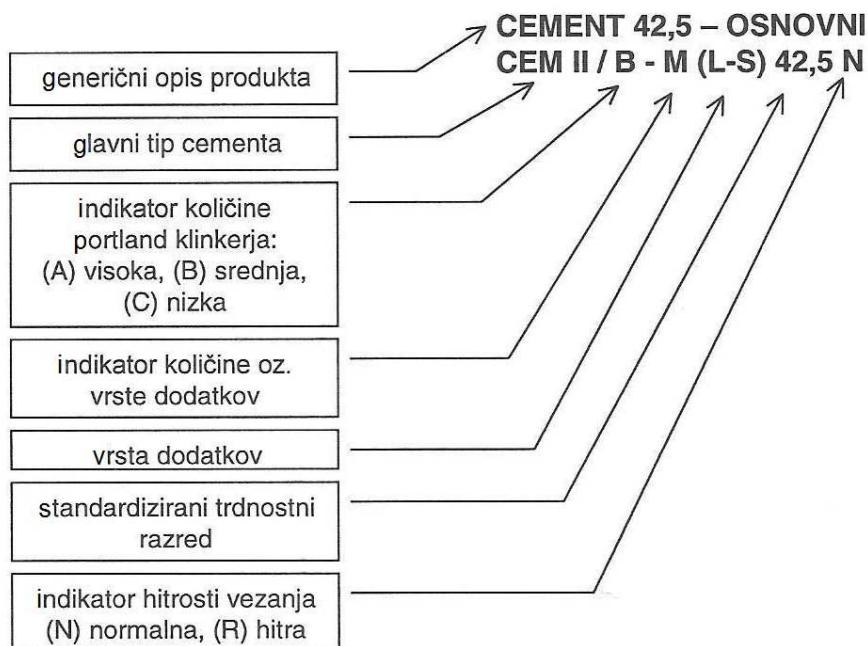
- zmanjšujejo potrebno količino vode za doseganje določene konsistence,
- zmanjšujejo izcejanje vode in segregacijo agregata,
- zmanjšujejo hidratacijsko toploto,
- podaljšajo začetek vezanja,
- izboljšajo odpornost na agresivne vplive.

2.3.3 Aluminatni cement

Pridobivamo ga s taljenjem mineralov, ki vsebujejo kalcijev (apnenec) in aluminijev (boksit) oksid. Material talimo v posebnih plamenih pečeh ali elektropečeh pri temperaturi med 1500°C in 1550°C. Aluminatni cementi razvijejo visoko hidratacijsko toploto in se hitro strjujejo. Uporabljamo jih za betoniranje pri nizkih temperaturah. Odporni so proti sulfatom in solem (Muravljov, 2007).

2.3.4 Označbe običajnih cementov

Način označevanja cementa je podan v standardu SIST EN 197-1, Cement – 1.del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente. V oznaki so vrsta cementa, razred zgodnje trdnosti, vrsta in količina dodatka ter trdnostni razred. Sistem označevanja je prikazan na sliki 2.6.



Slika 2.6: Sistem označevanja cementov po standardu SIST EN 197-1:2001

Vrste običajnih cementov po SIST EN 197-1:

- CEM I,
- CEM II,
- CEM III,
- CEM IV,
- CEM V.

S CEM I označujemo običajni portlandski cementi, z oznako CEM II pa portlandski cementi z različnimi dodatki:

- portlandski cement z dodatkom žlindre,
- portlandski cement z dodatkom mikrosilike,
- portlandski cement z dodatkom pucolana,
- portlandski cement z dodatkom elektrofiltrskega pepela,
- portlandski cement z dodatkom žganega skrilavca,
- portlandski cement z dodatkom apnenca,
- portlandski mešani cement.

CEM III so žlindrini cementi, CEM IV pucolanski in CEM V mešani cementi. V vsaki od naštetih vrst poznamo še podvrste, ki se razlikujejo po deležu klinkerja in opisanih dodatkov v svoji sestavi (SIST EN 197-1:2002).

Oznake in imena mineralnih dodatkov:

- cementni klinker (K),
- granulirana plavžna žindra (S),
- naravni pucolani (P),
- naravni kalcinirani pucolani (Q),
- elektrofiltrski pepel – silicijski, kalcijski (V, W),
- žgani skrilavec (T),
- apnenec (L, LL),
- mikrosilika (D),
- kalcijev sulfat,
- polnila.

Standard loči tri trdnostne razrede cementov:

- 32.5,
- 42.5,
- 52.5

in pri vsakem še cemente, ki vežejo:

- z normalno hitrostjo (N – normal),
- pospešeno (R – rapid).

Standard, v preglednici 2.1, podaja mehanske in fizikalne zahteve, navedene kot karakteristične vrednosti.

Preglednica 2.1: Karakteristične vrednosti cementov po SIST EN 197-1:2002

Trdnostni razred	Tlačna trdnost [MPa]				Čas začetka vezanja [min]	Prostorninska obstojnost (ekspanzija) [mm]
	Zgodnja trdnost		Standardna trdnost			
	2 dneva	7 dni	28 dni			
32.5 N	-	≥ 16.0	≥ 32.5	≥ 52.5	≥ 75	≥ 10
32.5 R	≥ 10.0	-				
42.5 N	≥ 10.0	-	≥ 42.5	≥ 62.5	≥ 60	
42.5 R	≥ 20.0	-				
52.5 N	≥ 20.0	-	≥ 52.5	-	≥ 45	
52.5 R	≥ 30.0	-				

2.4 Voda

Voda predstavlja osnovno komponento za pripravo betonske mešanice, ki omogoči proces vezanja in strjevanja cementa. Ko mešanici agregata in cementa dodamo vodo, se začne odvijati kemijski proces, imenovan hidratacija, pri katerem se sprošča hidratacijska toplota in material se strjuje. Za izvedbo betona je primerna pitna voda brez posebnega okusa in vonja. Če nimamo na razpolago pitne vode, moramo sestavo vode, ki jo bomo uporabili v betonu, analizirati in dokazati, da ne vpliva na kakovost betona.

Voda za pripravo betonske mešanice ne sme vsebovati snovi, ki bi:

- vplivale na čas začetka vezave cementa,
- vplivale na hidratacijo cementa,
- vplivale na kasnejše mehanske lastnosti,
- vplivale na obstojnost betona,
- povzročale korozijo armature v armiranobetonskih konstrukcijah.

Voda ne sme vsebovati glinastih delcev, delcev oglja in organskih delcev. Morska voda vsebuje veliko količino mineralov, zato se lahko uporablja le pogojno za nearmirane betone nižjih trdnosti.

Standard SIST EN 1008:2003 določa zahteve za primernost vode, ki jo bomo uporabili v betonu. Standard zajema tudi vode, pridobljene iz procesov v industriji betona. Voda, ki velja za pitno, je skladno s standardom primerna za pripravo betona.

Standard določa tudi kemične lastnosti vode. Lastnosti so podane v tabelah in podajajo najvišjo še dovoljeno vsebnost škodljive substance v vodi.

2.5 Dodatki betonu

Dodatki s svojim fizikalnim, kemičnim ali kombiniranim delovanjem vplivajo na lastnosti svežega ali strjenega betona.

Glavni namen dodatkov je:

- zmanjšanje cene betona,
- doseganje določenih lastnosti betona, lažje kot z drugimi načini,
- vzdrževanje kakovosti betona med prevozom, vgrajevanjem in nego.

Dodatke delimo v dve skupini:

- kemijski dodatki,
- mineralni dodatki.

2.5.1 Kemijski dodatki

Kemijske dodatke razdelimo glede na vpliv v betonu na (Kosmatka, 2002):

- plastifikatorje,
- superplastifikatorje,
- aerante,
- pospeševalce,
- zaviralce,
- antifrizo,
- preprečevalce korozije armature,

- preprečevalce alkali-silikatne reakcije,
- pigmente,
- dodatke za kompenziranje krčenja,
- dodatke za kontrolo hidratacije,
- mešane dodatke.

Plastifikatorji se dodajajo betonom srednje konsistence in srednjega vodocementnega razmerja. Izboljšajo plastičnost betona, s tem olajšajo vgradljivost betona in zmanjšajo porabo vode (manjše vodocementno razmerje). Uporabljajo se v ozkih konstrukcijah in v konstrukcijah z velikim deležem armature.

Superplastifikatorji omogočajo še nižje vodocementno razmerje, tudi preko 30%, pri čemer ne ogrožamo vgradljivosti in obdelovalnosti betona. Dobimo betone zelo visoke trdnosti.

Aeranti v beton uvedejo mikroskopsko majhne mehurčke zraka, ki povečajo odpornost proti ciklom zmrzovanja in tavanja ter povečujejo odpornost proti kemijski koroziji betona. Prav tako omogočajo lažje vgrajevanje betona in preprečujejo segregacijo agregata.

Pospeševalci pospešijo vezanje in povečajo zgodnje trdnosti betona. Pri uporabi moramo biti previdni, saj lahko prevelika količina povzroči povečano krčenje betona, korozijo armature, težje vgrajevanje in izgubo trdnosti s starostjo.

Zaviralci zavirajo vezanje in s tem omogočajo lažje vgrajevanje svežega betona ob visokih temperaturah, ki povzročajo hitro vezanje betona. Uporabo zaviralcev spremlja manjše zmanjšanje začetnih trdnosti.

Antifrizi omogočajo betoniranje v hladnem vremenu ($\leq 0^{\circ}\text{C}$) in delujejo tako, da znižajo temperaturo ledišča vode.

Preprečevalci korozije armature povečajo odpornost armature proti kloridom, medtem ko preprečevalci alkali-silikatne reakcije zmanjšajo nabrekanje zaradi te reakcije.

Pigmenti so barvila, ki obarvajo beton.

Dodatki za kompenziranje krčenja zmanjšajo krčenje betona zaradi sušenja in jih uporabljamo v objektih, kjer morajo biti razpoke zelo majhne.

Dodatki za kontrolo hidratacije uravnavajo potek hidratacije, ki jo lahko popolnoma zaustavimo s stabilizatorjem in jo zaženemo naprej z dodatkom aktivatorja. Omogoča nam, da lahko dostavljeni beton uporabimo šele naslednji dan.

Mešani dodatki povečujejo vodotesnost, izboljšajo povezave med starim in novim betonom, preprečujejo nabrekanja betona pred strjevanjem, preprečujejo poraščanje betona z lišaji, so sredstva proti spiranju cementa za uporabo pri betoniranju pod vodo ...

2.5.2 Mineralni dodatki

Poznamo nepucolanske in pucolansko-hidravlične dodatke, ki izboljšajo kohezijo in odpornost na segregacijo. Zmanjšajo tudi potrebo po cementu, kar zmanjša hidrationsko toploto in kasnejše krčenje.

Mineralne dodatke razvrščamo glede na reakcijsko sposobnost z vodo in jih delimo na (Kavčič, 2007):

- tip I,
- tip II.

Tip I so nepucolanski dodatki, kot je apnenčeva ali dolomitna kamena moka, pri tem pa mora biti presevek na situ 0.063 mm večji kot 70%. Tip II so pucolanski dodatki, med katere uvrščamo:

- elektrofiltrski pepel (EFP),
- mikrosiliko,
- granulirano plavžno žlindro.

Elektrofiltrski pepel (EFP) izboljšuje kohezivnost in zmanjšuje občutljivost na vsebnost vode v mešanici medtem, ko mikrosilika, izboljšuje kohezivnost in segregacijsko odpornost. Granulirana plavžna žindra pa zmanjšuje hidratacijsko toploto in je običajno že sestavni del cementov CEM II in CEM III.

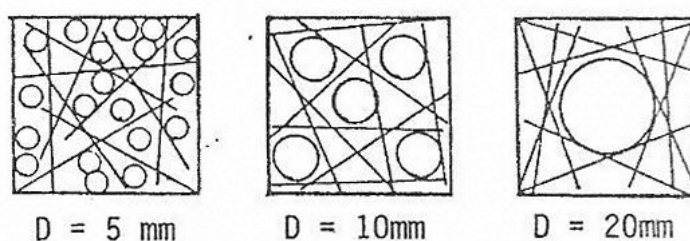
3 VLAKNASTI BETON

3.1 Splošno

Vlaknasti ali mikroarmirani beton je zmes cementa, agregata, vode, vlaken, kemijskih in mineralnih dodatkov.

Mikroarmirani betoni se lahko pripravljajo iz katerega koli cementa, vendar je potrebna količina cementa nekoliko večja kot pri nearmiranih betonih, saj se z vlakni v svežo betonsko mešanico vnese velika površina, ki mora biti ovita s cementno pasto.

Pri izbiri agregata ni posebnih omejitev, je pa maksimalno zrno praviloma manjše kot pri betonih brez vlaken. Za proizvodnjo mikroarmiranega betona se navadno uporablja maksimalno zrno 8 mm ali največ 16 mm, ker večja agregatna zrna povzročajo neenakomerno porazdelitev vlaken v betonu. Tvorijo se težko razdružljiva gnezda, ki predstavljajo oslabitev kompozita. S primerno granulometrijsko sestavo se zmanjša možnost tvorjenja gnezd. Na sliki 3.1 je shematsko prikazana razporeditev vlaken v betonu pri različnih velikostih zrn agregata.

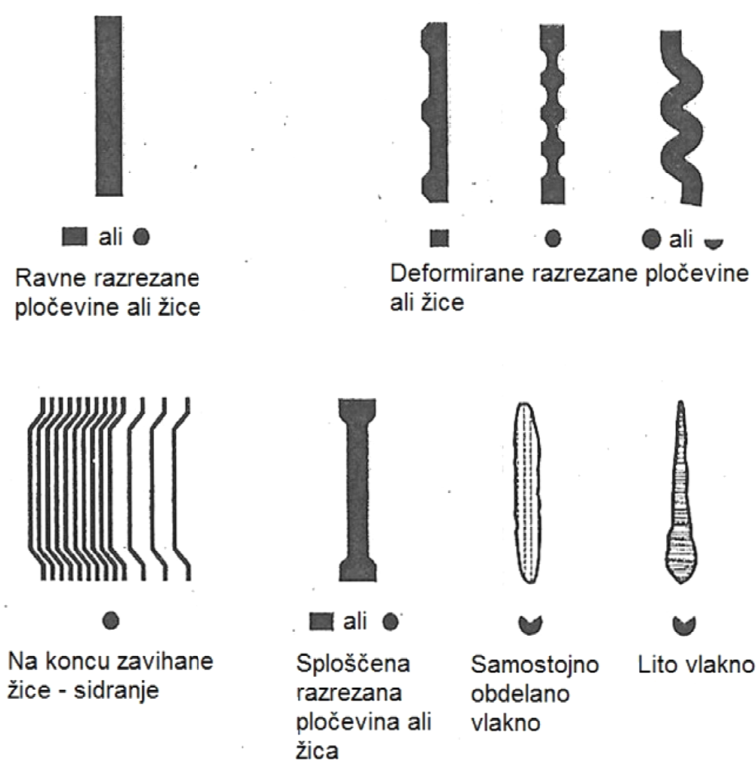


Slika 3.1: Vpliv velikosti agregata na razpored vlaken (Muravljov, 2003)

Izbira vlaken za mikroarmirani beton je odvisna predvsem od želenih lastnosti kompozita v strjenem stanju. Za normalno uporabo se v betonsko mešanico dodaja do 1% vlaken glede na prostornino betona. Ta količina vlaken omogoča enakomerno porazdelitev le-teh v betonu in mešanje sveže betonske mešanice poteka brez večjih težav. Do 5% vlaken se betonu dodaja za izdelavo posebnih izdelkov. Za pripravo in vgrajevanje je potrebna posebna tehnologija, ker

se pojavi problem gnezdenja vlaken. Mikroarmirani betoni z do 15% vlaken v betonu se uporabljajo za pripravo specialnih izdelkov. Pripraviti in vgraditi jih je možno le po principu prepaktiranja.

Zelo pomemben parameter pri izbiri vlaken je faktor oblike, saj vpliva na pripravo, vgrajevanje in na reološke lastnosti kot tudi na lastnosti strjenega mikroarmiranega betona. Faktor oblike je razmerje med dolžino in premerom vlaken. Manjši kot je faktor, tem lažje se jeklena vlakna vmešavajo in razporejajo v sveži betonski mešanici. Po drugi strani pa je vpliv vlaken na lastnosti strjenega betona tem boljši, čim večji je ta faktor. To v principu pomeni, da uporaba tanjših jeklenih vlaken daje boljše lastnosti kompozita. Najbolj pogoste oblike vlaken so prikazane na sliki 3.2.



Slika 3.2: Oblike vlaken

Kemijski in mineralni dodatki se uporabljajo pri pripravi mikroarmiranih betonov, da izboljšamo lastnosti matrice. To se odraža tudi v boljši sprijemnosti matrice in vlaken in s tem seveda tudi v boljših lastnosti samega kompozita.

3.2 Vrste vlaken

Za mikroarmiranje uporabljajo vlakna, ki so obstojna v alkalni cementni matrici, ki bistveno izboljšajo lastnosti nastalega kompozitnega materiala in imajo primerno ceno. Uporabljajo se naslednja vlakna:

- kovinska, ki so iz jekla ali nerjavečega jekla,
- sintetična, ki so iz polipropilena, akrila, aramida, ogljika, nylona, poliestra ali polietilena,
- mineralna, ki so predvsem iz alkalnoodpornega stekla,
- naravna, ki so predvsem iz celuloze.

Najpogosteje se uporabljajo jeklena vlakna, sledijo jim alkalnoodporna stekla, polipropilenska, ogljikova in celulozna vlakna.

3.3 Interakcija med vlakni in kompozitnim materialom

Lastnosti mikroarmiranega betona temeljijo na interakciji med vlakni in krhko betonsko matrico. Parametri, ki vplivajo na to interakcijo so (Zajc, 1994):

- stanje matrice, ki je lahko brez ali z razpokami,
- sestava matrice,
- oblika (geometrijska) vlaken,
- tip vlaken,
- lastnosti površine vlakna,
- togost vlaken v primerjavi s togostjo matrice,
- porazdelitev ali orientacija vlaken,
- prostorninski delež vlaken v kompozitu,
- velikost obremenitev,
- obstojnost vlaken v kompozitu in spreminjanje lastnosti vlaken s časom.

Teoretično je v stanju do prve obremenitve ali v izhodiščnem stanju matrica nerazpokana in se vse napetosti v kompozitnem materialu porazdelijo med vlakna in matrico. Zaradi razlike v togosti med vlakni in matrico se ob obremenitvi razvijejo strižne napetosti vzdolž površine. V realnem stanju pa je matrica kompozitnega materiala vedno razpokana in v tem primeru vlakna premoščajo razpoke in prenašajo obremenitve preko razpok.

Sestava matrice je za obnašanje kompozita zelo pomembna. Velik vpliv imata sprejemljivost med vlakni in matrico in količina vlaken, ki se nahaja v kompozitu. Sprejemnost je odvisna od sestave matrice, oblike in vrste vlaken ter od površine vlaken. Sprejemnost določa velikost sile, ki je potrebna za izvlečenje posameznega vlakna.

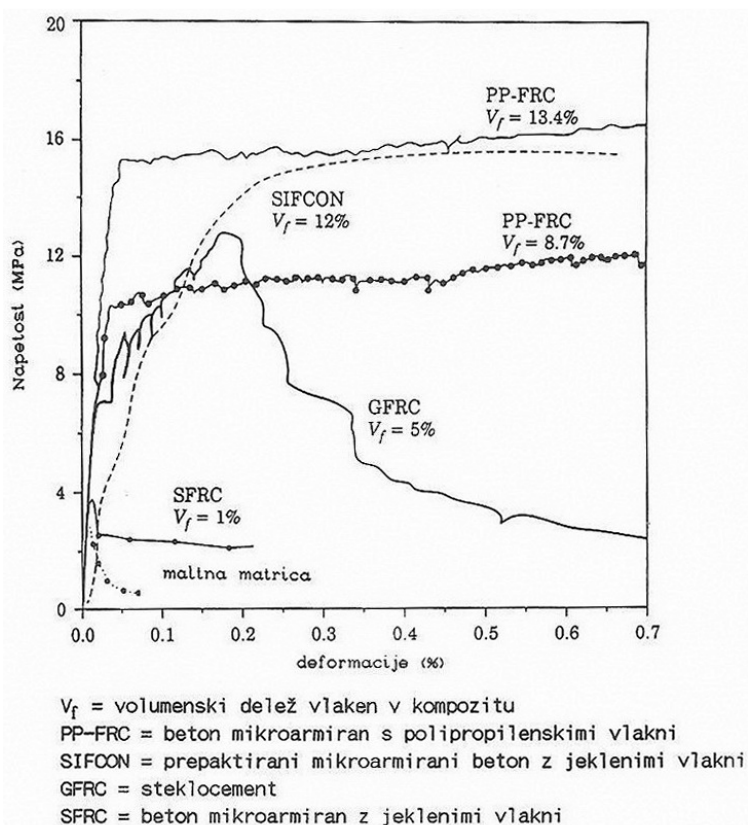
Zaradi boljše sprejemnosti so pogosto vlakna po dolžini različno oblikovana, konec pa imajo oblikovan tako, da se v matrici zasidrajo. Obdelane so lahko tudi površine vlaken, da je sprejemnost večja.

Tip vlaken pomembno vpliva na lastnosti kompozita. Če za mikroarmiranje uporabljamo jeklena vlakna, ki imajo visoko trdnost in visok modul elastičnosti, je nastali kompozit zelo duktilen. Pri uporabi vlaken iz alkalnoodpornega stekla, ki imajo precej nižjo trdnost od jeklenih in so tudi razmeroma krhka, je duktilnost dobljenega kompozita nizka. Uporaba polimernih vlaken daje kompozitu spet drugačne fizikalne in mehanske lastnosti, saj so polimerna vlakna sicer trdna, zelo duktilna in je njihov modul elastičnosti nižji od modula elastičnosti matrice.

Obstajajo tri možnosti orientacije vlaken:

- 1.) Vlakna so naključno porazdeljena po kompozitu. Lastnosti kompozita so izotropne. Taka porazdelitev je značilna za betone z nizkim deležem vlaken.
- 2.) Vlakna so naključno orientirana po kompozitu. Taka porazdelitev se pojavi povsod, kjer je nanos kompozita tanek ali pa tehnologija izvedbe povzroča orientacijo.
- 3.) Vlakna so v ravnini usmerjena v eno smer. Tako orientacijo je možno doseči s posebno tehnologijo izdelave.

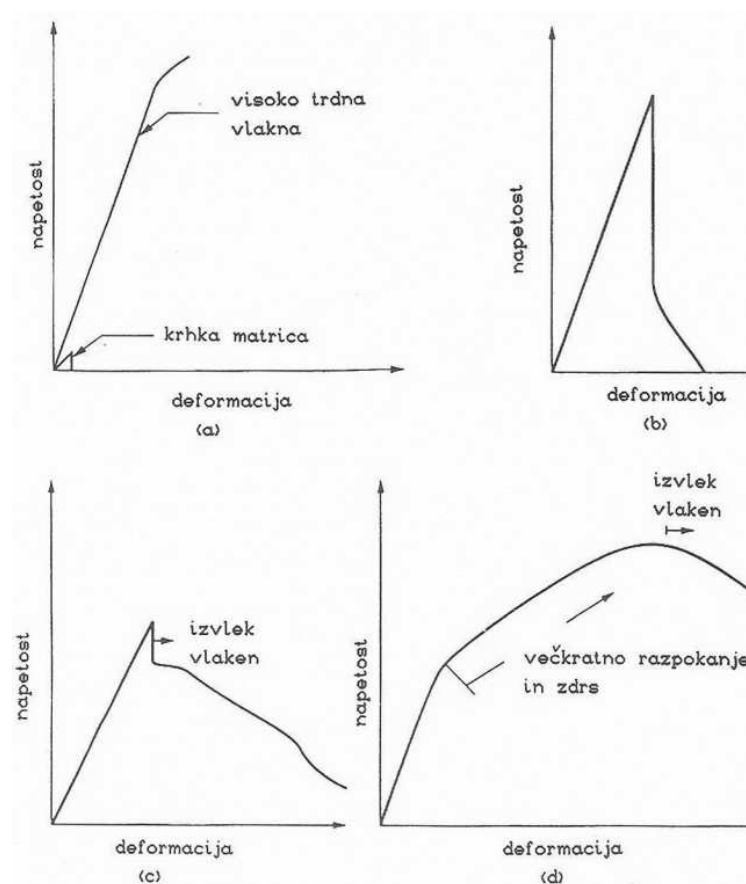
Kompozit z zelo nizko vsebnostjo vlaken se obnaša podobno kot krhka matrica. Takoj po porušitvi matrice se poruši tudi kompozit. Kompozit s srednjo vsebnostjo vlaken se obnaša drugače. Po porušitvi matrice se kompozitu nekoliko zniža nosilnost, a še vedno nosi obremenitev, ki se prenaša preko razpok po vlaknih. Pri povečevanju obremenitve postopno prihaja do porušitve stika med matrico in posameznimi vlakni, kar vodi do porušitve kompozita. Pri kompozitu z visoko vsebnostjo vlaken prevzamejo vlakna po porušitvi matrice obremenitev. Ker je vlaken precej, ima kompozit večjo nosilnost, kot je bila obremenitev v trenutku porušitve matrice. Obnašanje betonov, mikroarmiranih z različnimi količinami in različnimi vrstami vlaken, je prikazano na sliki 3.3 in 3.4.



Slika 3.3: Delovni diagrami betonov, mikroarmiranih z različnimi količinami vlaken različnih tipov (Zajc, 1994)

Naklon krivulje napetost – deformacija se po porušitvi matrice spremeni (slika 3.4). Odvisen je od količine vlaken in njihove povezanosti z matrico. Pri preučevanju obremenitve se vzdolž preskušanca tvorijo razpoke. Pri določenem nivoju obremenitve se začnejo rušiti stiki med

matrico in posameznimi vlakni. Tedaj doseže krivulja napetost – deformacija svoj maksimum. Nosilnost kompozita pade, deformacija pa se hitreje povečuje.



Slika 3.4: Delovni diagrami za: zelo trdno vlakno in za krhko matrico (a) ter za kompozite z zelo nizko (b), srednjo (c) in visoko vsebnostjo vlaken (d) (Zajc, 1994)

3.4 Lastnosti otrdelega mikroarmiranega betona

Vlakna v betonu spremenijo njegove mehanske lastnosti, predvsem žilavost in duktilnost. Največji vpliv imata vrsta in količina uporabljenih vlaken.

3.4.1 Žilavost

Žilavost materiala je obseg sposobnosti absorpcije energije do neke stopnje deformacije ali pa do porušitve. Vlakna v betonu povečujejo sposobnost absorpcije energije.

3.4.2 Udarna trdnost

Pri betonih z jeklenimi vlakni je udarna trdnost od 5-krat do 10-krat večja kot pri primerljivem betonu brez vlaken. Tudi plastična vlakna pripomorejo k zvečanju udarne trdnosti, vendar v precej manjši meri.

3.4.3 Trdnost

Trdnost betona se poveča le, če so uporabljene precejšnje količine vlaken visoke trdnosti. Pri uporabi jeklenih vlaken se lahko tlačne trdnosti vlaknastega betona povečajo za do 25% tlačne trdnosti primerljivega betona brez vlaken. Upogibne in natezne pa do največ 200%. Polimerna vlakna ne povečujejo trdnosti, lahko jih celo nekoliko znižajo.

3.4.4 Odpornost na utrujanje

Vlakna, zlasti jeklena, znatno povečujejo odpornost betonskih elementov na utrujanje, zaradi česar se njihova življenjska doba daljša.

3.4.5 Odpornost na obrus

Betoni z jeklenimi vlakni so zelo odporni na obrus in abrazijo. Odpornost je tem večja, čim večji je volumski delež vlaken v betonu. Polimerna vlakna imajo znatno nižjo odpornost na obrus.

3.4.6 Zmrzljinska odpornost

Odpornost proti zmrzovanju in odtajevanju brez in v prisotnosti odtajevalnih soli je odvisna le od matrice.

3.4.7 Korozija jeklenih vlaken

Raziskave so pokazale, da pride do korozije jeklenih vlaken v vlaknastih betonih, ki so bili dolgo časa izpostavljeni zelo agresivnemu okolju, samo v zelo tanki plasti na površini betona.

4 TLAČNA TRDNOST

4.1 Splošno

Fizikalne lastnosti otrdelega betona, med katere sodi tudi tlačna trdnost, so odvisne od velikega števila parametrov, kot so vrsta in količina sestavin ter njihova medsebojna razmerja v betonu, način izdelave betonske mešanice, nega betona ... Ob množici bolj ali manj vplivnih parametrov pa njegove fizikalne lastnosti pogojuje predvsem nastala struktura betona.

4.2 Struktura betona

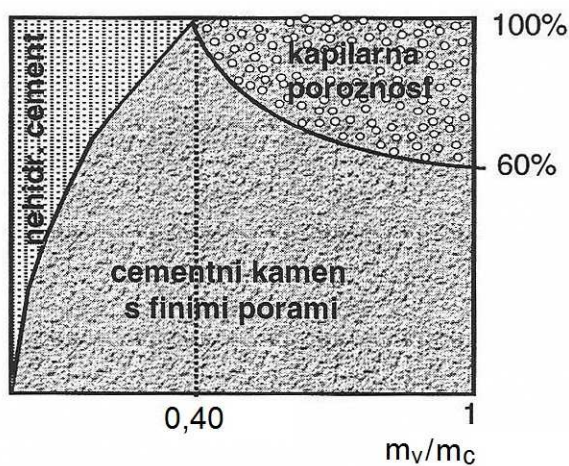
4.2.1 Formiranje strukture betona

Struktura betona se začne formirati, ko se v sveži betonski mešanici začne proces hidratacije cementa. Hidratacija je proces vezanja vode in cementa, natančneje je to zapletena vrsta kemičnih reakcij med posameznimi minerali klinkerja, kalcijevim sulfatom in vodo. Nekatere reakcije potekajo istočasno, nekatere pa zaporedno z različnimi hitrostmi in vplivajo ena na drugo. Na začetku je proces odvisen od hitrosti raztapljanja klinkerjevih materialov in kalcijevega sulfata. V nadaljevanju postane proces bolj sledljiv s kontrolo rasti kristalov hidratacijskih produktov, na koncu pa s hitrostjo difuzije vode in raztapljanja ionov (Žarnić, 2003).

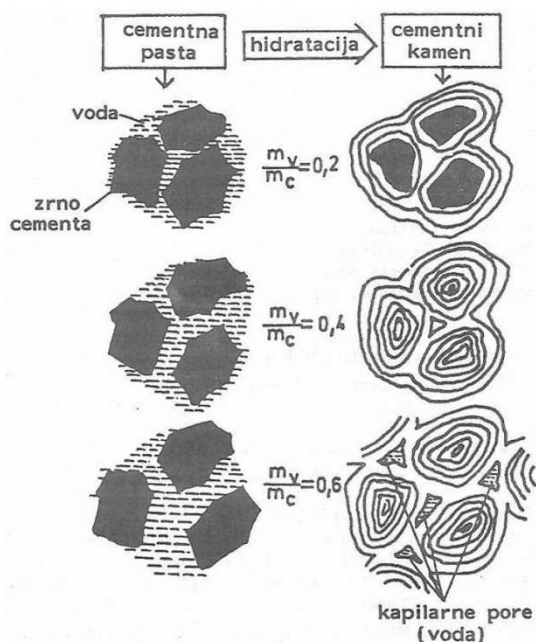
Hidratacijski proces ima pomemben vpliv na fizikalne lastnosti otrdelega betona. Proces vezanja in strjevanja cementne paste je odvisen od razmerja mase vode in mase cementa v njej. Temu razmerju pravimo vodocementni količnik – m_v/m_c . Pri vodocementnem razmerju med 0.38 in 0.42 se pri idealnih pogojih hidratizira praktično ves cement – popolna hidratacija. Vpliv vodocementnega razmerja na proces hidratacije in sestavo cementnega kamna je prikazan na sliki 4.1 in 4.2.

Glede na velikost vodocementnega razmerja so možni trije primeri:

- pri $m_v/m_c < 0.4$ je v cementni pasti premalo vode za popolno hidratacijo cementa in zato del cementa ostane nevezan v praškastem stanju,
- pri $m_v/m_c = 0.4$ so v cementni pasti idealne razmere, pri katerih se hidratizira ves cement,
- pri $m_v/m_c > 0.4$ je v cementni pasti odvečna voda, ki se naseli v kapilarnih porah.

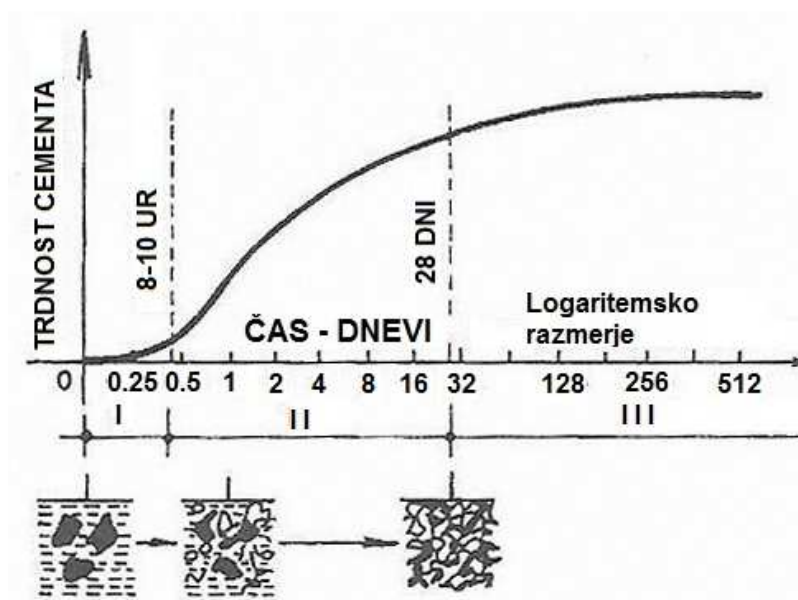


Slika 4.1: Vpliv vodocementnega razmerja na sestavo cementnega kamna (Žarnić, 2003)



Slika 4.2: Shematski prikaz sestave cementnega kamna za tri karakteristične vrednosti vodocementnega razmerja (Muravljov, 2000)

Formiranje strukture betona je v veliki meri odvisno od procesa hidratacije. Če pogledamo na proces s strani prirastka trdnosti betona, ga lahko razdelimo na tri faze, kot prikazuje slika 4.3.



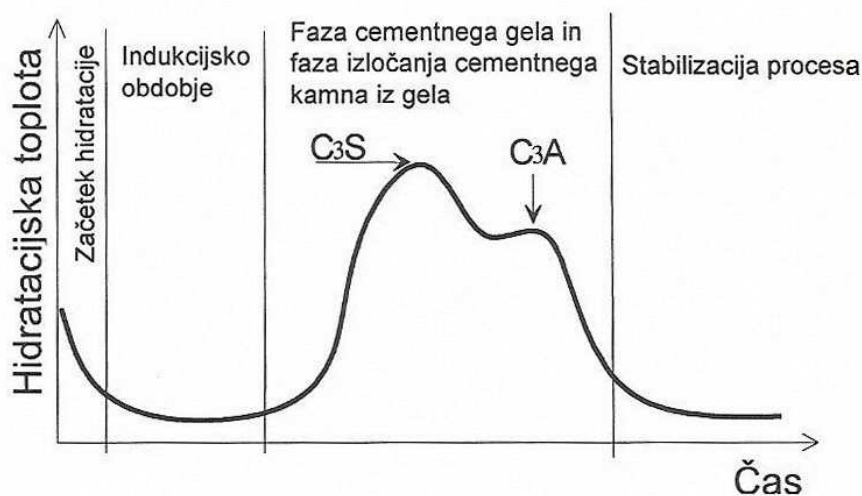
Slika 4.3: Faze formiranja strukture betona (Muravljov, 2003)

I – Začetna faza, faza formiranja začetne strukture, ko sveža betonska mešanica zaradi vezanja preide v otrdelo agregatno stanje.

II – Faza postopnega formiranja strukture otrdelega betona s povečanjem trdnosti.

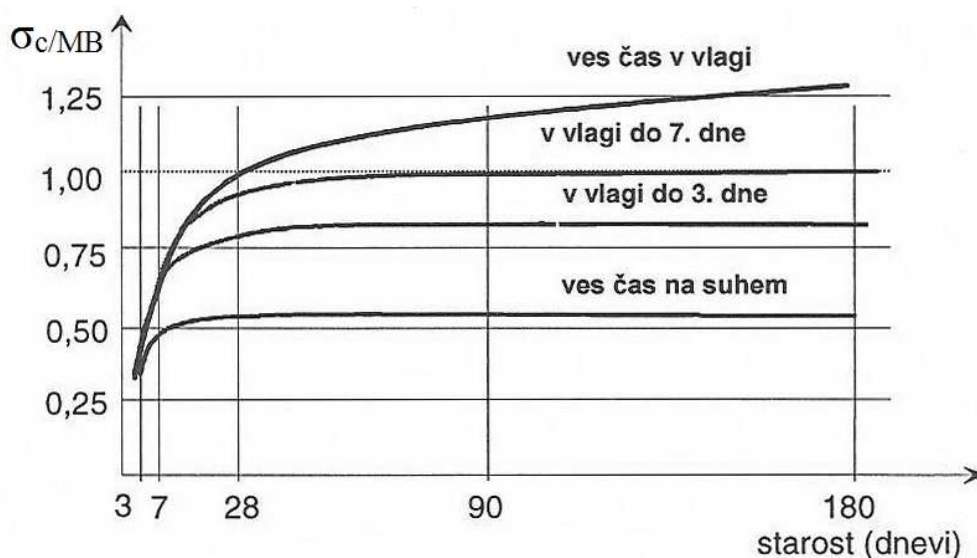
III – Faza stabilizacije strukture, ko se dosežena trdnost s časom bistveno ne spreminja.

Poseben problem pri hidrataciji predstavlja razvoj hidratacijske toplote (slika 4.4) in njen vpliv na lastnosti cementnega kamna. Pri nizkih temperaturah okolja hidratacijska toplota delno varuje beton pred zmrzovanjem. Pri masivnih konstrukcijah, kot so pregrade, hidratacijska toplota povzroča lokalne notranje obremenitve zaradi neenakomernega odvajanja temperature. Počasi vezoči cementi razvijejo v prvih treh dneh približno polovico hidratacijske toplote, hitrovezoči pa v veliko krajšem času. Proces formiranja strukture lahko upočasnimo ali pospešimo z različnimi mineralnimi in kemijskimi dodatki ali s posebnimi postopki obdelave, kot sta parjenje in avtoklave.



Slika 4.4: Razvoj hidratacijske toplote v prvih urah vezanja cementne paste (Žarnić, 2003)

Že od samega začetka je pri procesu formiranja strukture betona zelo pomembna nega le-tega, saj njegova trdnost narašča ves čas staranja, dokler se v cementni pasti še nahajajo nehidratizirana zrna cementa (slika 4.5). Proces lahko poteka nemoteno, če je relativna vlažnost okolja nad 80% in če je temperatura okolja dovolj visoka. Pri nižji vlažnosti in temperaturi pod mejo zmrzovanja se hidratacija in naraščanje trdnosti praktično ustavita. Proces se lahko nadaljuje, če se izsušeni beton po vsej svoji prostornini ponovno navlaži. Uvajanje vlage v izsušeni beton je praktično težko izvedljivo, zato je v prvem mesecu starosti nujna nega betona z zagotavljanjem ustrezne vlažnosti okolja (Žarnić, 2003).

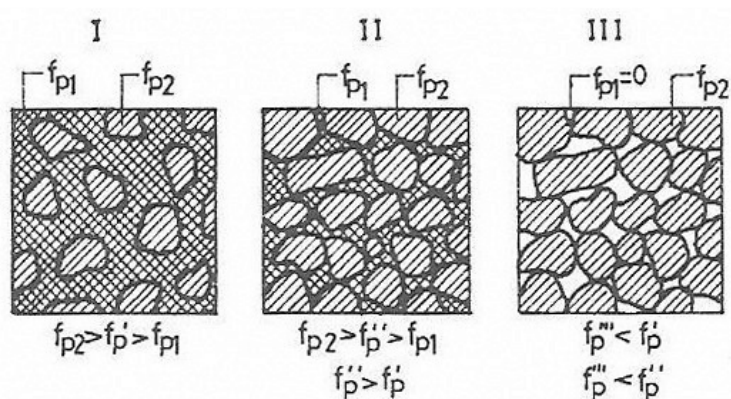


Slika 4.5: Vpliv vlažnosti okolja na razvoj tlačne trdnosti (Žarnić, 2003)

4.2.2 Makrostruktura betona

V makrostrukturi betona ločimo dva osnovna strukturna elementa, agregat in cementni kamen. Makrostruktura betona je nehomogena in jo lahko izrazimo glede na agregat in cementni kamen, ki sta vsebovana v masi betona.

Ločimo tri oblike makrostrukture betona, kot jih prikazuje slika 4.6.



Slika 4.6: Oblike makrostrukture betona (Muravljov, 2007)

I – Zrna agregata v strukturi so predvsem v stiku s cementnim kamnom, ker so razdalje med njimi prevelike. Med sabo se ne dotikajo in med njimi se ne ustvarja trenje.

II – Zrna agregata se med seboj dotikajo in zaklinjajo, kar povzroča med njimi trenje in znatno boljše fizikalne lastnosti betona. Cementni kamen le zapolnjuje prostore med zrnimi agregati in povezuje zrna agregata med seboj.

III – Cementni kamen obdaja zrna agregata in jih povezuje, prostor med zrnimi agregati pa ostaja nezapolnjen.

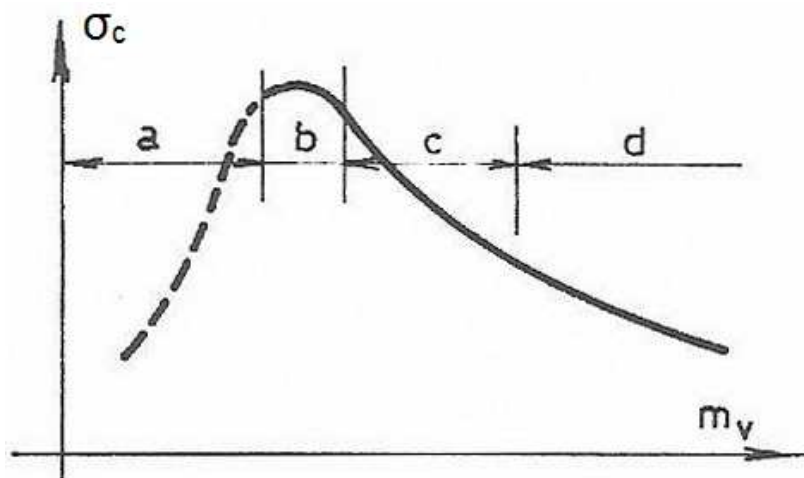
Vsaka struktura ima svoje zakonitosti glede na lastnosti betona. Medtem ko so pri I. in III. obliki lastnosti betona predvsem odvisne od cementnega kamna, so pri II. lastnosti betona odvisne tako od cementnega kamna kot od agregata. Najpogosteje se v praksi pojavlja struktura II, saj pri taki strukturi običajno dosežemo najboljše fizikalne lastnosti otrdelega betona. Pri doseganju tega imajo pomembno vlogo pravilno sestavljena granulometrijska sestava agregata, trdnost in kompaktnost agregata ter vibriranje sveže betonske mešanice pri vgrajevanju.

4.2.3 Mikrostruktura betona

Pri makrostrukturi betona se ukvarjamo predvsem z dvema osnovnima strukturnima elementoma, agregatom in cementnim kamnom. Pri mikrostrukturi betona pa je poudarek na notranji strukturi teh dveh osnovnih elementov. Opazujemo poroznost in zgoščenost betona, analiziramo vpliv lastnosti betona na njegove lastnosti... S podrobno razlago mikrostrukture betona se v okviru diplomske naloge ne bomo ukvarjali.

4.3 Trdnost betona

Raziskave so pokazale, da ima pri enakih količinah in vrstah vgrajenega cementa in agregata ter pri enakem načinu vgrajevanja krivulja tlačne trdnosti betona, v odvisnosti od količine vode obliko kot je prikazana na sliki 4.7.

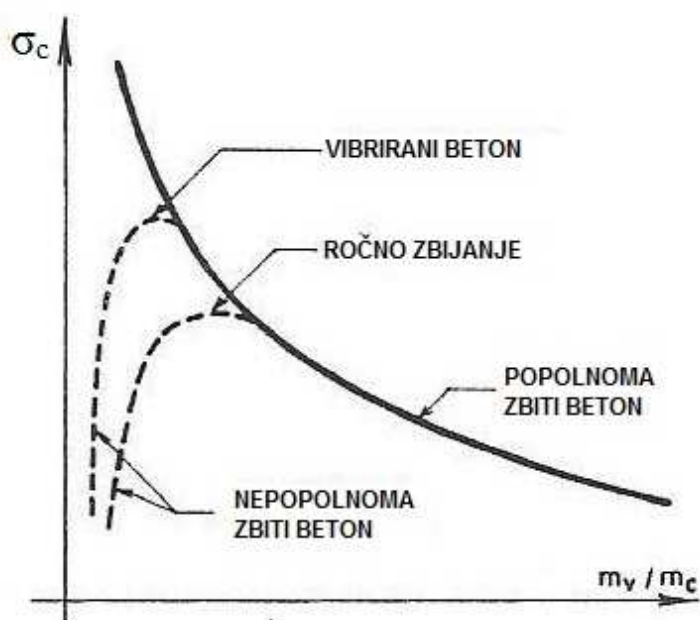


Slika 4.7: Trdnost betona v odvisnosti od količine vgrajene vode (Muravljov, 2007)

Slika 4.7 prikazuje velikost tlačne trdnosti betona v odvisnosti od količine vode. Pri majhnih količinah vode je konsistenca betona trdoplastična (področje a). Beton težko zgoščujemo in vgrajujemo. S povečevanjem količine vmešane vode dobimo beton srednjeplastične konsistence (področje b), ki ima višjo trdnost zaradi boljše vgradljivosti in več produktov hidratacije. Z nadaljnjim povečevanjem količine vode v betonu pridemo v področje mehkoplastične konsistence (področje c), pri kateri trdnost betona s povečevanjem

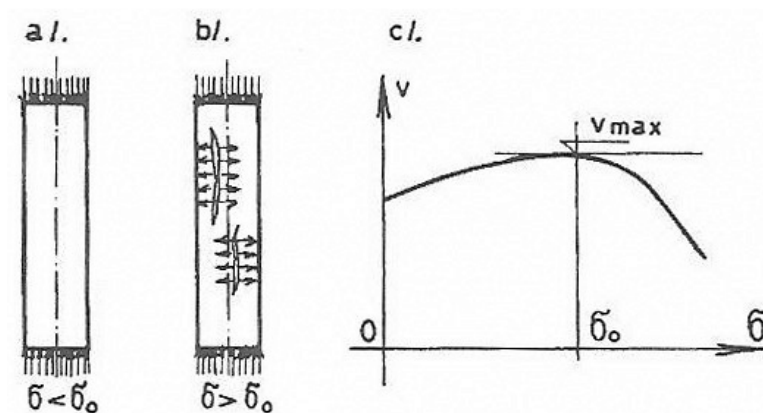
vodocementnega razmerja pada zaradi večje poroznosti. Desni del krivulje pa predstavlja tekočo konsistenco (področje d), pri kateri se trdnost še zmanjšuje, saj se pojavi segregacija agregata.

Obstaja optimalna količina vode, pri kateri ima beton ob primerni vgradljivosti najnižjo poroznost in hkrati veliko trdnost. Pri konstantni količini cementa v betonu je njegova trdnost odvisna od vodocementnega razmerja in kompaktnosti betona. Slika 4.8 prikazuje sovisnost med tlačno trdnostjo betona in vodocementnim razmerjem v odvisnosti od načina vgradnje betona.



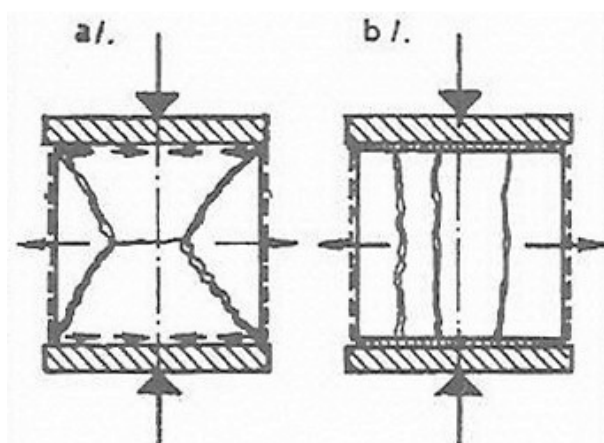
Slika 4.8: Sovisnost med tlačno trdnostjo betona in vodocementnim razmerjem
(Muravljov, 2007)

4.4 Mehanizem porušitve betona

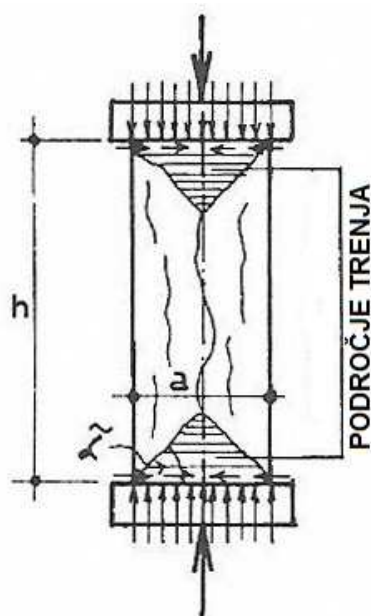


Slika 4.9: Obnašanje tlačno obremenjenega betonskega elementa (Muravljov, 2007)

Struktura betona je grobo nehomogena. Tako agregat kot cementni kamen sta polna nepravilnosti. Razlikujeta se tako po trdnosti kot po deformacijskih lastnostih. V agregatu so prisotne mikrorazpoke, ki so posledica naravnih vplivov ali tehnološkega postopka njegovega pridobivanja – drobljenja, in pore, v katerih so lahko prisotne razne nečistoče ali soli. Pri procesu hidratacije v cementnem kamnu nastanejo pore in zaradi krčenja številne mikrorazpoke. Eno izmed oslabitev prereza predstavljajo tudi zračni mehurčki, ki so posledica priprave betonske mešanice.

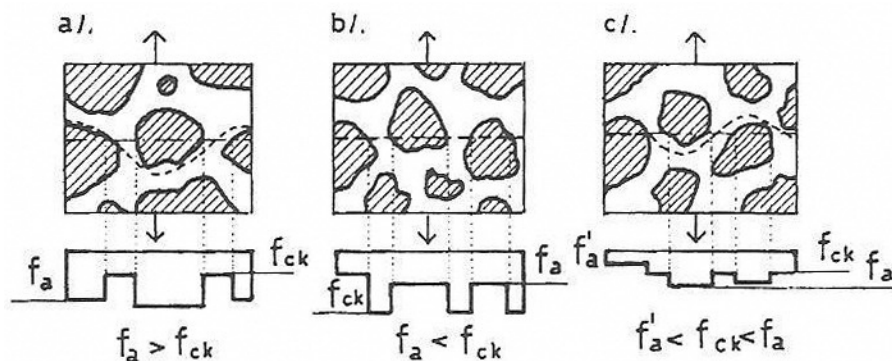


Slika 4.10: Pojav nateznih napetosti v osrednjem delu tlačnoobremenjenega betonskega preskušanca (Muravljov, 2007)



Slika 4.11: Porušitev tlačnoobremenjene betonske prizme (Muravljov, 2007)

Slika 4.9 prikazuje tlačnoobremenjeno betonsko prizmo, po kateri se napetosti vzdolž vertikalne osi spreminjajo zaradi materialne nehomogenosti – nepravilnosti v betonu povzročajo koncentracije napetosti. Na krajnih delih tlačnoobremenjene prizme se ustvarjajo tako tlačne napetosti, kot napetosti zaradi trenja (slika 4.11). V osrednjem delu betonskega elementa se kot posledica tlačne obremenitve in neovirane deformacije, v pravokotni smeri na vzdolžno os preskušanca, pojavljajo natezne napetosti (slika 4.10). Na mestih koncentracij napetosti se iz mikrorazpok širijo nove razpoke, ki predstavljajo oslabitve betona. Tlačno obremenitev lahko povečujemo, dokler ni doseženo kritično število razpok.



Slika 4.12: Osnovni tipi porušitve betona (Muravljov, 2007)

Porušitev betona, ki je posledica prekoračenih nateznih napetosti, je možna na tri načine, kot jih prikazuje slika 4.12:

- kadar je nosilnost agregata večja kot nosilnost cementnega kamna ali nosilnost stičnega območja med agregatom in cementnim kamnom, linija porušitve oplazi zrna agregata (a);
- kadar je nosilnost agregata manjša kot nosilnost cementnega kamna ali nosilnost stičnega območja med agregatom in cementnim kamnom, linija porušitve poteka čez agregat in čez cementni kamen (b);
- kadar je nosilnost agregata in nosilnost cementnega kamna ali nosilnost stičnega območja med agregatom in cementnim kamnom približno enaka, poteka linija porušitve tako po agregatu kot po cementnem kamnu (c).

Znano je, da na potek porušitve betonskega preskušanca pomembno vpliva tudi voda, ki pri povečevanju tlačne obremenitve v preskušancu povečuje notranje napetosti in hitrost širjenja razpok. Raziskovalec Muravljov navaja, da je trdnost betonskega preskušanca nekoliko nižja pri višji vlažnosti (Muravljov, 2007).

4.5 Merjenje tlačne trdnosti

Tlačna trdnost betona je definirana kot največja napetost betona, ki je posledica osne tlačne obremenitve pri starosti betona 28 dni. Preskuša se na preskušancih v obliki kock, prizem ali valjev. Preskušanec do preiskave hranimo v vodi ali prostoru z najmanj 95% relativno vlago in temperaturo $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$.

5 EKSPERIMENTALNE RAZISKAVE

Eksperimentalne raziskave tlačne trdnosti vlaknastih betonov in primerljivih betonov brez vlaken so del obsežnih preiskav mehanskih in reoloških lastnosti betonov običajne in visoke trdnosti, ki jih izvajamo na Katedri za masivne in lesene konstrukcije.

5.1 Uporabljeni materiali

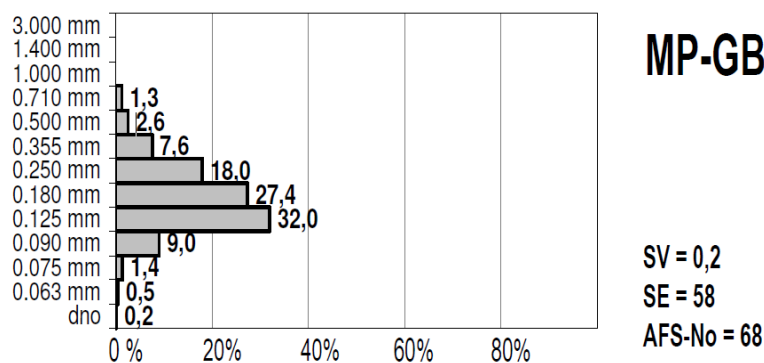
Pri eksperimentalnem delu smo za izdelavo betonskih mešanic uporabili sestavine, ki so razpoložljive na domačem trgu. Njihove fizikalne in kemijske lastnosti navajamo v nadaljevanju. V naših raziskavah so bili uporabljeni materiali enaki kot materiali, ki jih je v okviru svojega doktorskega študija za raziskave lastnosti betonov visoke trdnosti preskušal asist. dr. D. Saje. Sestave betonskih mešanic, ki so nam služile kot primerljive betonske mešanice k mešanicam z vlakni, smo povzeli iz njegove doktorske disertacije (Saje, 2001).

5.1.1 Agregat

Pri pripravi betonskih mešanic smo uporabili dve vrsti grobega kamenega agregata z največjim nazivnim zrnem 16 mm in mivko. Prvi agregat smo sestavili iz frakcij 0/4, 4/8 in 8/16 pranege drobljenega apnenčevega agregata iz separacije Kresnice in mivke Termit iz Moravč. Drugi agregat smo, poleg mivke Termit iz Moravč, sestavili iz frakcij 0/4, 4/8, 8/11 in 11/16 drobljenega apnenčevega agregata iz separacije Laže. Frakcije 8/11 in 11/16 iz separacije Laže smo združili v težnostnem razmerju 1:1 v skupno frakcijo 8/16. V preglednicah 5.1 do 5.3 podajamo lastnosti uporabljenih agregatov.

Preglednica 5.1: Fizikalne in kemijske lastnosti uporabljene mivke iz Moravč

Nahajališče	Moravče	
Opis	Kremenov pesek MP - GB se uporablja kot dodatek betonom. Mivka je značilne rjavkasto sive barve s posameznimi temnejšimi zrcni. Vsebuje delce s premerom do 0.710 mm. Granulometrijska sestava je prikazana na sliki 5.1.	
Lastnosti	kemijska sestava	najmanj 98% SiO ₂
	srednja velikost zrn	0.20 mm
	granulacija	0.075 – 0.710 mm
	odstotek vlage	približno 5%
	nasipna teža	približno 1.5 t/m ³
	točka sintranja	najmanj 1500°C



Slika 5.1: Prikaz deležev ostanka mivke MP-GB na sitih

Preglednica 5.2: Fizikalne in kemijske lastnosti apnenčevega agregata iz Kresnic

Nahajališče	Separacija Kresnice	
Vrsta kamnine	apnenec	
Mineraloško-petrografska analiza	makroskopski opis	Vzorec je svetlo siv apnenec. Kamenina je trdna in gosta. Razpoke v obliki stilolitnih šivov so zapolnjene z rjavim netopnim ostankom – glineni materiali. Del razpok je zapolnjen s prekristaliziranim kalcitom.
	mikroskopski opis	Osnova kamenine je mikrit, v katerem opazujemo stilolitne šive in tektonske žilice, zapolnjene z netopnim ostankom – glineni materiali. V mikritni osnovi opazimo redke ostanke bioklastov. Ponekod je mikrit prekristaljen v mikrosparit oz. sparit, predvsem v zapolnitvah žilic. Dolomit nastopa v skupkih v obliki kristalčkov.

»se nadaljuje...«

»...nadaljevanje«

Tlačna trdnost kamenine	v suhem stanju	min	118 MPa
		srednja	163 MPa
		max	198 MPa
	v mokrem stanju	min	103 MPa
		srednja	143 MPa
		max	173 MPa

Preglednica 5.3: Fizikalne in kemijske lastnosti apnenčevega agregata iz Laže

Nahajališče	Separacija Laže		
Vrsta kamnine	apnenec		
Mineraloško- petrografska analiza	makroskopski opis	Vzorec je rjavkasto siv apnenec, s številnimi zaobljenimi in neenakomerno razporejenimi ostanki, velikimi do 0.6 mm. Kamenina je gosta in trda. Odprtine razpok so redke in so deloma zapolnjene s kalcitom ter primesmi železovih hidroksidov in gline.	
	mikroskopski opis	Struktura kamenine je biosparimikritna. Osnovo gradi mikritna masa, ki je mestoma rekristalizirana v sparit. V osnovi ležijo neenakomerno razporejeni bioklasti, ki predstavljajo alokemično komponento. Žilice zapolnjujejo primesi železovih hidroksidov in gline.	
Tlačna trdnost kamenine	v suhem stanju	min	190 MPa
		srednja	243 MPa
		max	292 MPa
	v mokrem stanju	min	139 MPa
		srednja	229 MPa
		max	262 MPa

Opozoriti moramo, da je bil agregat iz Separacije Kresnice predhodno opran in so bila zrna agregata čista, medtem ko so bila pri agregatu iz separacije Laže zrna agregata ovita s prašnimi delci, ker niso bila predhodno oprana.

5.1.2 Cement

Uporabili smo specialni cement CEM II/A-S 42.5 R iz cementarne Salonit v Anhovem. Delež posameznih mineralov v cementnem klinkerju smo prikazali v preglednici 5.4, v preglednici 5.5 pa podajamo kemijske sestavine, fizikalno-kemijske in mehanske lastnosti cementov.

Preglednica 5.4: Delež mineralov v cementnem klinkerju uporabljenega cementa

Vrsta cementa	Vrsta cementnega klinkerja	Minerali klinkerja			
		C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
CEM II/A-S 42.5 R	običajni klinker	64%	15%	9%	9%

Preglednica 5.5: Sestavine, fizikalno-kemijske in mehanske lastnosti uporabljenega cementa

Kemijska sestava		
Parameter	Izmerjeno	Zahteva standarda
Žarilna izguba (%)	2.70	-
Netopni ostanek (%)	0.40	-
SO ₃ (%)	2.65	≤ 4.0
Klorid (%)	0.02	≤ 0.1
SiO ₂ (%)	21.73	-
Al ₂ O ₃ (%)	5.13	-
Fe ₂ O ₃ (%)	2.69	-
CaO (%)	60.66	-
MgO (%)	2.54	-
Na ₂ O (%)	0.30	-
K ₂ O (%)	0.81	-
Fizikalne lastnosti		
Parameter	Izmerjeno	Zahteva standarda
Ostanek na situ 0.09 mm (%)	0.10	-
Prostorninska msna (g/cm ³)	3.09	-
Specifična površina (cm ² /g)	3900	-
Voda s standardno konsistenco (%)	29.8	-
Pričetek vezanja (min)	220	≥ 60
Konec vezanja (min)	280	-
Prostorninska obstojnost Le Chatelier (mm)	0.20	≤ 10
Mehanske lastnosti		
Upogibna trdnost (MPa) 2 dni	4.6	-
Upogibna trdnost (MPa) 28 dni	8.2	-
Tlačna trdnost (MPa) 2 dni	26.5	≥ 20.0
Tlačna trdnost (MPa) 28 dni	51.1	≥ 42.5, ≤ 62.5

5.1.3 Voda

Uporabili smo pitno vodo iz vodovodnega sistema Ljubljana.

5.1.4 Kemijski dodatki

Za doseganje visokih trdnosti smo pri betonskih mešanica del cementa nadomestili z mineralnim dodatkom. Uporabili smo Antikorodin (TTK Serpenica), ki je praškasti superplastifikator z dodatkom mikrosilike. Po kemični sestavi je sulfonirani naftalen – formaldehid kondenzant. Odpornost betona proti učinkom različnih kemikalij in vgradljivost pri nizkih vodovezivnih razmerjih betonskih mešanic znatno poveča. Lastnosti Antikorodina prikazujemo v preglednici 5.6 in 5.7.

Preglednica 5.6: Osnovne lastnosti Antikorodina

Vrsta dodatka	Gostota pri 20°C (g/cm ³)	Delež suhe snovi pri 105°C (%)
Antikorodin	2.40	100.0

Preglednica 5.7: Sestava, fizikalno-mehanske lastnosti mikrosilike (TTK Serpenica)

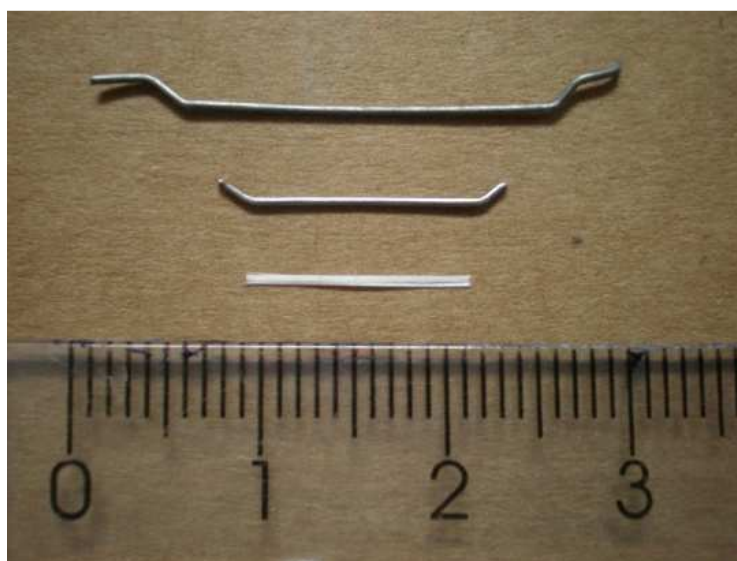
Kemijska sestava	
Parameter	Delež (%)
SiO ₂	95.50 – 95.90
Al ₂ O ₃	0.13 – 0.17
Fe ₂ O ₃	0.09 – 0.12
CaO	0.35 – 0.55
C prosti	1.10 – 1.30
C iz SiC	0.30 – 0.50
C celotni	1.15 – 1.80
SiC	1.10 – 1.60
MgO	0.25 – 0.30
SO ₃	0.20 – 0.30
N ₂ O	0.10 – 0.15
K ₂	0.45 – 0.60
Žaroizguba	0.80 – 1.14
Fizikalno-kemijske lastnosti	
Parameter	Delež
Nasipna gostota	400 – 550 kg/m ³
Prostorninska masa	2200 kg/m ³
Specifična površina (BET)	21 – 23 m ² /g
Velikost delcev (80%)	0.1 – 0.3 μm
Vlaga	0.25 – 0.30 %

5.1.5 Vlakna

Preiskovanim betonskim mešanici smo dodali različne vrste (slika 5.2) in različne količine vlaken ter preučevali njihov vpliv na časovni razvoj tlačne trdnosti betonov običajne in visoke trdnosti. Uporabili smo dve vrsti jeklenih vlaken (v nadaljevanju tudi JV) in eno vrsto polipropilenskih vlaken (v nadaljevanju tudi PPV). Uporabljena jeklena vlakna IRI 50/16 in IRI 50/30, ki se razlikujeta le v dolžini vlaken, proizvaja podjetje IRMA iz Ljubljane. Podrobnejše lastnosti jeklenih vlaken smo podali v preglednici 5.8.

Preglednica 5.8: Lastnosti uporabljenih jeklenih vlaken IRMA

Jeklena vlakna	Dolžina vlaken [mm]	Premer vlaken [mm]	Natezna trdnost vlaken [MPa]	Klasifikacija vlaken
IRI 50/16 (JVK)	16	0.5	800	Tip 1
IRI 50/30 (JVD)	30	0.5	900	Tip 1



Slika 5.2: Vrste uporabljenih vlaken

Uporabljena vlakna so prikazana na sliki 5.2. Na vrhu je jekleno vlakno IRI 50/30 (JVD), v sredini jekleno vlakno IRI 50/16 (JVK) in spodaj polipropilensko vlakno (PPV) Grace Krenit.

Polipropilenska vlakna, proizvajalca Grace Krenit, smo v suhem stanju dodali betonskim mešanici običajne in visoke trdnosti v prostorninskem deležu betona 0.5%. Lastnosti polipropilenskih vlaken so podane v preglednici 5.9.

Preglednica 5.9: Lastnosti uporabljenih polipropilenskih vlaken (Grace Krenit)

Gostota vlaken [g/cm ³]	Dolžina vlaken [mm]	Premer vlaken [μm]	Natezna trdnost vlaken [MPa]	Elastičen modul vlaken [MPa]
0.91	12	35 × (250 - 600)	340 – 500	8500 – 12500

5.2 Sestava betonskih mešanic in priprava preskušancev

Enačba 5.1 podaja prostorninske deleže sestavin v 1 m³ betonske mešanice.

$$1 \text{ m}^3 = \frac{m_V}{\rho_V} + \frac{m_A}{\rho_A} + \frac{m_{MS}}{\rho_{MS}} + \frac{m_C}{\rho_C} + \frac{m_{VL}}{\rho_{VL}} + \text{vol. por} \quad (5.1)$$

m_V – masa vode

ρ_V – gostota vode

m_A – masa agregata

ρ_A – gostota agregata

m_{MS} – masa mikrosilike

ρ_{MS} – gostota mikrosilike

m_C – masa cementa

ρ_C – gostota cementa

m_{VL} – masa vlaken

ρ_{VL} – gostota vlaken

Vlaknaste betonske mešanice običajne in visoke trdnosti smo zasnovali za eksperimentalno raziskavo časovnega razvoja tlačne trdnosti betona tako, da smo k osnovnim betonskim mešanici običajne in visoke trdnosti, povzetim po doktorski disertaciji (Saje, 2001), dodali različne vrste in količine vlaken ter različni vrsti agregata. Preskušanci betonskih kock, dimenzij 15 × 15 × 15 cm, so bili pripravljene v laboratoriju Fakultete za Gradbeništvo in Geodezijo v Ljubljani. Priprava preskušancev in pridobivanje rezultatov je potekalo v časovnem obdobju od decembra 2008 do junija 2009. Zaradi velikega števila preskušancev, 15-ih betonskih kock na mešanico, kar znaša 51 l sveže betonske mešanice, smo vsako mešanico razdelili v dve fazi. Prva faza je obsegala pripravo 9-ih preskušancev, kar znaša 33 l

sveže betonske mešanice, druga faza pa preostalih 6-ih preskušancev, kar znaša 23 l sveže betonske mešanice. Potek priprave vzorca preskušancev podajamo v preglednici 5.10.

Preglednica 5.10: Opis priprave vzorcev, poteka meritev in zbiranja rezultatov

Priprava materiala	Agregatni material in mivko smo v laboratoriju površinsko osušili in s tem preprečili vnos dodatne vode v betonsko mešanico.
Priprava železnih kalupov	Kalupe smo očistili in jih premazali z opažnim oljem, da smo preprečili prijemanje betona na železne kalupe.
Tehtanje količin sestavnih materialov	Pred pripravo mešanice smo na tehtnici odtehtali točno določene količine posameznih frakcij agregata, mivke, cementa, Antikorodina, vlaken in vode.
Priprava mešanice	Sestavine smo vstavili v mešalec, najprej vse frakcije agregata, jih suho premešali, kar je trajalo približno dve minuti. Dodali smo cement, vlakna in za betone visoke trdnosti še Antikorodin. Vse skupaj smo ponovno premešali, ker je trajalo približno dve minuti. S postopnim dodajanjem sestavin in mešanjem smo preprečili nastajanje gnezd. Vodo smo s konstantnim, počasnim dolivanjem dodajali v mešalec med mešanjem, da se je enakomerno porazdelila po celotni mešanici. Mešali smo približno 5 minut, da smo dobili enakomerno betonsko mešanico.
Preskus mešanice	Po pripravi mešanice smo preskusili razlez in posed, zmerili temperaturo sveže betonske mešanice. Izmerjene podatke smo sproti beležili za analizo.
Priprave preskušancev	Po preskusi smo sveži beton ponovno premešali, kar je trajalo približno 30 s. Sledilo je polnjenje kalupov in zgoščevanje na vibracijski mizi, da smo iz mešanice v kalupu spravili čim več zračnih mehurčkov. Kalupe smo postavili na ravno površino in jih pokrili s PVC folijo.
Razkalupljanje	Po 24-ih urah smo kalupe odprli in preskušance označili z oznako mešanice, ki je vsebovala vrsto betona, vrsto vlaken, količino vlaken, datum priprave in fazo mešanice.
Negovanje	Preskušance smo po označitvi dali v posode z vodo, da so bili vanjo potopljeni in jih tako negovali do dneva, ko smo jim izmerili tlačno trdnost. Izjema so bili preskušanci za preverjanje tlačne trdnosti pri starosti 1 dan, ki smo jim takoj po razkalupljanju preverili tlačno trdnost.
Zbiranje rezultatov	Preskušance, ki so bili negovani v vodi do dneva preskusa, smo dali iz vode približno 0.25 ure pred preskusom, da se je voda odcedila s površine preskušanca. Tako pridobljeni rezultati dajejo najnižjo vrednost tlačnih trdnosti preskušancev, ker imajo osušeni preskušanci višje tlačne trdnosti zaradi sile srka na stene por, ki nastane pri izsuševanju (poglavje 5.4.5).

Posed po SIST EN 12350-2

Metodo uporabljamo za:

- plastične betone,
- $D_{\max} < 40$ mm.

Sveži beton na predpisan način vgradimo v posodo oblike prisekanega stožca (Abramsov stožec) in zgostimo. Kalup odstranimo (dvignemo). Mera za konsistenco betona je višina poseda vzorca svežega betona po odstranitvi kalupa.

Pred izvedbo preskusa v posodi za mešanje vzorec premešamo s štirioglato lopatico (zidarsko žlico). Površino osnovne plošče in notranjost kalupa obrišemo z vlažno krpo in odstranimo odvečno vodo. Kalup postavimo na vodoravno osnovno ploščo. Med polnjenjem moramo kalup pritisniti k osnovni plošči tako, da stojimo na obeh pločevinastih ušesih. Kalup polnimo v treh slojih, vsakega zgostimo s 25 udarci z zgoščevalno palico. Polnimo ga tako, da vsak sloj po zgoščevanju zavzame približno tretjino višine kalupa. Ko kalup napolnimo, s pomočjo palice za zgoščevanje odstranimo odvečni beton na zgornjem obodu kalupa. Nato odstranimo še ves beton, ki je med polnjenjem padel na osnovo ploščo. Ko očistimo površino s počasnim, enakomernim vlečenjem navzgor odstranimo kalup (5-10 s), pri čemer se premiki kalupa ne smejo prenašati na beton. Celoten postopek od začetka do konca odstranitve kalupa izvedemo brez prekinitev najpozneje v 150 sekundah. Preverimo, kakšno obliko ima poseden vzorec svežega betona. Preskus je veljaven le, če se konča s pravilnim posedom. Če se preskušaneč poruši strižno, vzamemo drug vzorec betona in postopek ponovimo. Če se pri dveh zaporednih preskusih del betona strižno izloči iz mase preskušanca, tak beton za preskus s posedom ni primeren, ker nima potrebne plastičnosti in kohezivnosti. Višino prvega poseda zaokrožimo na najbližjih 10 mm in dobljeno vrednost zabeležimo.

Razlez po SIST EN 12350-5:2001

Metodo uporabljamo za:

- plastične betona,
- $D_{\max} < 63$ mm.

Sveži beton na predpisan način vgradimo v posodo oblike prisekanega stožca in zgostimo. Kalup odstranimo (dvignemo). Ploščo s stožcem 15-krat dvignemo in spustimo. Mera za konsistenco betona je širina razlezenega betona.

Pred izvedbo preskusa v posodi za mešanje vzorec premešamo s štirioglato lopatico (zidarsko žlico). Razlezno mizo postavimo na ravno in vodoravno površino, ki ni izpostavljena zunanjim vibracijam ali tresljajem. Površino razlezne mize in notranjost kalupa obrišemo z vlažno krpo in odstranimo odvečno vodo. Kalup postavimo na sredino mize. Med polnitvijo moramo kalup pritisniti k osnovni plošči tako, da stojimo na obeh pločevinastih ušesih. Kalup napolnimo v dveh slojih in zgostimo z 10 udarci nabijala. Ko kalup napolnimo, s pomočjo nabijala odstranimo odvečni beton na zgornjem obodu kalupa. Nato odstranimo še beton s kovinske obloge vrhnje plošče mize. Ko se površina betona poravna, počakamo 30 s, nato počasi dvignemo stožec navpično. Razlezno mizo stabiliziramo tako, da stopimo na stopalko na sprednji strani mize. Nato 15-krat počasi dvignemo zgornji del mize, dokler ta ne doseže distančnika in ga spustimo, da prosto pade na spodnji distančnik. Z merilom izmerimo največji dimenziji d_1 in d_2 razlezenega betona v dveh smereh, vzporednih s stranicami mize. Meritvi zaokrožimo na najbližjih 10 mm in jih zabeležimo.

Sestave posameznih betonskih mešanic, pripravljenih za potrebe diplomske naloge, so prikazane v preglednicah od 5.11 do 5.14. Mešanice vsebujejo različne vrste vlaken (JVK, JVD, PPV), različne prostorninske deleže vlaken (0.5, 1.0, 2.0%) in različne vrste agregata (Kresnice, Laže). Betonske mešanice z začetno oznako NC predstavljajo beton običajne trdnosti z vsebnostjo agregata iz Kresnic. Prav tako vsebujejo agregat iz Kresnic tudi betonske mešanice z začetno oznako HSC, vendar te predstavljajo betone visoke trdnosti. Začetna oznaka NCL predstavlja betone in betonske mešanice običajne trdnosti z vsebnostjo agregata iz Laž. Ponovitvi osnovnih betonskih mešanic pa predstavljata betonski mešanici z oznakama NC-P in HCS-P.

Preglednica 5.11: Sestava preiskovanih betonskih mešanic betona običajne trdnosti z vsebnostjo agregata iz separacije Kresnice

Oznaka mešanice	NC	NC-JVK-0.5%	NC-JVD-0.5%	NC-PPV-0.5%				
Vrsta agregata	(K)	(K)	(K)	(K)				
Fini agregat 0-4 [kg/m ³]	1054	1046	1046	1046				
Grobi agregat 4-16 [kg/m ³]	702	696	696	696				
Vrsta cementa	(X)	(X)	(X)	(X)				
Količina veziva (C+MS) [kg/m ³]	400	400	400	400				
Količina mikrosilike [% veziva]	-	-	-	-				
Vodocementno razmerje	0.52	0.52	0.52	0.52				
Vrsta superplastifikatorja	-	-	-	-				
Količina superplastifikatorja [%]	-	0	0	0				
Vrsta vlaken	-	(JVK)	(JVD)	(PPV)				
Količina vlaken [prost. delež v %]	0	0.5	0.5	0.5				
Prostorninska masa betona [kg]	2364	2389	2389	2355				
$f_{cm,28dni}$ [MPa]	56.67	55.56	54.81	49.26				
Temperatura vode pri $f_{cm,28dni}$ [°C]	17.0	13.6	13.9	13.0				
Temperatura zraka pri $f_{cm,28dni}$ [°C]	19.1	16.3	15.4	15.4				
Oznaka mešanice	NC		NC-JVK-0.5%		NC-JVD-0.5%		NC-PPV-0.5%	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
Čas priprave mešanice	9:10	10:00	9:00	10:40	9:00	10:00	10:00	11:00
Posed [mm]	190	195	145	120	140	115	20	30
Razlez [mm]	515	500	480	440	470	460	310	320
Temperatura svežega betona [°C]	17.0	17.0	19.4	19.6	20.4	20.2	21.7	20.7
Temperatura zraka pri svežem betonu [°C]	16.6	17.3	19.5	19.9	19.4	19.6	19.5	19.5

»se nadaljuje...«

»...nadaljevanje«

Oznaka mešanice	NC-JVK- 1.0%	NC-JVK- 2.0%
Vrsta agregata	(K)	(K)
Fini agregat 0-4 [kg/m ³]	1038	1021
Grobi agregat 4-16 [kg/m ³]	691	680
Vrsta cementa	(X)	(X)
Količina veziva (C+MS) [kg/m ³]	400	400
Količina mikrosilike [% veziva]	-	-
Vodocementno razmerje	0.52	0.52
Vrsta superplastifikatorja	-	-
Količina superplastifikatorja [%]	-	-
Vrsta vlaken	(JVK)	(JVK)
Količina vlaken [prost. delež v %]	1.0	2.0
Prostorninska masa betona [kg]	2415	2466
f _{cm,28dni} [MPa]	56.11	54.07
Temperatura vode pri f _{cm,28dni} [°C]	16.6	17.8
Temperatura zraka pri f _{cm,28dni} [°C]	18.7	20.6

Oznaka mešanice	NC-JVK- 1.0%		NC-JVK- 2.0%	
	F1	F2	F1	F2
Čas priprave mešanice	9:50	10:45	9:50	10:45
Posed [mm]	130	110	130	110
Razlez [mm]	490	430	490	430
Temperatura svežega betona [°C]	18.3	18.5	18.3	18.5
Temperatura zraka pri svežem betonu [°C]	19.0	18.3	19.0	18.3

Legenda:

- | | | | |
|-----|---------------------------------|-------|--------------|
| (K) | Kresnice | (JVK) | JV IRI 50/16 |
| (X) | CEM II/A-S 42.5 R | (JVD) | JV IRI 50/30 |
| F1 | 1. faza = 33 l (9 preskušancev) | (PPV) | PPV |
| F2 | 2. faza = 23 l (6 preskušancev) | | |

Preglednica 5.12: Sestava preiskovanih betonskih mešanic betona visoke trdnosti z vsebnostjo agregata iz separacije Kresnice

Oznaka mešanice	HSC		HSC-JVK-0.5%		HSC-JVD-0.5%		HSC-PPV-0.5%	
Vrsta agregata	(K)		(K)		(K)		(K)	
Fini agregat 0-4 [kg/m ³]	1138		1130		1130		1130	
Grobi agregat 4-16 [kg/m ³]	758		752		752		752	
Vrsta cementa	(X)		(X)		(X)		(X)	
Količina veziva (C+MS) [kg/m ³]	400		400		400		400	
Količina mikrosilike [% veziva]	10		10		10		10	
Vodocementno razmerje	0.40		0.40		0.40		0.40	
Vrsta superplastifikatorja	(A)		(A)		(A)		(A)	
Količina superplastifikatorja [%]	2.05		2.05		2.05		2.05	
Vrsta vlaken	-		(JVK)		(JVD)		(PPV)	
Količina vlaken [prost. delež v %]	-		0.5		0.5		0.5	
Prostorninska masa betona [kg]	2449		2474		2474		2440	
$f_{cm,28dni}$ [MPa]	89.07		86.30		91.11		81.30	
Temperatura vode pri $f_{cm,28dni}$ [°C]	16.8		15.4		17.1		15.7	
Temperatura zraka pri $f_{cm,28dni}$ [°C]	19.3		18.3		18.9		18.4	
Oznaka mešanice	HSC		HSC-JVK-0.5%		HSC-JVD-0.5%		HSC-PPV-0.5%	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
Čas priprave mešanice	9:20	10:10	8:25	9:30	8:25	9:30	9:45	10:55
Posed [mm]	200	200	170	170	170	170	20	10
Razlez [mm]	510	515	460	450	460	450	325	330
Temperatura svežega betona [°C]	17.0	16.8	19.1	18.8	19.1	18.8	19.3	18.3
Temperatura zraka pri svežem betonu [°C]	15.4	15.4	17.8	18.2	17.8	18.2	16.3	16.8

»se nadaljuje...«

»...nadaljevanje«

Oznaka mešanice	HSC-JVK- 1.0%	HSC-JVK- 2.0%
Vrsta agregata	(K)	(K)
Fini agregat 0-4 [kg/m ³]	1122	1106
Grobi agregat 4-16 [kg/m ³]	747	736
Vrsta cementa	(X)	(X)
Količina veziva (C+MS) [kg/m ³]	400	400
Količina mikrosilike [% veziva]	10	10
Vodocementno razmerje	0.40	0.40
Vrsta superplastifikatorja	(A)	(A)
Količina superplastifikatorja [%]	2.05	2.05
Vrsta vlaken	(JVK)	(JVK)
Količina vlaken [prost. delež v %]	1.0	2.0
Prostorninska masa betona [kg]	2500	2551
f _{cm,28dni} [MPa]	93.70	94.81
Temperatura vode pri f _{cm,28dni} [°C]	17.4	17.6
Temperatura zraka pri f _{cm,28dni} [°C]	20.4	20.4

Oznaka mešanice	HSC-JVK- 1.0%		HSC-JVK- 2.0%	
	F1	F1	F1	F2
Čas priprave mešanice	9:05	10:15	10:15	10:45
Posed [mm]	140	45	45	110
Razlez [mm]	360	300	300	430
Temperatura svežega betona [°C]	19.8	20.0	20.0	18.5
Temperatura zraka pri svežem betonu [°C]	18.2	19.0	19.0	18.3

Legenda:

- | | | | |
|-----|---------------------------------|-------|--------------|
| (K) | Kresnice | (JVK) | JV IRI 50/16 |
| (X) | CEM II/A-S 42.5 R | (JVD) | JV IRI 50/30 |
| (A) | Antikorodin | (PPV) | PPV |
| F1 | 1. faza = 33 l (9 preskušancev) | | |
| F2 | 2. faza = 23 l (6 preskušancev) | | |

Preglednica 5.13: Sestava preiskovanih betonskih mešanic betona običajne trdnosti z vsebnostjo agregata iz separacije Laže

Oznaka mešanice	NCL	NCL-JVK-0.5%	NCL-JVK-1.0%	NCL-JVK-2.0%				
Vrsta agregata	(L)	(L)	(L)	(L)				
Fini agregat 0-4 [kg/m ³]	895	888	881	868				
Grobi agregat 4-16 [kg/m ³]	865	858	851	838				
Vrsta cementa	(X)	(X)	(X)	(X)				
Količina veziva (C+MS) [kg/m ³]								
Količina mikrosilike [% veziva]								
Vodocementno razmerje	0.52	0.52	0.52	0.52				
Vrsta superplastifikatorja	/	/	/	/				
Količina superplastifikatorja [%]	0	0	0	0				
Vrsta vlaken	/	(JVK)	(JVK)	(JVK)				
Količina vlaken [prost. delež v %]	0	0.5	1.0	2.0				
Prostorninska masa betona [kg]	2368	2393	2419	2470				
$f_{cm,28dni}$ [MPa]	56.85	57.78	55.93	55.00				
Temperatura vode pri $f_{cm,28dni}$ [°C]	19.0	19.0	18.7	17.1				
Temperatura zraka pri $f_{cm,28dni}$ [°C]	22.0	21.0	21.6	20.6				
Oznaka mešanice	NCL		NCL-JVK-0.5%		NCL-JVK-1.0%		NCL-JVK-2.0%	
	F1	F2	F1	F2	F1	F2	F1	F2
Čas priprave mešanice	9:15	10:00	8:00	8:55	9:05	9:55	8:00	8:50
Posed [mm]	140	140	100	110	80	90	55	60
Razlez [mm]	445	440	400	415	350	370	320	325
Temperatura svežega betona [°C]	19.0	19.0	19.8	19.8	18.0	18.0	19.5	19.5
Temperatura zraka pri svežem betonu [°C]	18.6	18.6	19.0	19.1	18.0	18.2	18.3	18.3

Legenda:

- (L) Laže (JVK) JV IRI 50/16
 (X) CEM II/A-S 42.5 R
 F1 1. faza = 33 l (9 preskušancev)
 F2 2. faza = 23 l (6 preskušancev)

Preglednica 5.14: Sestava ponovljenih kontrolnih osnovnih betonskih mešanic betona
običajne in visoke trdnosti

Oznaka mešanice	NC-P	HSC-P
Vrsta agregata	(K)	(K)
Fini agregat 0-4 [kg/m ³]	1054	1138
Grobi agregat 4-16 [kg/m ³]	702	758
Vrsta cementa	(X)	(X)
Količina veziva (C+MS) [kg/m ³]	400	400
Količina mikrosilike [% veziva]	-	10
Vodocementno razmerje	0.52	0.40
Vrsta superplastifikatorja	-	(A)
Količina superplastifikatorja [%]	-	2.05
Vrsta vlaken	-	-
Količina vlaken [prost. delež v %]	-	-
Prostorninska masa betona [kg]	2364	2449
$f_{cm,28dni}$ [MPa]	54.81	83.51
Temperatura vode pri $f_{cm,28dni}$ [°C]	21.1	21.1
Temperatura zraka pri $f_{cm,28dni}$ [°C]	23.9	23.9

Oznaka mešanice	NC-P		HSC-P	
	F1	F2	F1	F2
Čas priprave mešanice	8:20	9:10	8:20	9:10
Posed [mm]	180	180	180	180
Razlez [mm]	510	500	510	500
Temperatura svežega betona [°C]	21.0	20.8	21.0	20.8
Temperatura zraka pri svežem betonu [°C]	21.0	21.0	21.0	21.0

Legenda:

- | | | |
|----------------------|----|---------------------------------|
| (K) Kresnice | F1 | 1. faza = 33 l (9 preskušancev) |
| (X) CEM II/A-S 42.5R | F2 | 2. faza = 23 l (6 preskušancev) |
| (A) Antikorodin | | |

5.3 Časovni razvoj tlačne trdnosti betona

Enoosno tlačno trdnost betonov smo merili na betonskih kockah dimenzij 15 × 15 × 15 cm s pomočjo elektromehaničnega preskuševalnega stroja za statične tlačne preiskave kapacitete 5000 kN. Pri tem smo bili pozorni, da je hitrost tlačnega obremenjevanja s časom konstantno

naraščala. Vrednosti tlačne trdnosti betonov smo merili pri starosti preskušancev 1 dan, 3, 7, 28 in 90 dni. Pri vsaki mešanici določene starosti smo preverili tlačno trdnost treh naključnih preskušancev (dva preskušanca iz prve faze in enega iz druge faze ali obratno) in tako dobili dokaj natančen potek časovnega razvoja tlačne trdnosti betonov.

5.4 Rezultati in analiza razvoja tlačne trdnosti vlaknastih betonov

V nadaljevanju si oglejmo rezultate časovnega poteka enoosne tlačne trdnosti šestnajstih različnih betonskih mešanic. V analizi časovnega razvoja tlačne trdnosti betona smo zajeli vpliv vrste betona, vrste in količine vlaken ter vpliv vrste agregata. Zaradi kontrole in vpliva zunanje temperature na začetni razvoj tlačne trdnosti betona sta bili naknadno ponovljeni še osnovni mešanici betonov običajne in visoke trdnosti. Poleg tega smo uporabili še mešanico, z drugačno granulometrijsko sestavo, za analizo vpliva vlažnosti betonskega preskušanca na merjenje tlačne trdnosti. Tako skupno dobimo devetnajst različnih mešanic. Tlačna trdnost betona v diagramih, v nadaljevanju, predstavlja povprečno vrednost treh izmerjenih tlačnih trdnosti enakega betona. V preglednici 5.15 so za osemnajst različnih betonskih mešanic in za pet različnih starosti betonov podane povprečne vrednosti tlačnih trdnosti izmerjene na treh preskušancih enakega betona in njihove pripadajoče standardne deviacije.

Preglednica 5.15: Povprečne tlačne trdnosti betonov v MPa pri različnih starostih in pripadajoče standardne deviacije

Mešanica	Starost betona				
	Povprečna tlačna trdnost betona v MPa				
	Število preskušancev				
	Standardna deviacija v MPa				
	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni	90 dni
NC	10.37	31.30	42.41	56.67	65.37
	3	3	3	3	3
	0.32	0.32	2.51	1.11	4.32
NC-JVK-0.5%	13.33	32.04	41.48	55.56	62.96
	3	3	3	3	3
	0.00	0.85	0.64	0.00	1.70
NC-JVD-0.5%	14.26	32.96	44.63	54.81	59.63
	3	3	3	3	3
	0.32	0.64	0.64	1.70	3.94
NC-PPV-0.5%	13.33	30.56	39.81	49.26	56.48
	3	3	3	3	3
	0.00	1.47	0.32	0.64	1.79
NC-JVK-1.0%	11.11	30.56	42.78	56.11	65.56
	3	3	3	3	3
	0.00	0.56	0.56	1.11	0.56
NC-JVK-2.0%	11.67	31.30	40.93	54.07	62.04
	3	3	3	3	3
	0.00	0.32	0.32	0.85	2.10
HSC	18.15	56.48	67.41	89.07	90.37
	3	3	3	3	3
	0.32	0.32	3.06	5.78	2.80
HSC-JVK-0.5%	20.00	52.04	63.70	86.30	100.56
	3	3	3	3	2
	0.00	0.64	0.85	0.85	3.93
HSC-JVD-0.5%	23.52	53.33	62.96	81.30	85.93
	3	3	3	3	3
	0.32	0.56	2.10	1.40	2.31
HSC-PPV-0.5%	20.37	58.33	74.26	91.11	97.41
	3	3	3	3	3
	0.85	1.92	0.64	1.47	3.26
HSC-JVK-1.0%	26.11	61.44	72.22	93.70	100.37
	3	3	3	3	3
	1.47	0.29	0.96	2.31	0.64
HSC-JVK-2.0%	30.74	61.30	73.70	94.81	102.96
	3	3	3	3	3
	0.32	1.16	2.57	4.52	1.16

»se nadaljuje...«

»...nadaljevanje«

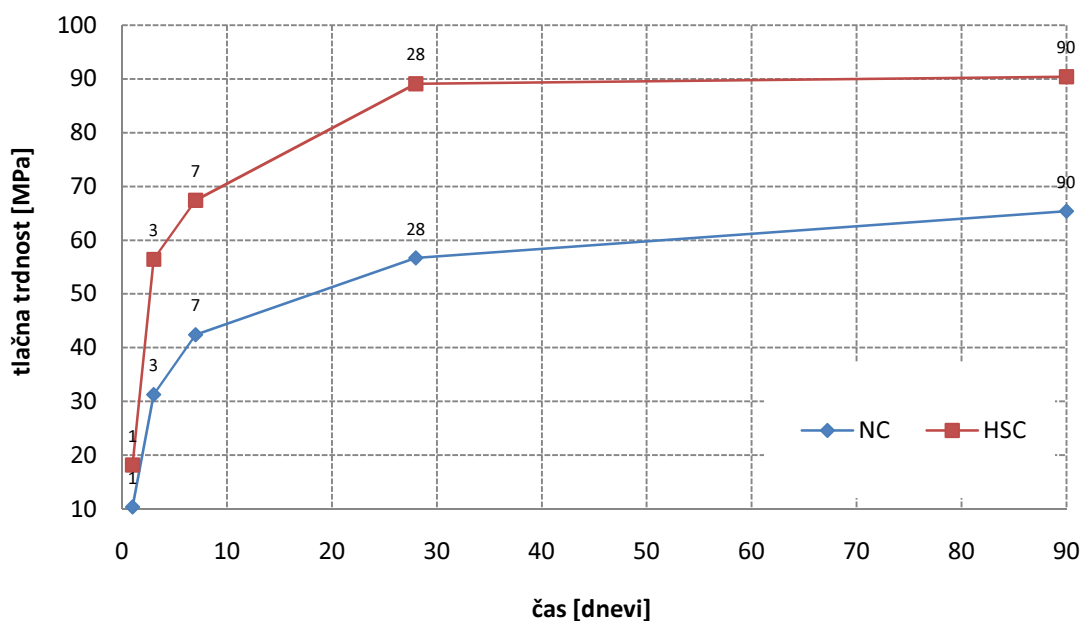
Mešanica	Starost betona				
	Povprečna tlačna trdnost betona v MPa				
	Število preskušancev				
	Standardna deviacija v MPa				
	1 dan	3 dni	7 dni	28 dni	90 dni
NCL	14.26	33.89	45.74	56.85	63.52
	3	3	3	3	3
	0.32	0.56	1.16	3.06	0.32
NCL-JVK-0.5%	15.93	35.19	43.89	57.78	63.89
	3	3	3	3	3
	0.64	0.64	2.42	0.56	1.92
NCL-JVK-1.0%	12.04	32.78	42.78	55.93	60.74
	3	3	3	3	3
	0.32	0.56	1.11	1.16	0.85
NCL-JVK-2.0%	15.19	33.89	43.89	55.00	60.93
	3	3	3	3	3
	0.85	0.00	0.56	0.96	0.85
NC-P	14.07	34.26	41.11	54.81	60.56
	3	3	3	3	3
	0.32	0.64	2.94	0.64	1.12
HSC-P	27.22	54.44	67.27	83.52	89.26
	3	3	3	3	3
	1.11	0.00	2.22	2.85	1.70

5.4.1 Vpliv vrste betona na časovni razvoj tlačne trdnosti betona

Raziskave temeljijo na dveh osnovnih betonskih mešanicah z oznakama NC in HSC, ki smo jim dodajali tako različne količine kot različne vrste vlaken. Mešanica z oznako NC ima vodocementno razmerje 0.52, HSC pa ima vodocementno razmerje 0.40 in vodovezivno 0.36.

Slika 5.3 prikazuje časovni potek tlačne trdnosti betonov z oznakama NC in HSC. Razvidno je, da beton z oznako HSC v prvih treh dneh hitreje pridobiva na trdnosti kot beton z oznako NC. Pri starosti betona 1 dan je bila tlačna trdnost betona HSC 1.75-krat, pri starosti 3 dni pa 1.80-krat tolikšna kot tlačna trdnost betona NC. Kasneje je razmerje tlačnih trdnosti manjše. Pri starosti betona 7 dni je bilo razmerje tlačnih trdnosti 1.59, pri starosti 28 dni 1.57 in pri starosti 90 dni le še 1.38. Sklepamo lahko, da nastane razlika v tlačni trdnosti med običajnim in visoko trdnim betonom v začetnem obdobju staranja, ko je proces hidratacije najintenzivnejši.

Pomemben parameter, ki vpliva na tlačno trdnost betona, je vodovezivno razmerje sveže betonske mešanice. Nizko vodovezivno razmerje pri betonih visoke trdnosti zagotavlja znatno manjšo poroznost otrdelega betona v primerjavi z betonom običajne trdnosti. Pri procesu hidratacije se v betonu z nizkim vodovezivnim razmerjem porabi večji del vode. Ker je struktura betona visoke trdnosti bolj homogena in manj porozna, zaradi manjše vsebnosti vode, je tlačna trdnost takšnega betona v primerjavi z betonom običajne trdnosti, ki ima relativno visoko vodovezivno razmerje, bistveno večja (Saje, 2001).



Slika 5.3: Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov NC in HSC

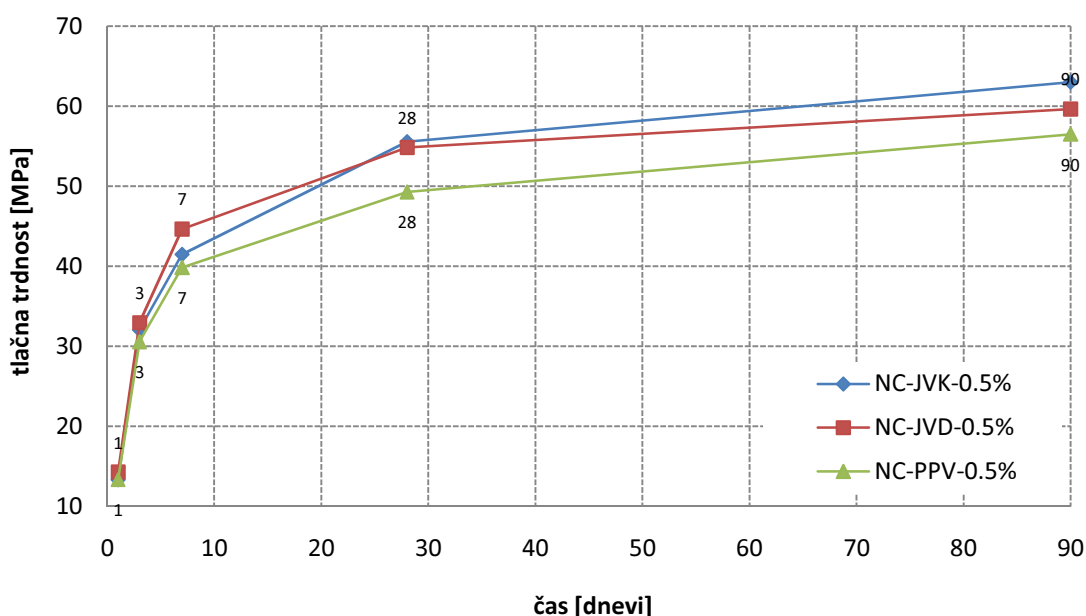
5.4.2 Vpliv vlaken na časovni razvoj tlačne trdnosti betonov

Razvoj tlačne trdnosti osnovnih mešanic smo podali v poglavju 5.4.1. V nadaljevanju predstavljamo analizo vpliva vlaken na časovni razvoj tlačne trdnosti vlaknastih betonov. Osnovni mešanici označeni z NC in HSC sta nam služili kot primerljivi mešanici betonskim mešanicam z različnimi vrstami in vsebnostmi vlaken. Uporabili smo krajša in daljša jeklena ter polipropilenska vlakna. Prostorninski deleži vlaken v obravnavanih betonih so bili 0.5, 1.0 in 2.0%.

V poglavju 5.4.2.1 predstavljamo analizo vpliva vrste vlaken, v poglavju 5.4.2.2 pa količine vlaken na časovni razvoj tlačne trdnosti vlaknastih betonov običajne in visoke trdnosti.

5.4.2.1 Vpliv vrste vlaken na časovni razvoj tlačne trdnosti betona

Slika 5.4 prikazuje časovni razvoj tlačne trdnosti treh betonov običajne trdnosti z oznakami NC-JVK-0.5%, NC-JVD-0.5% in NC-PPV-0.5%, z vodovezivnim razmerjem 0.52 in prostorninskim deležem vlaken 0.5%. Mešanice se razlikujejo le po vrsti vlaken (JVK, JVD, PPV), ki smo jih uporabili za analizo časovnega razvoja tlačne trdnosti betona.

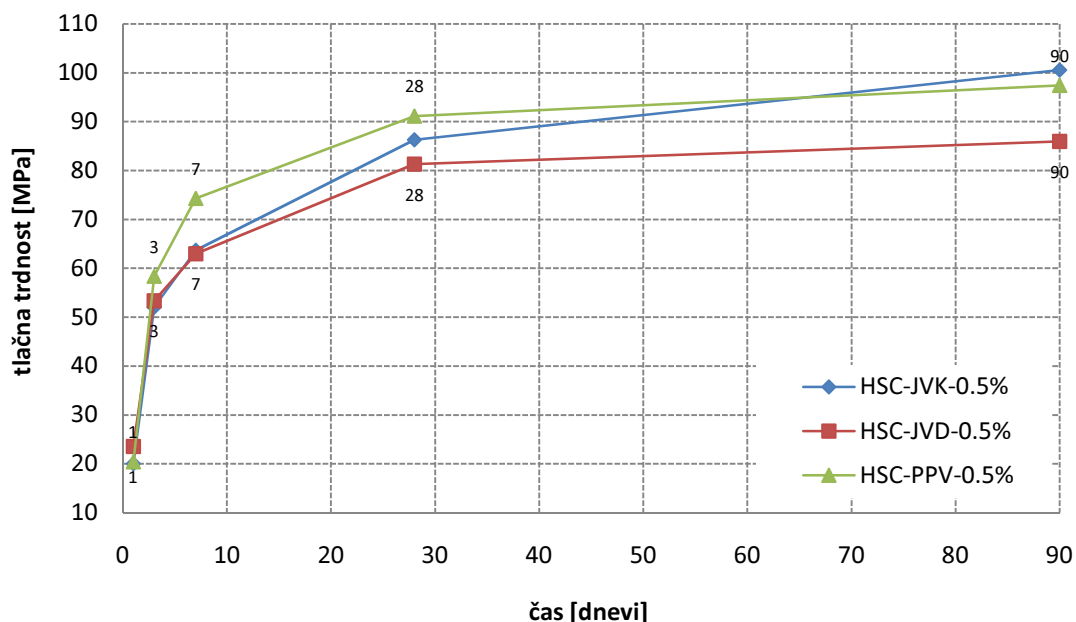


Slika 5.4: Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov NC-JVK-0.5%, NC-JVD-0.5% in NC-PPV-0.5%

Iz slike 5.4 je razvidno, da je bila tlačna trdnost betona s PPV v celotnem časovnem obdobju nižja kot tlačna trdnost betonov z JV (JVK, JVD). Predvidevamo, da so PPV v času priprave mešanice zadržala del vode. V procesu hidratacije je hidratiziral manjši delež cementa, ostala so zrna nehidratiziranega cementa, kar je vplivalo na tlačno trdnost betona. Betona z JV sta v prvih treh dneh enakomerno pridobivala na trdnosti, ker interakcija med cementnim kamnom in JV še ni prišla do izraza. Prve opazne razlike so razvidne pri 7-ih dneh. Betoni z JVD so imeli višjo tlačno trdnost kot betoni z JVK, zaradi večje sprijemne sile med cementnim

kamnom in jeklenimi vlakni. Pri JVD je potrebna večja sila za porušitev stika med vlakni in cementnim kamnom kot pri JVK. Pri starosti betona 28 dni sta tlačni trdnosti primerljivih betonov z JVK in JVD praktično enaki. Nekoliko višjo tlačno trdnost imajo betoni z JVK. Predvidevamo, da imajo betoni z JVK, ker je večji del hidratacije v tem času že izveden, bolj homogeno makrostrukturo, jeklena vlakna so se lepše porazdelila med zrnji agregata. Ker vlakna premoščajo razpoke in praznine, ima preskušavec manj oslabitev. Napetosti se bolj enakomerno porazdelijo po preskušancu, kar se odraža v višji tlačni trdnosti betona. S staranjem betona se, zaradi povečevanja tlačne trdnosti cementnega kamna in povečevanja sprijemne sile med cementnim kamnom in jeklenimi vlakni, razlika med tlačnimi trdnostmi betonov povečuje v prid betona z vsebnostjo JVK.

Na sliki 5.5 je prikazan časovni razvoj tlačne trdnosti treh betonov visoke trdnosti z oznakami HSC-JVK-0.5%, HSC-JVD-0.5% in HSC-PPV-0.5%, z vodovezivnim razmerjem 0.36 in prostorninskim deležem vlaken 0.5%. Mešanice se razlikujejo le po vrsti vlaken (JVK, JVD, PPV), ki smo jih uporabili za analizo časovnega razvoja tlačne trdnosti betona.



Slika 5.5: Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov HSC-JVK-0.5%, HSC-JVD-0.5% in HSC-PPV-0.5%

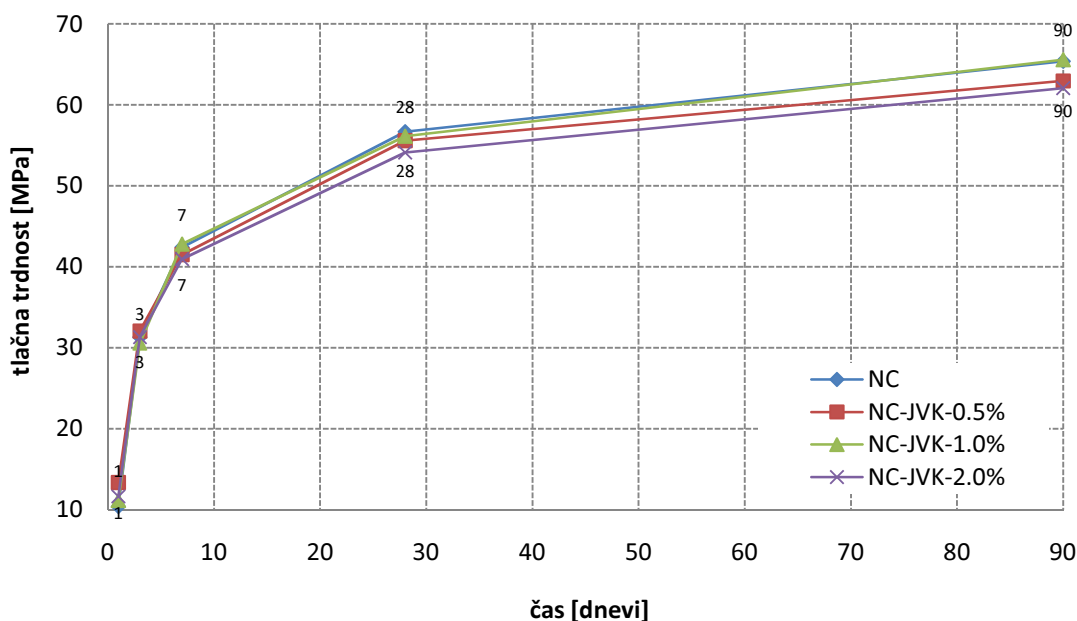
Iz slike 5.5 je razvidno, da je najvišjo tlačno trdnost v prvih 28-ih dneh dosegel beton z oznako HSC-PPV-0.5% in vrsto vlaken - PPV, kar je ravno obratno kot pri betonih običajne trdnosti. Medtem ko sta HSC-JVK-0.5% in HSC-JVD-0.5% v prvih 7-ih dneh izkazovala dokaj podoben prirast tlačne trdnosti betona, je predvsem med tretjim in sedmim dnevom na tlačni trdnosti veliko več pridobil beton z oznako HSC-PPV-0.5%. Predvidevamo, da se je določena količina vode pri pripravi betonske mešanice zadržala v PPV. Po porabi proste vode je proces hidratacije, z vodo ujeto v vlakna, potekal bolj neovirano kot pri porabi vode iz finih kapilarnih por. Pri starosti betona 7 dni je bila tlačna trdnost betona HSC-PPV-0.5% 1.18-krat tolikšna kot tlačna trdnost ostalih dveh betonov (HSC-JVK-0.5% in HSC-JVD-0.5%), ki sta imela praktično enaki tlačni trdnosti. S časom se je razmerje med HSC-PPV-0.5% in HSC-JVD-0.5% le rahlo zmanjšalo, pri starosti 28 dni je bilo 1.12, pri 90-ih dneh pa 1.13. Opazno pa se je v omenjenem časovnem obdobju spreminjalo razmerje tlačnih trdnosti med betonoma HSC-JVK-0.5% in HSC-PPV-0.5%. Betonu HSC-JVK-0.5% je v tem času tlačna trdnost naraščala hitreje kot betonoma HSC-PPV-0.5% in HSC-JVD-0.5%. Pri starosti betona 28 dni je bila tlačna trdnost betona HSC-PPV-0.5% 1.06-krat tolikšna kot tlačna trdnost betona HSC-JVK-0.5%, pri starosti 90 dni pa se je razmerje tlačnih trdnosti že obrnilo in je bila tlačna trdnost betona HSC-JVK-0.5% 1.03-krat tolikšna kot tlačna trdnost betona HSC-PPV-0.5%. Predvidevamo, da je vzrok hitrejšemu pridobivanju tlačne trdnosti betona HSC-JVK-0.5% od sedmega dne v strukturi betona. JVK se bolj enakomerno porazdelijo med zrna agregata. Homogenejši preskušanelec prevzame večje obremenitve.

5.4.2.2 Vpliv količine vlaken na časovni razvoj tlačne trdnosti betona

Analizirali smo betone običajne in visoke trdnosti z različnimi prostorninskimi deleži JVK (0.5, 1.0, 2.0%).

Slika 5.6 prikazuje časovni razvoj tlačne trdnosti štirih betonov običajne trdnosti z oznakami NC, NC-JVK-0.5%, NC-JVK-1.0% in NC-JVK-2.0%. Vodovezivno razmerje teh betonov je 0.52. Iz slike 5.6 lahko razberemo, da so betoni v prvih 7-ih dneh dosegali približno enake vrednosti tlačnih trdnosti. Razmerja med tlačnimi trdnostmi posameznih betonov se vse do 90-ih dni praktično niso spreminjale. V celotnem časovnem obdobju, od tretjega dne dalje, je najvišjo tlačno trdnost dosegal beton z oznako NC, medtem ko je v enakem časovnem

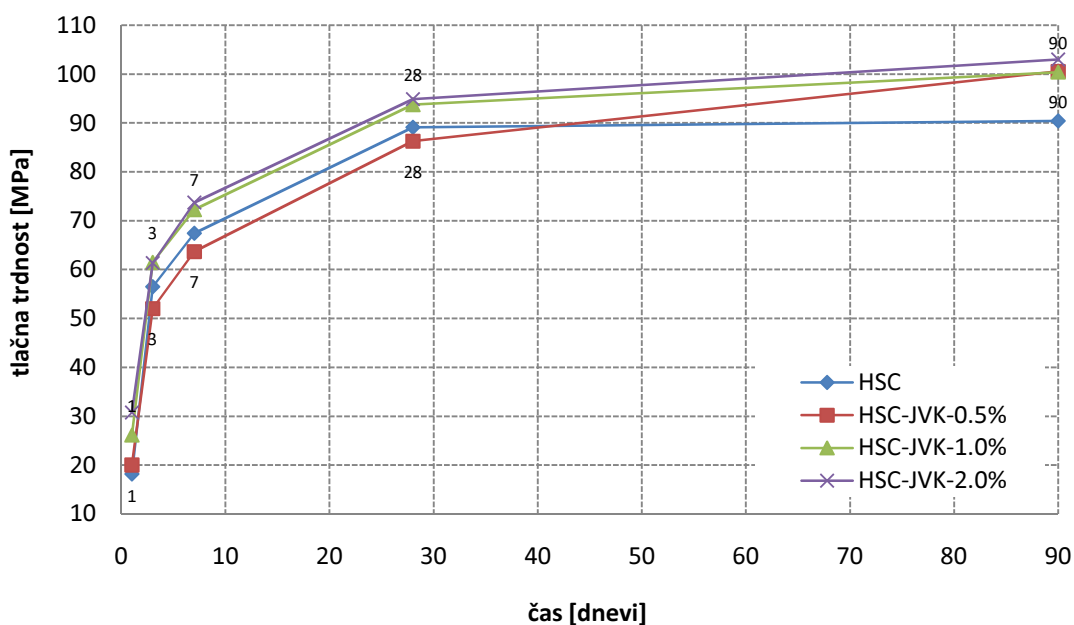
obdobju najnižjo tlačno trdnost izkazoval beton z oznako NC-JVK-2.0%. Predvidevamo, da je beton z deležem vlaken 2.0% dosegel najnižjo tlačno trdnost zaradi pojava gnezd. Verjetnost tega pojava je pri betonih z manjšo količino vlaken ali brez njih manjša. Oslabitev lahko povzroči tudi vibriranje preskušanca, ker se vlakna zaradi delovanja gravitacije postavijo v horizontalno stabilno lego, kar privede do anizotropnega obnašanja preskušanca pri preskusu tlačne obremenitve.



Slika 5.6: Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov NC, NC-JVK-0.5%, NC-JVK-1.0% in NC-JVK-2.0%

Slika 5.7 prikazuje časovni razvoj tlačne trdnosti štirih betonov visoke trdnosti z oznakami HSC, HSC-JVK-0.5%, HSC-JVK-1.0% in HSC-JVK-2.0% in z vodovezivnim razmerjem 0.36. V betonu z oznako HSC-JVK-0.5% se je, po približno enaki začetni vrednosti tlačne trdnosti kot pri betonu HSC, prvih 28 dni hitrost naraščanja tlačne trdnosti odvijala najpočasneje in je v tem časovnem obdobju izkazoval najnižjo tlačno trdnost. Pri starosti 90 dni pa se je tlačna trdnost betona HSC-JVK-0.5% povzpela nad tlačno trdnost betona HSC in se skoraj približala tlačnima trdnostnima ostalih dveh vlaknastih betonov. Beton z oznako HSC-JVK-1.0% je pri starosti 1 dan imel 1.44-krat tolikšno tlačno trdnost kot beton HSC. Razmerje tlačne trdnosti se je pri starosti 3 dni spustilo na okoli 1.10 in se ohranilo do 90-ih

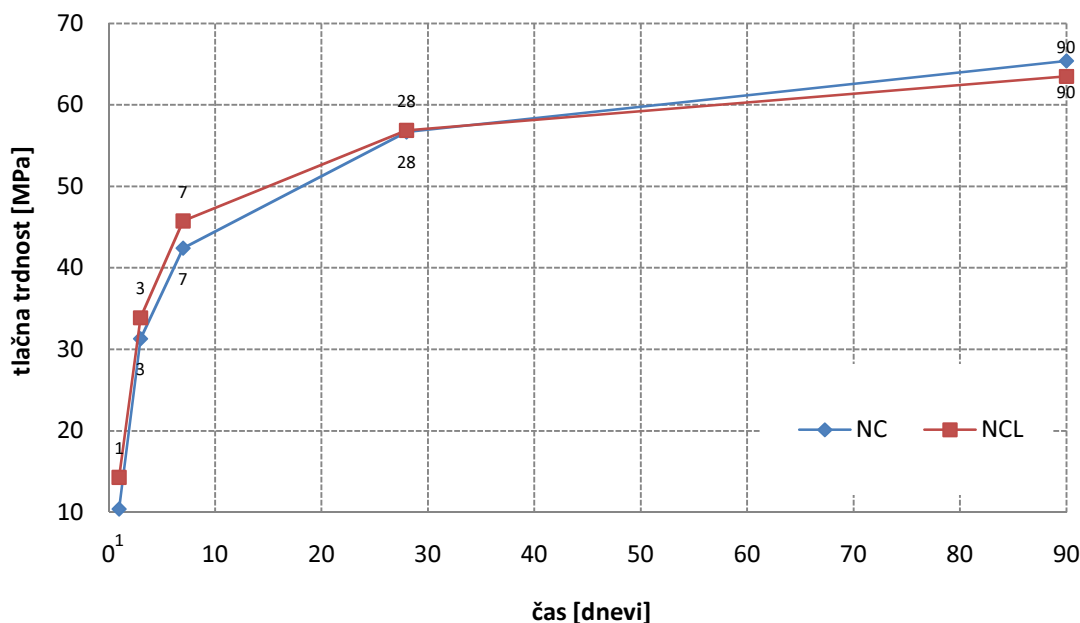
dni. Pri betonu z oznako HSC-JVK-2.0% je časovni potek tlačne trdnosti podoben poteku tlačne trdnosti betona z oznako HSC-JVK-1.0%, le da je ta v prvem dnevu starosti izkazoval 1.69-krat kolikšno tlačno trdnost kot beton HSC, pri 90-ih dneh pa 1.14. Predvidevamo, da v primeru dodajanja mikrosilike in superplastifikatorja v betonsko mešanico dosežemo višje tlačne trdnosti betonov zato, ker se izboljša stik med cementnim kamnom in jeklenimi vlakni. Iz slike 5.7 lahko razberemo, da so betoni z vsebnostjo jeklenih vlaken dosegali višje tlačne trdnosti kot primeljivi beton brez vlaken.



Slika 5.7: Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov HSC, HSC-JVK-0.5%, HSC-JVK-1.0% in HSC-JVK-2.0%

5.4.3 Vpliv vrste agregata na časovni razvoj tlačne trdnosti betona

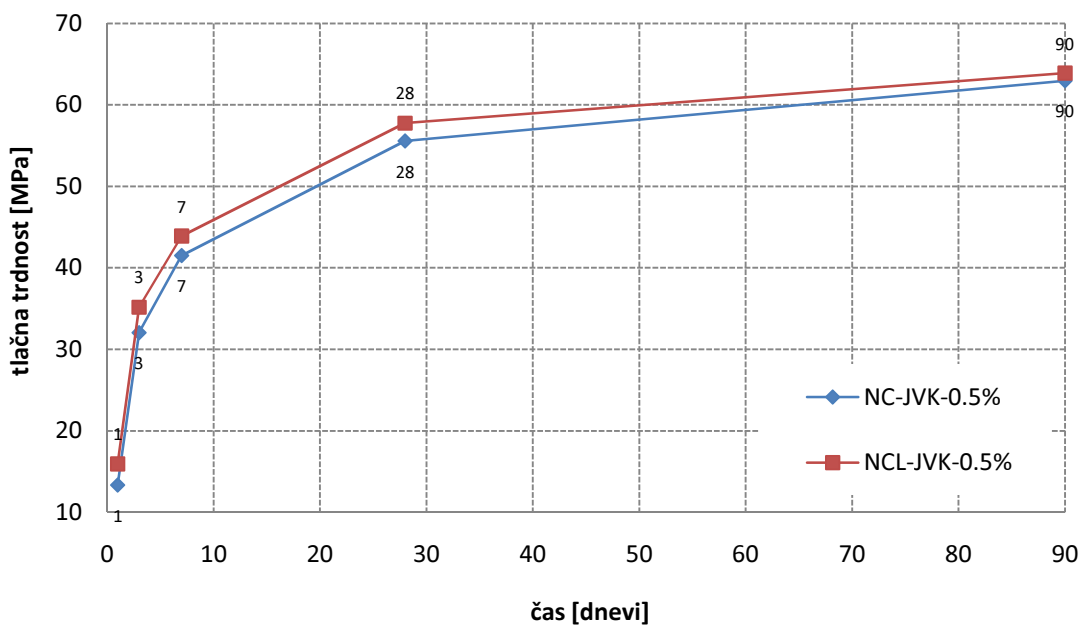
Za analizo vpliva agregata na časovni razvoj tlačne trdnosti betona smo uporabili mešanici, ki sta bili pripravljene iz dveh različnih agregatov. Prvi agregat, ki smo ga uporabili za pripravo sklopa mešanic z oznako NC, je bil iz kamnoloma Kresnice, drugi, kateremu pripada sklop mešanic z oznako NCL, pa iz kamnoloma Laže. Uporabljena agregata sta apnenca, sedimentnega izvora, s približno enakima granometrijskima krivuljama in podobno mineraloško-kemijsko sestavo.



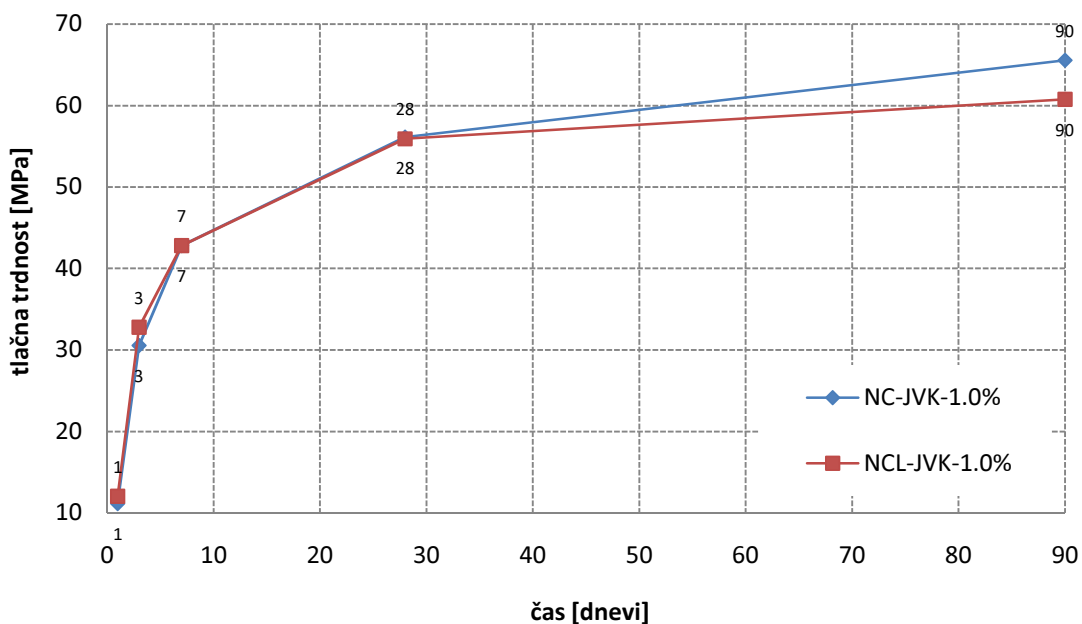
Slika 5.8: Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov NC in NCL

Na sliki 5.8 je prikazan časovni razvoj tlačne trdnosti dveh betonov običajne trdnosti z oznakami NC in NCL. V prvih 28-ih dneh starosti ima beton z oznako NCL nekoliko večjo tlačno trdnost kot beton z oznako NC. Pri starosti 1 dan je tlačna trdnost betona NCL 1.37-krat tolikšna kot tlačna trdnost betona NC. Razmerje tlačnih trdnosti se pri starosti betona 3 dni nekoliko zniža, na 1.08 in se ohrani do sedmega dne. Pri starosti betona 28 dni je tlačna trdnost betona NCL približno enaka tlačni trdnosti betona NC. Med 28. in 90. dnevom starosti betona se krivulja tlačnih trdnosti betona NC povzpne nad krivuljo tlačne trdnosti betona NCL. Pri starosti betona 90 dni je tlačna trdnost betona NC 1.03-krat tolikšna kot tlačna trdnost betona NCL.

Slika 5.9 prikazuje časovni razvoj tlačne trdnosti dveh betonov običajne trdnosti z oznakami NC-JVK-0.5% in NCL-JVK-0.5%. Betona vsebujeta prostorninski delež JVK 0.5%. Beton z oznako NCL-JVK-0.5% na celotnem časovnem intervalu izkazuje nekoliko višjo tlačno trdnost kot beton z oznako NC-JVK-0.5%. Pri starosti betona 1 dan je razmerje med tlačnimi trdnostmi omenjenih betonov 1.19. Razmerje tlačne trdnosti se s časom postopoma znižuje. Pri starosti betona 3 dni je 1.10, pri 7-ih dneh 1.06, pri 28-ih dneh 1.04 in pri 90-ih dneh le še 1.01.



Slika 5.9: Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov NC-JVK-0.5% in NCL-JVK-0.5%

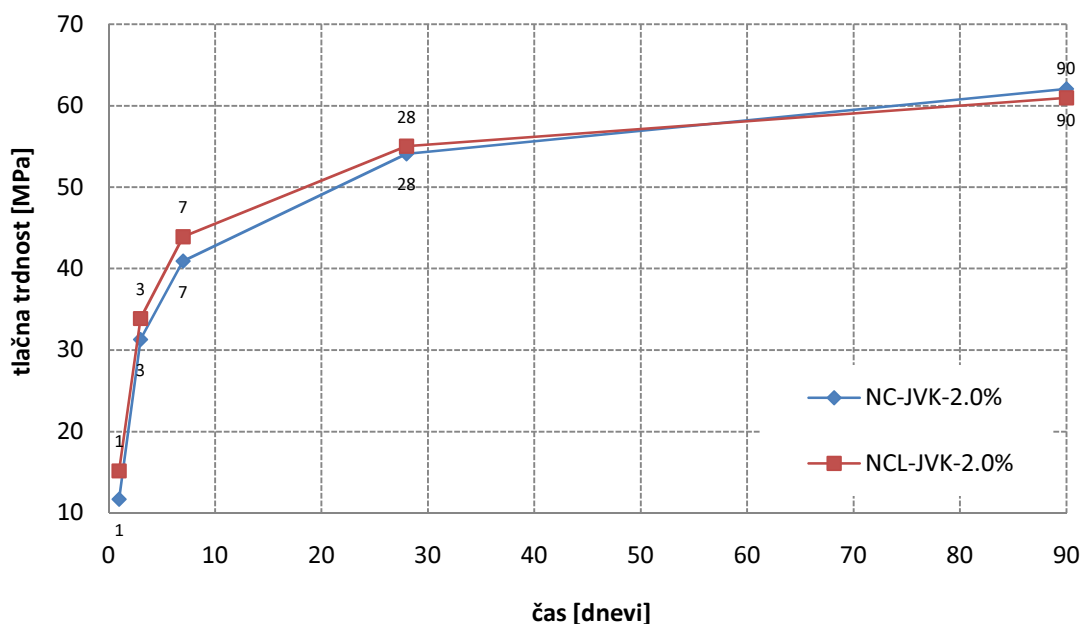


Slika 5.10: Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov NC-JVK-1.0% in NCL-JVK-1.0%

Slika 5.10 prikazuje časovni razvoj tlačne trdnosti dveh betonov običajne trdnosti z oznakami NC-JVK-1.0% in NCL-JVK-1.0%. Betona vsebujeta prostorninski delež JVK 1.0% in se obnašata dokaj podobno kot betona s prostorninskim delež vlaken 0.5%. Beton z oznako

NCL-JVK-1.0% ima pri starosti 1 dan nekoliko večjo tlačno trdnost kot beton z oznako NC-JVK-1.0%, vendar pa s časom izgublja na tlačni trdnosti in sta tlačni trdnosti pri starosti betona 28 dni približno enaki. Pri starosti betona 90 dni je tlačna trdnost betona z oznako NC-JVK-1.0% 1.08-krat tolikšna kot je tlačna trdnost betona NCL-JVK-1.0%.

Na sliki 5.11 je prikazan časovni razvoj tlačne trdnosti dveh betonov običajne trdnosti z oznakami NC-JVK-2.0% in NCL-JVK-2.0%. Betona vsebujeta prostorninski delež JVK 2.0%. Tudi v tem primeru opazimo, da je beton z vsebnostjo agregata iz kamnoloma Laže (NCL-JVK-2.0%) v začetku izkazoval višjo tlačno trdnost in je bila ta 1.30 krat tolikšna kot tlačna trdnost betona z vsebnostjo agregata iz kamnoloma Kresnice (NC-JVK-2.0%). S časom se je razmerje tlačnih trdnosti nižalo in je pri starosti betona 90 dni izkazoval višjo tlačno trdnost beton z oznako NC-JVK-2.0%. Ta je bila za 1.02-krat tolikšna kot tlačna trdnost betona z oznako NCL-JVK-2.0%.



Slika 5.11: Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov NC-JVK-2.0% in NCL-JVK-2.0%

Opazili smo, da so betoni z vsebnostjo agregata iz kamnoloma Laže (z oznako NCL) imeli v začetku višjo tlačno trdnost, vendar pa s časom ni naraščala tako hitro kot pri betonih z vsebnostjo agregata iz kamnoloma Kresnice (z oznako NC). Vzrok temu je lahko višja

začetna temperatura prostora in zato višja temperatura sveže betonske mešanice z vsebnostjo agregata iz kamnoloma Laže, in temperatura vode v času negovanja preskušancev. Temperature prostora pri pripravi betonskih mešanic iz različnih agregatov in pri preskusu tlačne trdnosti preskušancev so podane v preglednici 5.16. Vpliv temperature prostora, mešanice in vode, v kateri so hranjeni preskušanci, na časovni razvoj tlačne trdnosti betona je analiziran v poglavju 5.4.4.

Preglednica 5.16: Izmerjene temperature pri preskusu tlačnih trdnosti betonov
NC in NCL

Mešanica	Temperatura pri preskusu tlačne trdnosti [°C]								
	1 dan	3 dni		7 dni		28 dni		90 dni	
	(Z)	(Z)	(V)	(Z)	(V)	(Z)	(V)	(Z)	(V)
NC	15.8	15.3	13.3	16.8	14.0	19.1	17.0	23.6	20.8
NC-JVK-0.5%	15.7	15.2	13.4	15.6	13.5	16.6	13.6	20.0	18.5
NC-JVK-1.0%	18.6	18.6	16.4	18.6	16.1	18.7	16.6	21.8	20.2
NC-JVK-2.0%	18.7	19.1	17.0	19.6	16.6	20.6	17.8	21.2	19.9
NCL	19.0	18.2	15.7	19.1	16.5	22.0	19.0	23.8	22.0
NCL-JVK-0.5%	18.3	20.2	15.7	19.1	16.5	21.0	19.0	23.8	22.0
NCL-JVK-1.0%	18.7	19.1	16.5	20.6	16.6	21.6	18.7	25.5	23.6
NCL-JVK-2.0%	19.1	19.5	16.4	20.4	17.4	20.6	17.1	26.3	24.5

Legenda:

- (Z) temperatura laboratorija – zraka [°C]
- (V) temperatura vode [°C]

Na podlagi rezultatov preiskav lahko sklepamo, da vpliv vrste uporabljenega agregata nima velikega vpliva na velikost tlačne trdnosti betona. Agregat iz kamnoloma Kresnice je bil predhodno opran in ni vseboval praškastih delcev na površini zrn, zato je bil stik cementnega kamna in agregata boljši in so betoni dosegali podobne vrednosti tlačnih trdnosti, kot primerljivi betoni z agregatom iz trdnejše kamnine iz kamnoloma Laže.

5.4.4 Vpliv različnih zunanjih temperatur pri pripravi betonskih mešanic na časovni razvoj tlačne trdnosti betona

Glede na obsežnost raziskav, ki so trajale več mesecev, je bilo v laboratoriju praktično nemogoče zagotoviti konstantne klimatske pogoje. Analizirali smo vpliv temperature prostora pri pripravi betonske mešanice na časovni razvoj tlačne trdnosti betona običajne in visoke trdnosti, brez vsebnosti vlaken.

Betona z oznako NC in HSC sta bila zamešana v začetku januarja. Prvi (NC) je bil zamešan pri povprečni temperaturi laboratorija 16.95°C in je imela sveža betonska mešanica povprečno temperaturo 17.00°C , medtem ko je bil drugi (HSC), zamešan pri povprečni temperaturi laboratorija 15.40°C in je imela sveža betonska mešanica povprečno temperaturo 16.90°C .

Zaradi analize vpliva temperature na časovni razvoj tlačne trdnosti betona smo izvedli ponovitvi osnovnih mešanic v mesecu marcu in mešanici označili z oznakama NC-P in HSC-P. Mešanica NC-P je bila ponovno zamešana pri povprečni temperaturi laboratorija 21.00°C in je imela sveža betonska mešanica povprečno temperaturo 20.90°C medtem, ko je bila betonska mešanica HSC-P ponovno zamešana pri povprečni temperaturi laboratorija 21.65°C in je imela sveža betonska mešanica povprečno temperaturo 21.45°C . Tako je bila betonska mešanica NC-P zamešana pri 4.05°C višji temperaturi laboratorija in je imela sveža betonska mešanica za 3.90°C višjo temperaturo kot betonska mešanica NC. Betonska mešanica HSC-P pa je bila zamešana pri 6.25°C višji temperaturi laboratorija in je imela sveža betonska mešanica za 4.55°C višjo temperaturo kot mešanica HSC.

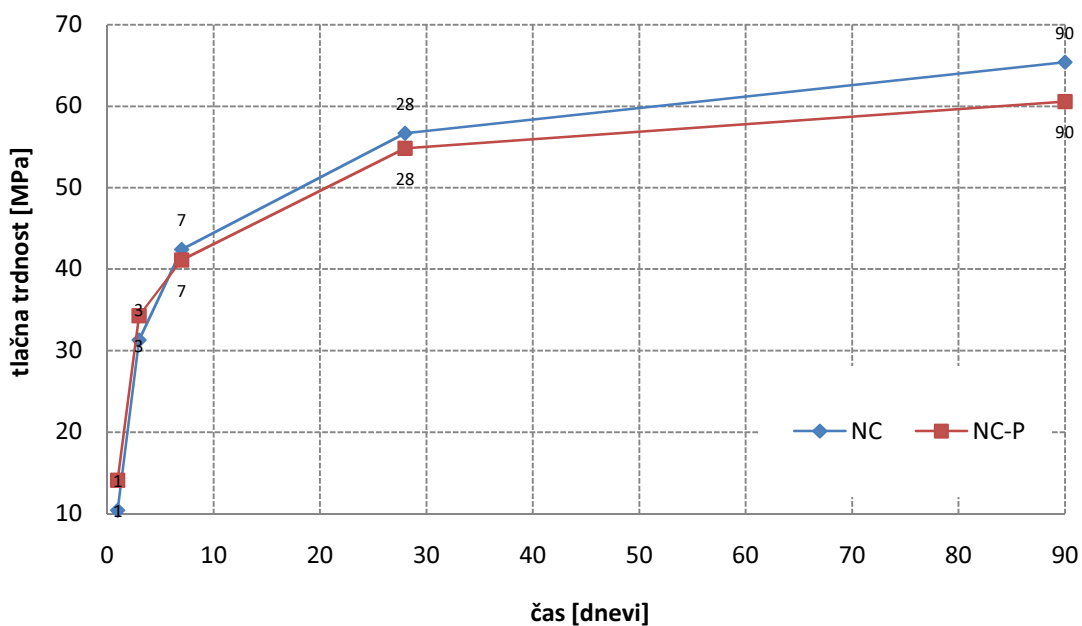
Izmerjene temperature pri preskusih tlačnih trdnosti osnovnih (NC, HSC) in ponovitvenih (NC-P, HSC-P) betonskih mešanic so podane v preglednici 5.16.

Preglednica 5.17: Izmerjene temperature pri preskusu tlačne trdnosti betona NC, HSC, NC-P in HSC-P

Mešanica	Temperatura pri preskusu tlačne trdnosti [°C]									
	1 dan		3 dni		7 dni		28 dni		90 dni	
	(Z)	(V)	(Z)	(V)	(Z)	(V)	(Z)	(V)	(Z)	(V)
NC	15.8	15.3	13.3	16.8	14.0	19.1	17.0	23.6	20.8	
HSC	15.4	17.0	14.0	18.2	15.0	19.3	16.8	23.9	21.1	
NC-P	20.8	21.5	19.2	20.6	17.1	23.9	21.1	22.5	21.6	
HSC-P	21.5	21.6	18.7	20.0	17.8	23.9	21.1	22.5	21.6	

Legenda:

- (Z) temperatura laboratorija – zraka [°C]
- (V) temperatura vode [°C]

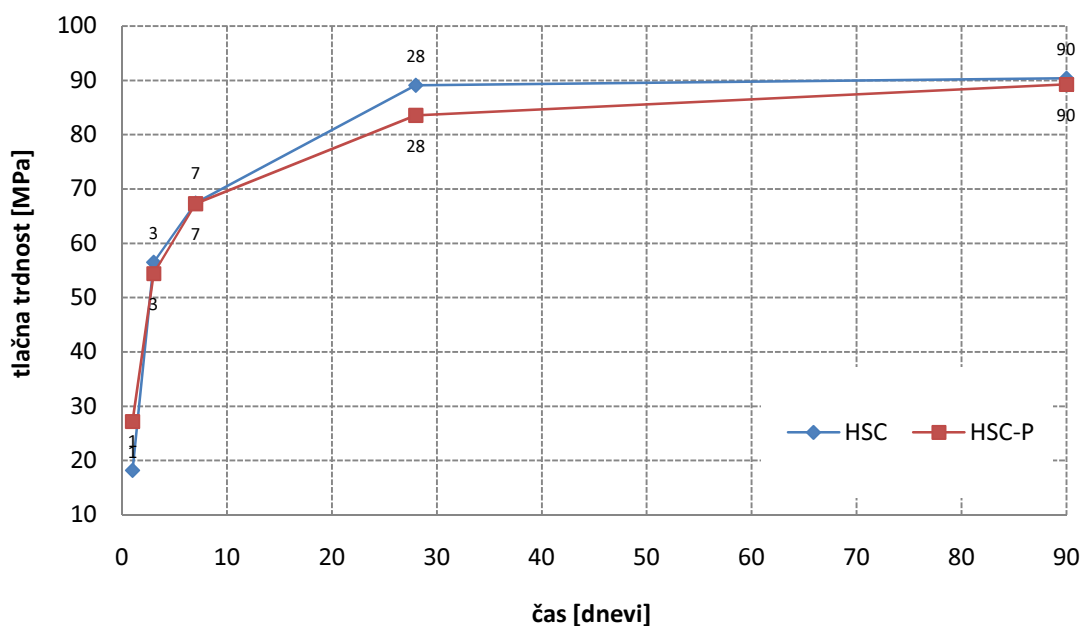


Slika 5.12: Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov NC in NC-P

Na sliki 5.12 je prikazan časovni razvoj tlačne trdnosti dveh betonskih mešanic običajne trdnosti z oznakama NC in NC-P. Tlačna trdnost betona NC-P je bila do tretjega dne višja od tlačne trdnosti betona NC. Prvi dan je bila 1.36-krat tolikšna in tretji dan pa 1.09-krat. Pri starosti betona 7 dni se je razmerje obrnilo in je tlačna trdnost betona NC presegala tlačno

trdnost betona NC-P za 1.03-krat. To razmerje se je obdržalo do 28. dne. Pri starosti betona 90 dni je bila tlačna trdnost betona NC 1.08-krat višja kot tlačna trdnost betona NC-P.

Slika 5.13 prikazuje časovni razvoj tlačne trdnosti dveh betonskih mešanic visoke trdnosti z oznakama HSC in HSC-P. Podobno kot pri betonu običajne trdnosti opazimo, da je tlačna trdnost betona HSC-P v prvem dnevu starosti za 1.50-krat višja kot tlačna trdnost betona HSC. Vendar se razmerje tlačnih trdnosti spremeni že pri tretjem dnevu starosti, saj se razmerje obrne v prid betonu HSC, ki ima 1.04-krat višjo tlačno trdnost kot beton HSC-P. Razmerje tlačne trdnosti se nekoliko zmanjša in pri starosti betona 7 dni skoraj enako ena. Pri starosti 28 dni se razmerje spet poveča in je enako 1.07. Pri starosti 90 dni je tlačna trdnost betona HSC 1.01-krat tolikšna kot tlačna trdnost betona HSC-P.



Slika 5.13: Časovni razvoj tlačne trdnosti betonov HSC in HSC-P

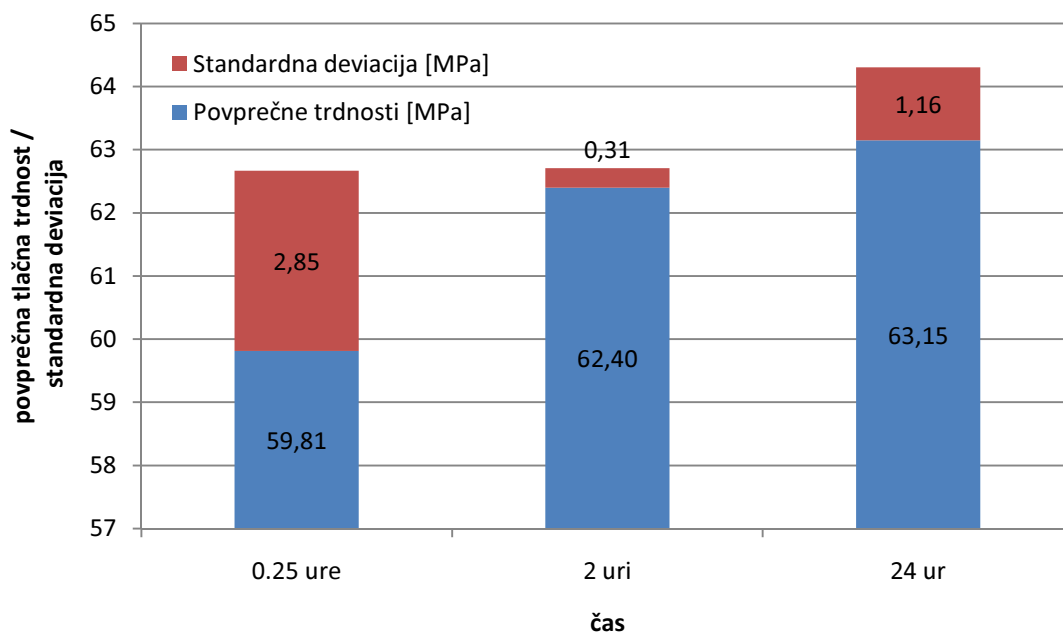
Predvidevamo, da so vzrok temu neobičajnemu razmerju tlačnih trdnosti razlike v temperaturi prostora in sveže betonske mešanice v prvem in drugem preskusu. Posledica tega je razlika v hitrosti procesa hidratacije.

5.4.5 Vpliv vlažnosti preskušanca na merjenje tlačne trdnosti betona

Kot je bilo že omenjeno v poglavju 4.2.1 je nega betona v času njegovega strjevanja pomembna tako za proces hidratacije kot za doseganje visokih trdnosti. Naši preskušanci so bili od razkalupljanja do dneva preskusa tlačne trdnosti negovani v vodi tako, da so bili v celoti potopljeni v vodo, s čimer smo zagotovili konstantno relativno vlažnost. Na dan preskusa smo preskušance vzeli iz vode in jih pustili približno 15 minut, da se je z njih odcedila površinska voda. Med površinskim sušenjem vzorcev se nam je porajalo vprašanje, kolikšen je vpliv površinske vlažnosti oz. osušenosti preskušanca na tlačno trdnost betona.

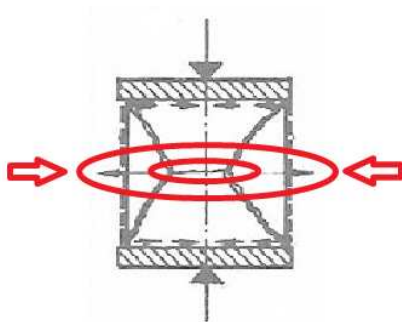
Preskušanci, potopljeni v vodi, so imeli pore nasičene z vodo. Ta voda pri povečevanju tlačne obremenitve v preskušancu povečuje notranje napetosti in hitrost širjenja razpok. Poleg tega, se pri sušenju pore v betonu praznijo. Kapilarni srk, do katerega pride zaradi praznjenja por, povzroči natezne napetosti na stene por.

Preskušali smo beton običajne trdnosti iz mešanice z drugačno granulometrijsko sestavo agregata. Preskušance smo po 28-ih dneh vzeli iz vode in jih osuševali. Prve tri preskušance smo pustili približno 0.25 ure, da se je z njih odcedila površinska voda in nato opravili preskus tlačne trdnosti. Po dveh urah smo preverili tlačno trdnost na drugih treh preskušancih in po enem dnevu še na preostalih treh osušenih preskušancih. Rezultati meritev tlačne trdnosti in njihova standardna deviacija so prikazani na sliki 5.14.



Slika 5.14: Vpliv vlažnosti betonskega preskušanca na merjenje tlačne trdnosti betona

Dobljeni rezultati potrjujejo našo domnevo, da izsuševanje površine preskušanca tvori obroč – beton, ki objema – kar poveča tlačno trdnost preskušanca. Slika 5.15 shematsko prikazuje ta pojav.



Slika 5.15: Pojav obroča v preskušancu

6 ZAKLJUČKI

Proučevanje literature in analiza rezultatov dobljenih z meritvami tlačne trdnosti vlaknastih betonov kaže, da na časovni razvoj tlačne trdnosti vlaknastega betona vplivajo številni parametri. Poleg osnovnih sestavin, njihovih medsebojnih razmerij v betonu in pogojev nege, tudi vgrajena vlakna vplivajo na lastnosti betona. V diplomski nalogi predstavljamo rezultate lastnega eksperimentalnega programa, v okviru katerega smo preučevali vpliv vrste in količine vlaken, vrste agregata ter pogojev okolice in vlažnosti preskušancev na časovni razvoj tlačne trdnosti betonov običajne in visoke trdnosti.

Hidratacija cementa je pomemben kemijski proces v strjujočem se betonu – je gonilo razvoja tlačne trdnosti betona. V betonu z večjo količino cementa je tlačna trdnost naraščala hitreje, saj več cementa pomeni več produktov hidratacije v določenem času.

Pomemben parameter, ki vpliva na tlačno trdnost betona, je vodovezivno razmerje sveže betonske mešanice. Nizko vodovezivno razmerje zagotavlja manjšo poroznost otrdelega betona, ker se pri procesu hidratacije porabi večji del proste vode. Zaradi manjše vsebnosti proste vode je zgradba betona bolj homogena in manj porozna, kar ima za posledico večjo tlačno trdnost betona, v primerjavi z betoni, ki imajo višja vodovezivna razmerja. Slednje potrjujejo rezultati naših raziskav betonov visoke in običajne trdnosti.

Vgrajena vlakna vplivajo na homogenost betona. Rezultati raziskav kažejo, da so betoni običajne trdnosti z vsebnostjo jeklenih vlaken izkazovali višje tlačne trdnosti kot primerljivi betoni običajne trdnosti z vsebnostjo polipropilenskih vlaken. Vzrok je v kvaliteti stika med cementnim kamnom in vlakni. Za porušitev stika med jeklenimi vlakni in cementnim kamnom je potrebna večja sila kot za porušitev stika med polipropilenskimi vlakni in cementnim kamnom. Analiza vpliva dolžine jeklenih vlaken je pokazala, da so krajša jeklena vlakna bolj učinkovita, ker so bolj enakomerno porazdeljena med zrni agregata kot daljša. Kompozit z daljšimi jeklenimi vlakni ima zaradi njihove slabše porazdelitve manj homogeno strukturo. Kompozit z vsebnostjo krajših jeklenih vlaken je dosegal višje tlačne trdnosti tudi

pri betonih visoke trdnosti. Opazili smo, da je beton visoke trdnosti z vsebnostjo polipropilenskih vlaken, ravno obratno kot primerljivi beton običajne trdnosti, v začetku pridobil veliko večjo tlačno trdnost kot beton visoke trdnosti z vsebnostjo jeklenih vlaken. Polipropilenska vlakna so med pripravo sveže betonske mešanice zadržala del vode in zato je bilo v porah manj proste vode. Posledica tega je boljša struktura cementnega kamna.

Pri proučevanju vpliva količine vlaken na časovni razvoj tlačne trdnosti betona, smo, podkrepljeno z ugotovitvami drugih avtorjev, tudi mi ugotovili, da ima prostorninski delež vlaken do 2% pri betonih običajne trdnosti zanemarljiv vpliv. Večji del tlačne trdnosti betona prevzame agregat. Pri betonih visoke trdnosti pa ima vsebnost vlaken večji vpliv na časovni razvoj tlačne trdnosti.

Pri preiskavah vpliva agregata na časovni razvoj tlačne trdnosti betona smo ugotovili, da v našem primeru agregat nima velikega vpliva na časovni razvoj tlačne trdnosti betona. Predvidevamo, da je vzrok za to ugotovitev v približno enaki granulometrijski in podobni mineraloško-kemijski sestavi uporabljenih agregatov.

Raziskava vpliva različnih temperatur okolja pri pripravi betonske mešanice na časovni razvoj tlačne trdnosti betona je pokazala, da so betoni običajne trdnosti, zamešani in negovani pri višji temperaturi okolja, v začetku pridobili višjo tlačno trdnost. Višja temperatura sveže betonske mešanice je pospešila proces hidratacije in hitreje se je tvorila nosilna struktura, kasneje pa beton ni razvil tako visoke trdnosti kot primerljivi beton, negovan pri nekoliko nižji temperaturi. Pri počasnejšem in dolgotrajnejšem procesu hidratacije se je hidratizirala večja količina cementa. V betonu je ostalo manj nehidratiziranih zrn cementa, ki predstavljajo oslabitev kompozita.

Čas osuševanja preskušanca pred preskusom tlačne trdnosti, v intervalu med petnajstimi minutami in štiriindvajsetimi urami, vpliva na velikost tlačne trdnosti betona. Izmerjene vrednosti tlačnih trdnosti betonskih preskušancev, ki smo jih po osemindvajsetih dneh vzeli iz vode in osušili, so se povečevale s časom osuševanja. Površina preskušanca se med osuševanjem krči, kar v njem povzroča natezne napetosti na stene por. Pri preskusu tlačne trdnosti površina preskušanca deluje kot natezni obroč, ki sistemu poveča nosilnost.

Zaključimo lahko, da na časovni razvoj tlačne trdnosti betonov vplivajo številni dejavniki, najbolj tisti, ki vplivajo na proces hidratacije, med katerim se tvori nosilna struktura betona. V okviru naših raziskav časovnega razvoja tlačne trdnosti betona so imela vgrajena vlakna majhen, praktično zanemarljiv vpliv. Predvidevamo, da bi večje vsebnosti vlaken v betonih lahko imele zaznavnejši vpliv na časovni razvoj tlačne trdnosti betona. Za potrditev tega pa bi bile potrebne nadaljnje raziskave.

VIRI

Balaguru, P. N., Shah, S. P. 1992. Fibre-reinforced cement composites. New York, McGraw, Inc.: 530 str.

Durekovič, A. 1996. Cement, cementni kompozit i dodaci za beton. 1. izd., Zagreb, Institut građevinarstva Hrvatske dd: 358 str.

Ercegovič, R., Dundovič, M. 2006. Metode preizkušanja agregatov za beton. V: 13. slovenski kolokvij o betonih – Agregati v betonu, Ljubljana, 18. maj 2006, Zbornik gradiv in referatov: 61-69

Ercegovič, R., Korla, J. 2007. Meritve posebnih lastnosti betonov. V: 14. slovenski kolokvij o betonih – Posebne lastnosti betonov z dodatki, Ljubljana, 29. maj 2007: Zbornik gradiv in referatov: 63-75

Kabashi, N., Kadiu, F. 2006. Študija možnosti uporabe lokalnih materialov za proizvodnjo betonov visoke zmogljivosti. V: 13. slovenski kolokvij o betonih – Agregati v betonu, Ljubljana, 18. maj 2006, Zbornik gradiv in referatov: 47-54

Mehta, P. K. 1986. Concrete: structure, properties and materials. New Jersey, Prentice-Hall, Inc.: 450 str.

Muravljov, M. 2000. Osnovi teorije i tehnologije betona. Beograd, Građevinska knjiga, 451 str.

Muravljov, M., Jevtić, D. 2003. Građevinski materijali 2. Beograd, Akademska misao, 209 str.

Muravljov, M. 2007. Građevinski materijali. 6. izd., Beograd, Građevinska knjiga, 587 str.

Saje, D. 2001: Tlačna trdnost in krčenje betonov visoke trdnosti. Ljubljana, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, Oddelek za gradbeništvo, Konstrukcijska smer: 157 f.

Šajna, A. 2000. Preizkušanje mehanskih lastnosti betonov. V: 7. slovenski kolokvij o betonih – Optimizacija kakovosti betona, Ljubljana, 18. maj 2000, Zbornik gradiv in referatov: 47-50

Šušteršič, J., Ukrainczyk, V. 2006. Vpliv lastnosti agregatov na lastnosti betonov. V: 13. slovenski kolokvij o betonih – Agregati v betonu, Ljubljana, 18. maj 2006, Zbornik gradiv in referatov: 1-8

Zajc, A. 1994. Mikroarmirani betoni. V: Slovenski zbornik o betonih – Mikroarmirane malte in betoni, Ljubljana, 26. maj 1994, Zbornik gradiv in referatov: 9-14

Zajc, A. 2007. Kemijski in mineralni dodatki v tehnologiji betona. V: 14. slovenski kolokvij o betonih – Posebne lastnosti betonov z dodatki, Ljubljana, 29. maj 2007: Zbornik gradiv in referatov: 1-7

Žarnić, R. 2003. Lastnosti gradiv. Ljubljana, Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo: 350 str.

SIST EN 12620:2002. Agregati za beton: 47 str.

SIST EN 206-1:2003. Beton - 1.del: Specifikacija, lastnosti, proizvodnja in skladnost: 72 str.

SIST EN 197-1:2002. Cement – 1.del: Sestava, zahteve in merila skladnosti za običajne cemente (istoveten z EN 197-1:2000): 24 str.

SIST EN 14889-1:2006. Vlakna za beton - 1. del: Jeklena vlakna – definicija, specifikacije in skladnost: 26 str.

SIST EN 14889-2:2006. Vlakna za beton - 2. del: Polimerna vlakna – definicija, specifikacije in skladnost: 27 str.

SIST EN 12390-3:2002: Preskušanje strjenega betona – 3. del: Tlačna trdnost preizkušancev: 15 str.

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 (istoveten EN 1008:2002): 16 str.