

# Ispitivanje betona vrlo velikih čvrstoća s eruptivnim agregatom

Damir Matokić, Ilija Gabrić

## Ključne riječi

beton vrlo velikih čvrstoća, svojstva, sitnozrni eruptivni agregat, uzorci betona, optimalni sastav, mjerodavna mješavina

## Key words

very high-strength concrete, properties, fine-grained volcanic aggregate, concrete samples, optimum composition, reference mixture

## Mots clés

béton à très haute résistance, propriétés, granulats fins volcaniques, échantillons de béton, composition optimale, mélange de référence

## Ключевые слова

высокопрочный бетон, свойства, мелкозернистый эруптивный заполнитель, образцы бетона, оптимальный состав, стандартная смесь

## Schlüsselworte

Beton sehr hoher Festigkeit, Eigenschaften, kleinkörniger eruptiver Zuschlagstoff, Betonproben, optimale Zusammensetzung, massgebende Mischung

D. Matokić, I. Gabrić

Prethodno priopćenje

## Ispitivanje betona vrlo velikih čvrstoća s eruptivnim agregatom

Opisana su iskustva u određivanju sastava, izradi mješavina te ispitivanju betona vrlo velikih čvrstoća sa sitnozrnim eruptivnim agregatom krupnoće zrna do 8 mm. Definirane su komponente mješavine betona i njihova svojstva. Ispitivanja su rađena na standardnim uzorcima. Provedena je eksperimentalna analiza određivanja optimalnog sastava betona vrlo velikih čvrstoća. Dan je program laboratorijskog ispitivanja s dobivenim mehaničkim svojstvima uzoraka mjerodavne mješavine betona.

D. Matokić, I. Gabrić

Preliminary note

## Testing very high-strength concrete containing volcanic aggregate

Authors describe experience gained in determining composition, preparing mixtures, and testing of the very high-strength concrete containing fine-grained volcanic aggregate, up to 8 mm in grain size. Components of concrete mixtures and their properties were defined. Standard samples were used in the testing. Experimental analysis of optimum composition of the very high-strength concrete was conducted. The laboratory testing program, based on mechanical properties of samples taken from a reference concrete mixture, is presented.

D. Matokić, I. Gabrić

Note préliminaire

## L'essai de béton à très haute résistance à base de granulats volcaniques

Les auteurs décrivent l'expérience obtenue dans la détermination de composition, dans la préparation de mélanges, et dans l'analyse du béton à très haute résistance à base de granulats fins volcaniques, jusqu'à 8 mm de grandeur. Les composantes des mélanges de béton et leur propriétés ont été définies. Les échantillons standard ont été utilisés au cours des essais. L'analyse expérimentale de la composition optimale du béton à très haute résistance a été faite. Le programme des essais en laboratoire, basé sur propriétés mécaniques des échantillons pris du mélange de béton de référence, est présenté.

Д. Матокич, И. Габрич

Предварительное сообщение

## Испытание высокопрочных бетонов с эруптивным заполнителем

Описан опыт определения состава, изготовления смесей и проведения испытаний высокопрочных бетонов с мелкозернистым эруптивным заполнителем (крупность зерна – до 8 мм). Определены компоненты смеси бетона и их свойства. Испытания проведены на стандартных образцах. Проведен экспериментальный анализ определения оптимального состава высокопрочного бетона. Дана программа лабораторных испытаний с полученными механическими свойствами образцов стандартной бетонной смеси.

D. Matokić, I. Gabrić

Vorherige Mitteilung

## Untersuchung des Betons sehr hoher Festigkeit

Beschrieben sind die Erfahrungen in der Bestimmung der Zusammensetzung, Herstellung der Gemische sowie die Untersuchung des Betons sehr hoher Festigkeit mit kleinkörnigem Zuschlagstoff mit Korngröße bis 8 mm. Definiert sind die Komponenten der Betonmischung und deren Kennzeichen. Die Untersuchungen wurden an Standardproben ausgeführt. Durchgeführt wurde die experimentale Analyse der Bestimmung der optimalen Zusammensetzung des Betons sehr hoher Festigkeit. Ausgelegt ist ein Programm der Laboruntersuchungen der erhaltenen mechanischen Eigenschaften der Proben der massgebenden Betonmischung.

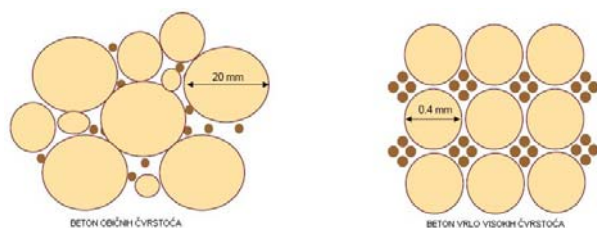
Autori: Mr. sc. **Damir Matokić**, dipl. ing. građ.; **Ilija Gabrić**, dipl. ing. građ., Institut IGH d.d., Zagreb, Poslovni centar Osijek

## 1 Uvod

Prema analogiji raspodjele betona preko njegove tlačne čvrstoće [1], specifičnog sastava i svojstava receptura [2], beton vrlo visokih čvrstoća može se okarakterizirati i kao beton vrlo visokih uporabnih svojstava čije su vrijednosti tlačne čvrstoće veće od razreda tlačne čvrstoće - klase betona C 100/115.

U sastavu betona vrlo visokih čvrstoća u odnosu na tradicionalne komponente sastava koji se rabe u običnim betonima: cementa, agregata i vode, nalaze se isključivo cementi visokih čvrstoća CEM I 52,5 N, kvarcni pijesak, kemijski dodaci-superplastifikator na bazi akrilnog polimera, mineralni dodaci-silikatna prašina i čelična vlakna.

Betoni vrlo visokih čvrstoća u svom sastavu mogu imati eruptivni drobljeni agregat manjeg promjera zrna najčešće do 8 mm, ili što je češći slučaj u brojnim istraživanjima [3, 4] za izradu ovog betona da u svom sastavu uopće nemaju krupnog agregata pa je njihova struktura sličnija sastavu mortova. Takvi betoni sadrže čestice manje od 0,1 μm pa do približno 300-600 μm, kako bi se dobilo ujednačenije pakiranje zrna i što homogenija masa (slika 1.).



Slika 1. Pakiranje zrna kod betona običnih čvrstoća i betona vrlo visokih čvrstoća

Betonu od reaktivnog praha dodaju se najčešće ravna čelična vlakna (slika 2.), vlačne čvrstoće od 2600 N/mm<sup>2</sup> [5].



Slika 2. Osnovni oblici čeličnih vlakana (s kukicama, spiralna, ravna, zakrivljena, valovita)

U slučaju upotrebe veće količine vlakana različitog oblika u odnosu na ravna čelična vlakna (valovita, spiralna vlakna i sl.), pri izradi betona vrlo visokih čvrstoća može doći do grupiranja i međusobnog uplitanja vlakana u veće nakupine (slika 3.).

Takva je pojava vrlo nepovoljna u nosačima manjega poprečnog presjeka [6] gdje je ograničen prostor u oplati za ugradnju betona i gdje se tokom ugradnje i vibrira-

nja svježeg betona vlakna ne mogu više odvojiti i ravnomjerno raspodijeliti.



Slika 3. Medusobno upletanje valovitih čeličnih vlakana

Vodocementni omjer "v/c" u sastavu mješavine vrlo je malen i iznosi oko 0,20 pa se obradivost postiže dodavanjem znatne količine superplastifikatora. Homogenost i zbijenost svih sastojaka bitna je mjera za dobivanje visokih mehaničkih svojstava, a primjenom toplinskog tretmana dodatno se poboljšavaju svojstva betona vrlo visokih čvrstoća.

Za dobivanje betona vrlo visokih čvrstoća potrebna je osobito pažnja pri izboru sastavnih komponenata koje moraju biti međusobno kompatibilne i visoke kakvoće jer je ovaj beton znatno osjetljiviji na nekvalitetnije sastojke od betona običnih čvrstoća.

Posebna se pozornost mora posvetiti i pri izradi (u miješalici ili betonari), ugradnji u oplatu i kalupe, a osobito pri njezi nakon ugradnje betona vrlo visokih čvrstoća kojom se postižu više rane i konačne čvrstoće.

## 2 Komponente i njihova svojstva u sastavu betona vrlo visokih čvrstoća domaćih receptura

U sastavu mješavine betona vrlo visokih čvrstoća upotrijebljene su domaće ili uvozne komponente za koje je bila moguća relativno laka dobava.

Komponente sastava mješavine betona vrlo visokih čvrstoća su sljedeće:

- cement CEM I 52,5 N
- agregat (drobljeni eruptivni agregat dijabaz promjera zrna do 8 mm)
- silikatna prašina (mineralni dodatak)
- superplastifikator (kemijski dodatak, na bazi akrilnog polimera)
- čelična vlakna (ravna čelična vlakna koeficijenta oblika  $k = 67$ )
- voda (pitka voda iz gradskog vodovoda)



Slika 4. Agregat 0-2 mm



Slika 5. Agregat 2-4 mm



Slika 6. Agregat 4-8 mm

## 2.1 Cement

Za izradu betona vrlo visokih čvrstoća upotrebljava se portlandski cement prve klase oznake CEM I 52,5 N [7], a oznake u nazivu cementa imaju značenje koje je navedeno u tablici 1.

Tablica 1. Oznake u nazivu cementa

CEM	cement opće namjene
I	čisti portlandski cement
52,5	razred tlačne čvrstoće
N	normalna rana čvrstoća

CEM I 52,5 N je cement bez dodataka i najvišeg je razreda norme tlačne čvrstoće (visokih početnih i normnih čvrstoća) specificiranog u HRN EN 197-1, a upotrebljava se za najzahtjevnije predgotovljene armirane i nearmirane betonske konstrukcije visoke nosivosti uz mogućnost ranijeg oslobađanja iz kalupa.

## 2.2 Agregat

Upotrijebljeni drobljeni agregat dobiven je iz eruptivne stijene dijabaza [8, 9], rabe se frakcije 0-2 mm (slika 4.), 2-4 mm (slika 5.) i 4-8 mm (slika 6.) za izradu mješavine betona vrlo visokih čvrstoća, a granulometrijska krivulja i optimalni granulometrijski sastav vide se na slikama 7. i 8.

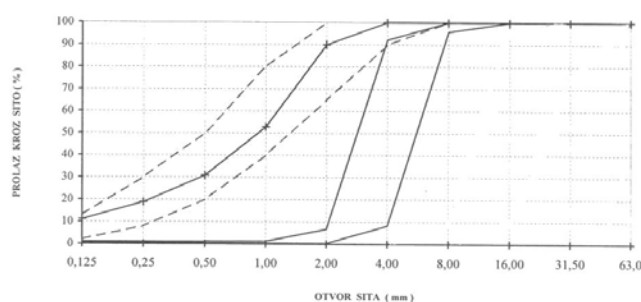
Fizičko-mehanička svojstva kamena:

- Tlačna čvrstoća (HRN B.B8012)
  - u suhom stanju:  $t = 237,6 \text{ MN/m}^2$
  - u vodom zasićenom stanju:  
 $t = 121,2 \text{ MN/m}^2$
  - nakon smrzavanja:  $t = 190,1 \text{ MN/m}^2$
- Otpornost na habanje po Boehmeu (HRN B.B8015)  $A_s = 9,4 \text{ cm}^3 / 50 \text{ cm}^2$
- Upijanje vode (HRN B.B8010)  
 $U = 0,22 \text{ mas}\%$

- Prostorna masa (HRN B.B8032)  $m = 2,920 \text{ t/m}^3$

- Postojanost na mrazu (HRN B.B8001) postojan.

## GRANULOMETRIJSKA KRIVULJA



Granične linije za frakciju 0 - 4 mm prema HRN EN 933-1

## NUMERIČKI GRANULOMETRIJSKI SASTAV AGREGATA

FRAKCIJA [mm]	# OTVORI SITA U mm									
	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00	31,50	63,0
0-2 mm	11,10	18,80	30,90	52,80	89,90	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2-4 mm	1,00	1,00	1,10	1,20	6,70	92,20	100,00	100,00	100,00	100,00
4-8 mm	0,30	0,30	0,30	0,30	0,40	8,30	95,80	100,00	100,00	100,00
8-16 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,90	97,68	100,00	100,00
16-32 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,27	75,04	100,00
32-63 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

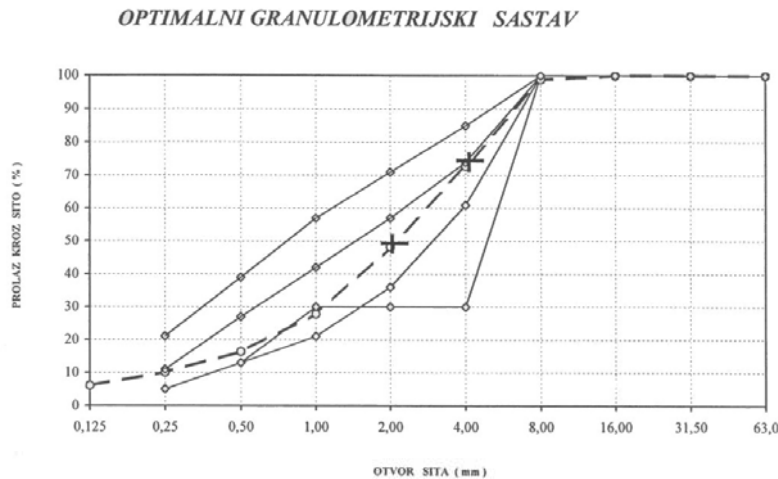
Modul zmatosti sitnog agregata : 2,97				
Sadržaj sitnih čestica :	#0-4mm	#4-8mm	#8-16mm	#16-31,5mm
0,09 mm				
0,063mm				

Slika 7. Granulometrijska krivulja i numerički granulometrijski sastav agregata

## 2.3 Silikatna prašina

Upotrijebljena silikatna prašina [10] za dobivanje betona vrlo visokih čvrstoća sastoji se od 85-98 % mikroskopski sitnih, sferičnih, okruglih čestica amorfnog silicij-dioksida ( $\text{SiO}_2$ ). Prosječni promjer čestica kreće se između 0,10 i 0,15 mikrometara (slika 9.).

Silikatna prašina poboljšava gustoću čestica u najfinijem području. Rezultat te izuzetne finoće jest da je specifična površina silikatne prašine 50 do 100 puta veća od površine cementa.



Granulometrijske granične krivulje mješavine agregata prema HRN 1128 : 2007

**NUMERIČKI GRANULOMETRIJSKI SASTAV AGREGATA**

FRAKCIJA [mm]	# OTVORI SITA U mm										UČEŠĆE U %
	0,125	0,25	0,50	1,00	2,00	4,00	8,00	16,00	31,50	63,0	
0 - 2 mm	11,10	18,80	30,90	52,80	89,90	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	52
2 - 4 mm	1,00	1,00	1,10	1,20	6,70	92,20	100,00	100,00	100,00	100,00	20
4 - 8 mm	0,30	0,30	0,30	0,30	0,40	8,30	95,80	100,00	100,00	100,00	28
8 - 16 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	8,90	97,68	100,00	100,00	0
16 - 32 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	9,27	75,04	100,00	0
32 - 63 mm	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	

0 - 8	6,06	10,06	16,37	27,78	48,20	72,76	98,82	100,00	100,00	100,00	100
-------	------	-------	-------	-------	-------	-------	-------	--------	--------	--------	-----

Slika 8. Optimalni granulometrijski sastav i numerički granulometrijski sastav agregata



Slika 9. Silikatna prašina

Velika površina i visok sadržaj silicij-dioksida silikatnoj prašini daju pucolanska svojstva. Pucolanskom reakcijom silikatna prašina reagira sa slobodnim vapnom iz cementa i stvara CSH gel, pa na taj način beton sa silikatnom prašinom razvija veću čvrstoću i manju propusnost.

**2.4 Superplastifikator**

Za izradu betona vrlo visokih čvrstoća izabran je superplastifikator na bazi akrilnog polimera [10], koji je aditiv nove generacije za veliko smanjenje količine vode kod pripreme betona te omogućava proizvodnju i ugradnju betona pri vrlo niskom vodocementnom omjeru. Razvijen je za industriju predgotovljenih betonskih elemenata gdje se zahtijevaju visoka početna čvrstoća (nakon 18-24 sata) i konačna čvrstoća, izvrstan izgled površine betona i izuzetno dobra svojstva betonskih proizvoda pri upotrebi.

Upotrijebljeni superplastifikator ne sadrži kloride, a usklađen je sa svim vrstama cementa koje udovoljavaju normama ENV 197 i ASTM.

**2.5 Čelična vlakna**

Rabe se ravna čelična vlakna tvorničke oznake DG 20/0,3 N [11] (slika 10.) za prethodna laboratorijska ispitivanja i vlakna tvorničke oznake DG 20/0,3 H [11] (slika 11.) za konačna laboratorijska ispitivanja prilikom ugrađivanja betona vrlo visokih čvrstoća u predgotovljenu prednapetu međukatnu konstrukciju. Proizvedena su prema DIN-normi: DIN EN 10016-2. Svojstva vlakana navedena su u tablici 2.



Slika 10. Čelična vlakna DG 20/0,3 N

Slika 11. Čelična vlakna DG 20/0,3 H



Tablica 2. Svojstva čeličnih vlakana

Svojstvo čeličnih vlakana	Tvornička oznaka DG 20/03 N	Tvornička oznaka DG 20/03 H
Vlačna čvrstoća ( $f_t$ )	1100 N/mm <sup>2</sup> ± 15 %	≥ 2000 N/mm <sup>2</sup>
Duljina vlakna (L)	20 mm ± 10 %	20 mm ± 10 %
Promjer vlakna (d)	0,3 mm ± 10 %	0,3 mm ± 10 %
Koeficijent oblika vlakna ( $k = L / d$ )	67	67

## 2.6 Voda

Kod pripravljanja mješavina betona vrlo visokih čvrstoća rabljena je voda za piće iz gradskog vodovoda. U betonu vrlo visokih čvrstoća dodaju se mala količina vode, vodocementni omjer je u granicama oko 0,2.

## 3 Eksperimentalna analiza za određivanje optimalnog sastava betona vrlo visokih čvrstoća

### 3.1 Podaci o ispitivanju preliminarnih mješavina za određivanje mjerodavnog sastava

Laboratorijskim ispitivanjem većeg broja različitih sastava mješavina (tablica 3.) potvrđuje se mjerodavni (optimalni) sastav betona vrlo visokih čvrstoća. Sve su mješavine pripravljene u laboratorijskoj miješalici obujma 100 litara.

Uzorci betona dobiveni iz preliminarnih mješavina podvrgnuti su standardnoj laboratorijskoj njezi i toplinskoj obradi odmah nakon ugradnje u kalupe.

Najveću količinu cementa ima mješavina 1, a najmanju mješavina 5, ispitivanjem će se potvrditi koje su granice utjecaja količine cementa na tlačnu čvrstoću betona vrlo visokih čvrstoća.

Svrha variranja količine vlakana u mješavinama jest utvrđivanje utjecaja količine vlakana na vlačnu svijajuću

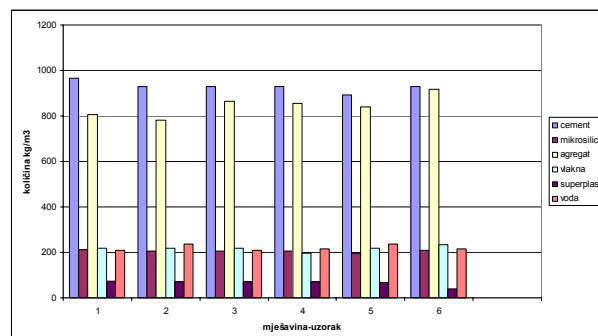
Tablica 3. Preliminarne mješavine za odabir mjerodavnog sastava betona vrlo visokih čvrstoća

Oznaka mješavine	Cement (kg/m <sup>3</sup> )	Silikatna prašina (kg/m <sup>3</sup> )	Agregat kg /m <sup>3</sup>			Čelična vlakna (kg/m <sup>3</sup> )/(vol. %)	Superplastifikator (kg/m <sup>3</sup> )	Ukupna voda (kg/m <sup>3</sup> )	v/c
			0-2 mm	2-4 mm	4-8 mm				
1	967	213	419	161	226	220/2,7	74	209	0,22
2	930	205	406	156	219	220/2,7	70	237	0,26
3	930	205	449	173	242	220/2,7	70	208	0,22
4	930	205	445	171	240	197/2,5	70	214	0,23
5	892	196	436	168	235	220/2,7	68	236	0,27
6	930	209	477	183	257	234/2,9	39	215	0,23

čvrstoću betona; najveću količinu vlakana ima mješavina 6 (2,9 % vol.) a najmanju mješavina 4 (2,5 % vol.).

U navedenim preliminarnim mješavinama u tablici 3., ugrađena je, uz optimalnu-normalnu količinu superplastifikatora u mješavini 6, i znatno veća količina u ostalim mješavinama, kako bi se odredio njegov utjecaj na svojstva betona vrlo visokih čvrstoća. Vodocementni je omjer preliminarnih mješavina betona vrlo visokih čvrstoća nizak i u granicama od 0,22 do 0,27.

Na slici 12. grafički su prikazane količine pojedinih komponenata preliminarnih mješavina betona vrlo visokih čvrstoća iz tablice 3.

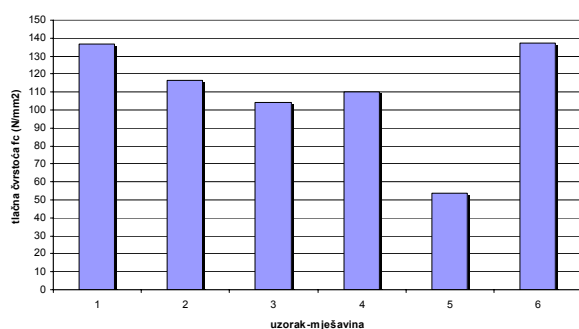


Slika 12. Grafikon s podacima o količini komponenata u sastavima preliminarnih mješavina

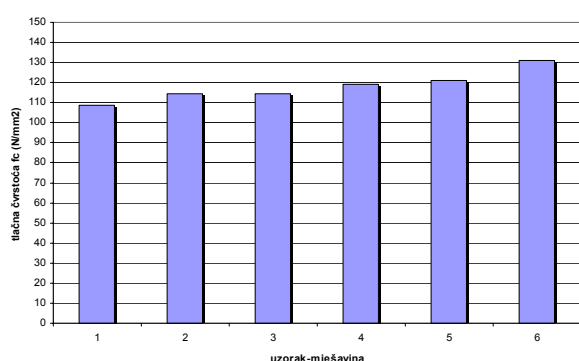
### 3.2 Usporedni rezultati laboratorijskih ispitivanja za određivanje mjerodavne mješavine

Usporedne srednje vrijednosti laboratorijskih ispitivanja tlačne čvrstoće na preliminarnim mješavinama za zaparivane uzorke (zaparivanje na 70 °C jedan dan, odmah nakon ugradnje u kalupe) pri starosti betona 3 dana i za nezaparivane uzorke preliminarnih mješavina pri starosti betona 28 dana nalaze se na slikama 13. i 14. Svi su se uzorci ispitivali na kockama dimenzije brida 15 cm.

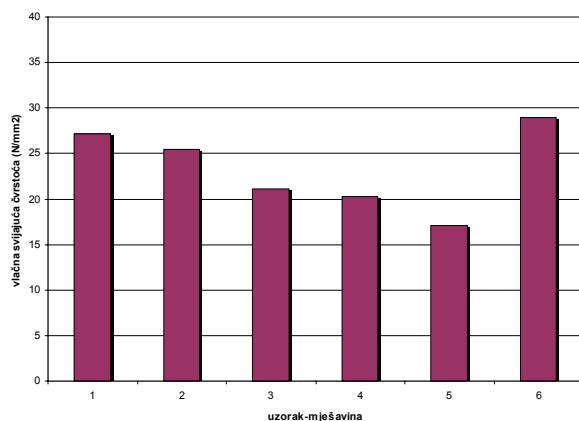
Usporedne srednje vrijednosti ispitivanja vlačne čvrstoće na savijanje na uzorcima prizmi dimenzija 10×10×40 cm, preliminarnih mješavina betona vrlo visokih čvrstoća iz tablice 3., prikazani su na slici 15. Uzorci su podvrgnuti samo standardnoj laboratorijskoj njezi bez toplinskog tretmana



Slika 13. Usporedne srednje vrijednosti tlačne čvrstoće preliminarnih mješavina betona, uzorci podvrgnuti toplinskom tretmanu (zaparivanju) starosti betona 3 dana



Slika 14. Usporedne srednje vrijednosti tlačne čvrstoće preliminarnih mješavina betona na uzorcima podvrgnutim standardnoj laboratorijskoj njezi bez toplinskog tretmana (na temperaturi 20 0C i relativnoj vlažnosti zraka 95 %), starost betona 28 dana



Slika 15. Usporedne srednje vrijednosti vlačne čvrstoće na savijanje preliminarnih mješavina betona, uzorci podvrgnuti standardnoj laboratorijskoj njezi, starost betona 28 dana

Iz rezultata usporednih ispitivanja tlačne i vlačne čvrstoće na savijanje preliminarnih mješavina betona vrlo visokih čvrstoća, prikazanih na slikama 13., 14. i 15. može se zaključiti sljedeće:

- Mješavina 6 ima najveće tlačne čvrstoće i u slučaju zaparivanih uzoraka na temperaturi od 70 °C jedan dan (odmah nakon ugradnje u kalupe), ali i u slučaju kada su uzorci samo podvrgnuti standardnoj laboratorijskoj njezi do starosti betona 28 dana na temperaturi 20 °C i relativnoj vlažnosti zraka 95 %.
- Uzorci mješavine 6 imaju najveću vlačnu čvrstoću na savijanje i najveću količinu ugrađenih čeličnih vlakana (2,9 % vol); količina čeličnih vlakana u betonima vrlo visokih čvrstoća znatno utječe na povećanje njihovih vlačnih čvrstoća na savijanje (i do 30 %, usporedbom mješavina 4 i 6) i na povećanje njihove duktilnosti.
- Uzorci mješavine 4 imaju najmanju količinu ugrađenih čeličnih vlakana, ali ipak im je tlačna čvrstoća u granicama tlačne čvrstoće uzoraka drugih mješavina, a to pokazuje da količina čeličnih vlakana ne utječe znatnije na povećanje tlačne čvrstoće betona vrlo visokih čvrstoća.
- Količina cementa iznad 930 kg/m<sup>3</sup> ne utječe znatnije na daljnje povećanje tlačne čvrstoće betona vrlo visokih čvrstoća, a to se vidi iz rezultata ispitivanja tlačne čvrstoće uzoraka mješavine 1 i usporedbe s rezultatima tlačne čvrstoće uzoraka mješavine 6.
- Većom količinom superplastifikatora iznad granice "normalne" (optimalne) količine ugrađene u mješavinu 6 ne utječe se bitno na povećanje tlačne čvrstoće betona što je vidljivo usporedbom tlačnih čvrstoća uzoraka mješavine 6 i uzoraka ostalih mješavina koje imaju znatno veću količinu superplastifikatora. Iz toga proizlazi da količina ugrađenog superplastifikatora mora biti u određenim granicama (do 40 kg/m<sup>3</sup>) zbog ekonomske opravdanosti pojedinih ugrađenih sastojaka mješavine.

Iz dobivenih srednjih vrijednosti ispitivanja uzoraka preliminarnih mješavina odabrana je mjerodavna (optimalna) mješavina oznake "6" jer se njome postižu najveće potrebne tlačne i vlačne čvrstoće na savijanje

#### 4 Program laboratorijskog ispitivanja i dobivena mehanička svojstva uzoraka mjerodavne mješavine betona vrlo visokih čvrstoća

Beton vrlo visokih čvrstoća mjerodavne mješavine podijeljen je u dvije serije:

- Serija 1.: uzorci betona podvrgnuti su termičkom tretmanu zaparivanja (odmah nakon ugradnje betona u kalupe; kalupi su uronjeni u vodu koja se zagrijava i isparava u metalnoj posudi) (slika 16.) jedan dan na temperaturi 70 °C, nakon toga su njegovani u laboratoriju u trajanju do 28 dana starosti betona na temperaturi 20 °C i relativnoj vlažnosti zraka 95 %.

- Serija 2.: uzorci betona podvrgnuti su samo laboratorijskom njegovanju u trajanju do 28 dana starosti betona na temperaturi 20 °C i relativnoj vlažnosti zraka 95 %.



Slika 16. Postupak zaparivanja uzoraka betona vrlo visokih čvrstoća i praćenje temperature u zadanom vremenskom intervalu

#### 4.1 Svojstva svježeg betona vrlo visokih čvrstoća

Ispitivanjem konzistencije rasprostiranjem betona vrlo visokih čvrstoća (metoda rasprostiranja slijeganjem: engl. *slump flow*), rasprostiranje iznosi 530 mm.

Postupak ispitivanja rasprostiranja slijeganjem betona vrlo visokih čvrstoća vidi se na slici 17.



Slika 17. Rasprostiranje slijeganjem (metoda slump flow)

Specifična gustoća betona vrlo visokih čvrstoća iznosi 2,54 kg/dm<sup>3</sup> (25,4 kN/m<sup>3</sup>), a postupak određivanja vidi se na slici 18.



Slika 18. Određivanje specifične gustoće betona vrlo visokih čvrstoća

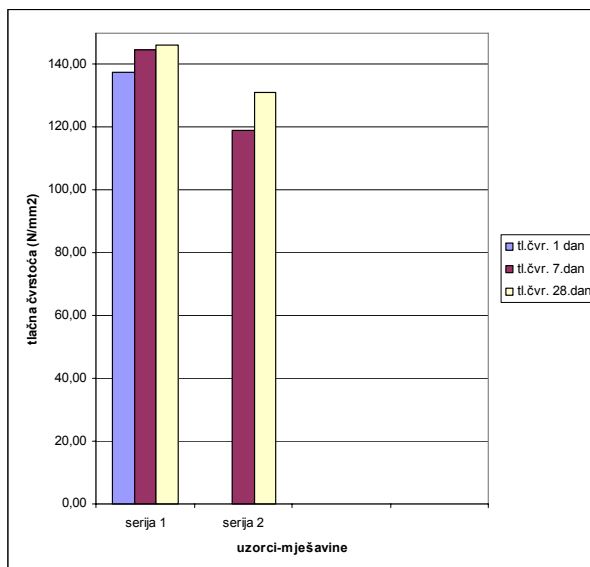
#### 4.2 Mehanička svojstva očvrstlog betona vrlo visokih čvrstoća

Beton vrlo visokih čvrstoća ispitivao se na uzorcima kocaka i prizmi (prema programu ispitivanja za starost betona 1, 7 i 28 dana) za sljedeća ispitivanja:

- tlačna čvrstoća uzoraka kocaka dimenzija 15×15×15 cm prema normi HRN EN 12390-3
- vlačna svijajuća čvrstoća na uzorcima prizmi dimenzija 10×10×40 cm prema normi HRN EN 12390-5
- statički modul elastičnosti na uzorcima prizmi dimenzija 10×10×40 cm, norma HRN EN 1341.

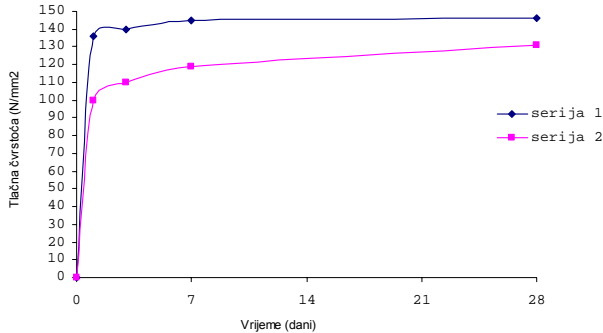
Najveća pojedinačna tlačna čvrstoća (28-dnevna) uzoraka zaparivanog betona mjerodavne mješavine 6 (serija 1.) iznosi 146,22 N/mm<sup>2</sup>. Srednja vrijednost ispitivanja 28-dnevne tlačne čvrstoće uzoraka zaparivanog betona mjerodavne mješavine 6 iznosi 144,96 N/mm<sup>2</sup>. Jednodnevna tlačna čvrstoća (rana čvrstoća) zaparivanog betona uzoraka mješavine 6 je visoka i iznosi 136,00 N/mm<sup>2</sup> što je povoljno za predgotovljene prednapete nosače zbog što ranijeg otpuštanja užadi za prednapinjanje i oslobađanja nosača od oplate.

Zaparivanjem odnosno toplinskim tretmanom betona vrlo visokih čvrstoća postiže se ne samo znatno veća rana tlačna čvrstoća, nego i veća ukupna (28-dnevna) tlačna čvrstoća betona koja je redovito za 10 % veća u odnosu na nezaparivane uzorke. To se može zaključiti usporedbom dobivenih rezultata tlačne čvrstoće uzoraka betona (grafički prikaz; slike 19. i 20.) iste mješavine 6 s različitim načinom njegovanja (s toplinskim tretmanom - serija 1. i bez toplinskog tretmana - serija 2.). Najveća 28-dnevna tlačna čvrstoća uzoraka betona mješavine 6 bez toplinskog tretmana iznosi 131,02 N/mm<sup>2</sup>.



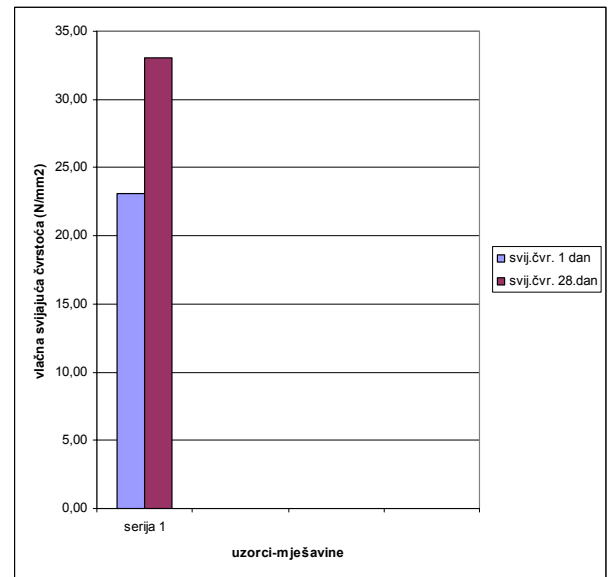
Slika 19. Grafički prikaz tlačne čvrstoće uzoraka betona vrlo visokih čvrstoća mješavine 6

Grafički prikaz dobivenih vrijednosti tlačne čvrstoće uzoraka betona mješavine 6 serije 1. i serije 2., kao i prirast tlačne čvrstoće uzoraka betona vrlo visokih čvrstoća vidi se na slikama 19. i 20.



Slika 20. Dijagram prirasta tlačne čvrstoće uzoraka betona vrlo visokih čvrstoća mješavine 6

Vlačna čvrstoća na savijanje uzoraka betona vrlo visokih čvrstoća mješavine 6 ispitivala se samo na toplinski tretiranim uzorcima (što se vidi iz slike 21.).



Slika 21. Grafički prikaz vlačne čvrstoće na savijanje uzoraka betona vrlo visokih čvrstoća mješavine 6



Slika 22. Ispitivanje tlačne čvrstoće (lijevo i sredina) i čvrstoće na savijanje (desno)

Najveća pojedinačna vlačna čvrstoća na savijanje (28-dnevna) uzoraka betona mjerodavne mješavine 6 iznosi 33,03 N/mm<sup>2</sup> (sila 73,39 kN). Srednja vrijednost ispitivanja 28-dnevne vlačne čvrstoće na savijanje uzoraka betona mjerodavne mješavine 6 iznosi 28,76 N/mm<sup>2</sup>. Dobivena jednodnevna vlačna čvrstoća na savijanje uzoraka mješavine 6 iznosi 23,09 N/mm<sup>2</sup> (sila 51,30 kN)

Na slici 22. prikazano je ispitivanje betona vrlo visokih čvrstoća na uzorcima kocke dimenzije brida 15 cm za određivanje tlačne čvrstoće, i uzorcima prizmi dimenzija 10×10×40 cm za određivanje vlačne čvrstoće na savijanje.

Ispitivanje statičkog modula elastičnosti betona vrlo visokih čvrstoća izvedeno je prema normi HRN EN 1341 na uzorcima prizmi dimenzija 10×10×40 cm. Na slici 23. (desno) vidi se tekstura (struktura) betona vrlo visokih čvrstoća dobivena na prerezanom uzorku kocke dimenzije brida 15 cm mjerodavne mješavine 6.

Statički modul elastičnosti dobiven ispitivanjem na preši iznosi  $E_c = 40.000 \text{ N/mm}^2$ , ispitivanje je prikazano na slici 23. (lijevo).



Slika 23. Ispitivanje statičkog modula elastičnosti pritiskom na preši (lijevo), vidljiva struktura betona vrlo visokih čvrstoća (desno)



## 5 Zaključak

U ovom je radu obrađivan beton vrlo visokih čvrstoća temeljen na domaćim recepturama potvrđen mjerodavnim sastavom mješavine tokom laboratorijskih ispitivanja. Dobiveni beton zadovoljava kriterij razvrstavanja betona prema Tehničkim propisima za betonske konstrukcije u kojem su betoni vrlo visokih čvrstoća iznad vrijednosti razreda tlačne čvrstoće betona visokih čvrstoća, odnosno iznad klase betona C 100/115.

Navedeni beton vrlo visokih čvrstoća u svom sastavu ima drobljeni eruptivni agregat dijabaz maksimalnog promjera zrna do 8 mm, ravna čelična vlakna (duljina/promjer) 20/0,3 mm, mineralni dodatak - silikatnu prašinu, kemijski dodatak - superplastifikator na bazi akrilnog polimera i cement CEM I 52,5 N.

Laboratorijskom analizom ispitana su osnovna mehanička svojstva dobivenog betona vrlo visokih čvrstoća. Od svojstava betona vrlo visokih čvrstoća u svježem stanju ispitana je konzistencija odnosno slijeganje rasprostiranjem betona (metoda *slump-flow*) koja iznosi 530 mm i određena specifična gustoća koja iznosi 25,4 kN/m<sup>3</sup>, a kod očvrstlog betona ispitana je tlačna čvrstoća na uzorcima kocke dimenzije brida 15 cm, vlačna čvrstoća na savijanje na uzorcima prizme dimenzije 10×10×40 cm i određen statički modul elastičnosti na uzorcima prizme istih dimenzija. Na uzorcima mjerodavne mješavine betona vrlo visokih čvrstoća najveća dobivena tlačna čvrstoća iznosi 146 N/mm<sup>2</sup> (srednja vrijednost tlačne čvrstoće iznosi 145 N/mm<sup>2</sup>), a najveća vlačna čvrstoća na savijanje iznosi 33 N/mm<sup>2</sup> (srednja vrijednost vlačne čvrstoće na savijanje iznosi 29 N/mm<sup>2</sup>).

Ispitivanjem statičkog modula elastičnosti betona vrlo visokih čvrstoća dobiven je rezultat na preši  $E_c = 40.000$  N/mm<sup>2</sup>.

Optimizacijom sastava navedenog betona vrlo visokih čvrstoća ustanovljeno je da količina cementa iznad 930 kg/m<sup>3</sup> i superplastifikatora iznad 40 kg/m<sup>3</sup> ne utječu na daljnje povećanje tlačne čvrstoće te da se toplinskim tretmanom - zaparivanjem postiže ne samo znatno veća rana tlačna čvrstoća, nego i veća 28-dnevna tlačna čvrstoća betona koja je redovito za 10 % veća u odnosu na nezaparivane uzorke.

Količina čeličnih vlakana u betonima vrlo visokih čvrstoća ne utječe znatnije na povećanje tlačne čvrstoće, ali znatno utječe na povećanje njihovih vlačnih čvrstoća savijanjem (i do 30 %, usporedbom mješavina betona s najmanjim i najvećim volumnim postotkom vlakana) i na povećanje njihove duktilnosti.

Konačni cilj ovih istraživanja za dobivanje mjerodavne mješavine betona vrlo visokih čvrstoća jest njegova primjena u izradi predgotovljene prednapete stropne ploče koja bi imala znatnije prednosti u odnosu na do sada rabljene sustave predgotovljenih prednapetih međukatnih konstrukcija od betona običnih čvrstoća, a što će se napraviti u idućim istraživanjima.

Konačni cilj ovih istraživanja za dobivanje mjerodavne mješavine betona vrlo visokih čvrstoća jest njegova primjena u izradi predgotovljene prednapete stropne ploče koja bi imala znatnije prednosti u odnosu na do sada rabljene sustave predgotovljenih prednapetih međukatnih konstrukcija od betona običnih čvrstoća, a što će se napraviti u idućim istraživanjima.

## LITERATURA

- [1] *Tehnički propis za betonske konstrukcije*, Narodne novine br. 101/05, 139/09, 14/10, 125/10
- [2] Richard, P.; Cheyrezy, M.: *Composition of Reactive Powder Concretes*, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, 1995, str 1501-1511
- [3] Cheyrezy, M.; Maret, V.; Frouin, L.: *Microstructural Analysis of RPC (Reactive Powder Concrete)*, Cement and Concrete Research, Vol. 25, No. 7, 1995, str. 1491-1500
- [4] Cheyrezy, M.: *Structural Applications of RPC*, FIP International Conference New Technologies in Structural Engineering, on CD, Lisabon, Portugal, July 2-5, 1997
- [5] Ductal, Introduction to Ductal Frequently Asked Questions, <http://www.ductal.com>
- [6] Matokić, D.; Pičulin, S.; Radić, J.: *Međukatne prednapete ploče od betona ultravisokih čvrstoća*, Prvi hrvatski dani betona, Zbornik radova, Cavtat 13.-15. listopada 2005
- [7] <http://www.nexe.hr/UserDocsImages/katalozi/rasuti.pdf>
- [8] <http://plantrans3.peak.at/hr> (Dijabaz-Banovići, BiH)
- [9] <http://www.radlovac.hr/> (IGM Radlovac d.d.)
- [10] <http://www.basf.hr/ecp2/Croatia/en/> (BASF Hrvatska, Ludbreg)
- [11] <http://www.fibrin.at> (Krampe Harex Fibrin, Linz, Austria)