

# PROCJENA TLAČNE ČVRSTOĆE BETONA

Mario Juričić<sup>1</sup>, Donka Wurth<sup>2</sup>, Igor Gukov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tehničko veleučilište Zagreb

<sup>2</sup>Institut IGH, d.d., Zagreb

## Sažetak

Opisani su rezultati istraživanja fizikalno mehaničkih svojstava očvrstulog betona napravljenih u sklopu završnog rada na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu. Istraživanje je provedeno na betonskim uzorcima kocke izrađenim od različitih mješavina betona. Korištene su tri vrste cementa, dva superplastifikatora s različitim v/c omjerom. Tlačna čvrstoća betona ispitana je na ukupno 126 uzorka različite starosti. Na osnovu rezultata ispitivanja određena je funkcionalna ovisnost tlačne čvrstoće betona o vremenu, a time i procjena tlačne čvrstoće temeljem ranih čvrstoća. Dobiveni izraz uspoređen je s izrazima prema Eurokodu i ACI 209. Prikazana je i funkcionalna ovisnost v/c omjera i tlačne čvrstoće betona.

**Ključne riječi:** beton, tlačna čvrstoća, v/c omjer, superplastifikator

## Abstract

Study of physical-mechanical properties of hardened concrete was made as a part of the final work at the Polytechnic of Zagreb. Cube concrete specimens were made using various concrete recipes. Three kinds of cement and two superplasticators were used with various w/c ratios. Compressive strength of concrete was tested on 126 specimens of different ages. Results were used to determine functional dependence of compressive strength on time, and thus an estimate of the compressive strength based on the early strength. The expression obtained is compared with Eurocode and ACI 209. Also the functional dependence of w / c ratio and compressive strength of concrete is given.

## 1. UVOD

Beton je nehomegen materijal, čija kvaliteta ovisi o većem broju parametara. Ispitivanjem tlačne čvrstoće betona dokazuje se osnovno mjerilo kvalitete betona. Tlačna čvrstoća betona zavisi od velikog broja čimbenika među kojima su najvažniji: vrsta, razred i udio cementa, kakvoća i udio agregata, vodocementni omjer, utjecaj dodatka, način ugradnje, način njege betona. [1], [2]. Procjena tlačne čvrstoće betona, kao i procjena konačne čvrstoće betona na osnovu ranih rezultata ispitivanja važna je u mostovima, prednapetom betonu, visokim građevinama i drugim konstrukcijama koje iskorištavaju materijale do granica njihovih dopustivih vrijednosti. Cilj istraživanja bio je na osnovu rezultata ispitivanja odrediti funkcionalnu ovisnost tlačne čvrstoće betona u vremenu te time procijeniti tlačnu čvrstoću temeljem ranih čvrstoća.

Prilikom izrade uzoraka, zbog velikog broja uzoraka, konzistencija se nije mjerila, ali beton je imao tekuću konzistenciju. Promjenom vodocementnog omjera mijenjala se količina superplastifikatora u betonu uz zadovoljavanje iste obradljivosti. Smanjenjem količine vode u betonu dolazi do smanjenja poroznosti betona [3], te se povećava tlačna čvrstoća betona [4].

## 2. OPIS ISTRAŽIVANJA

Ispitivanje tlačne čvrstoće betona provedeno je na uzorcima kocki izrađenim od 18 mješavina betona. U istraživanju su korištene tri vrste cementa i dvije vrste superplastifikatora. Tlačna čvrstoća betona ispitivana je na 126 uzoraka kocke brida 150 mm. Uzorci su bili različite starosti, od 1, 3, 7, 14, 21 i 28 dana. Za potrebe ispitivanja korišteni su sljedeći materijali:

Cement: - CEM II/B-M (S-L) 42,5N  
- CEM II/A-M (S-V) 42,5N  
- CEM II/B-M (S-V) 42,5 N

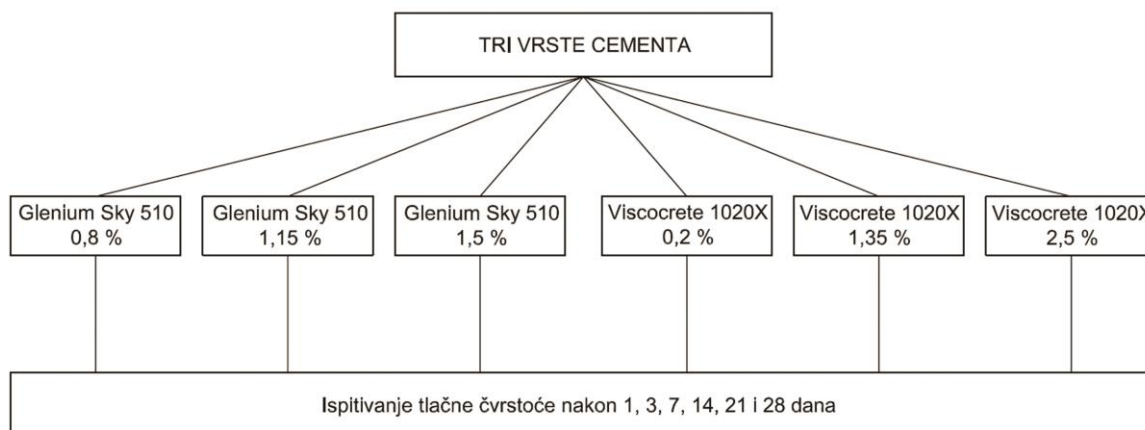
Agregat: - prirodni separirani 0/4, 4/8,  
8/16 mm

- drobljeni 0/4 mm

Aditivi: - D1 - doziranje 0,8-1,5% na masu  
cementa

- D2 - doziranje 0,2-2,5% na masu  
cementa

Voda: - gradski vodovod Zagreb

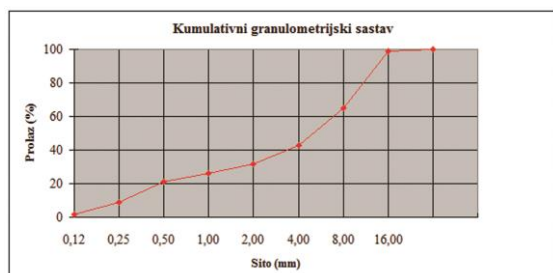


Slika 1. Probna tijela su izrađena od različitih mješavina betona

Prije izrade sastava betona provedena su ispitivanja agregata: granulometrijski sastav agregata i ispitivanje vlažnosti agregata. Na slici 1. prikazana je kumulativna granulometrijska krivulja, granulometrijski sastav svih pojedinih frakcija te preporučene granične krivulje B16 i A16. Kumulativni sastav agregata dan je u tablici 1.

Tablica 1. Kumulativni granulometrijski sastav agregata

frakcija (mm)	udio (%)	0,12	0,25	0,5	1	2	4	8	16
0-4p	29	0,93	6,50	17,08	20,04	22,82	27,99	29,00	29,00
0-4d	13	0,86	2,60	4,12	6,05	8,96	12,71	13,00	13,00
4-8	20						1,60	19,28	19,82
8-16	38						0,42	3,61	37,05
kumul.	100	1,79	9,10	21,20	26,09	31,78	42,72	64,89	98,87



Slika 2: Granulometrijske krivulje

Tablica 2. Sastav betona bez kemijskih dodataka.

materijal	masa za (kg)	gustoća (kg/dm <sup>3</sup> )	volumen (dm <sup>3</sup> )
CEMENT	365	3,0	121,7
VODA	189	1,0	189,0
v/c...0,52	-	-	-
ZRAK 2%	-	-	20,0
AGREGAT	1780	2,66	669,3
UKUPNO	2334	2,33	1000,0

Povećanjem količine superplastifikatora dolazi do povećanja konzistencije svježeg betona (slika 2) pri istom vodocementnom faktoru, odnosno primjenom superplastifikatora dolazi do redukcije vode te smanjenja vodocementnog faktora za istu konzistenciju. U tablici 3 prikazane su vrijednosti količine i vrste superplastifikatora s pripadajućim v/c omjerima, a koji su upotrebljeni u ovom istraživanju.

Tablica 3. Količina superplastifikatora i v/c omjer

Aditiv	Količina aditiva (%)	v/c omjer
-	-	0,52
D1	0,80	0,48
D1	1,15	0,42
D1	1,50	0,38
D2	0,20	0,46
D2	1,35	0,41
D2	2,50	0,37

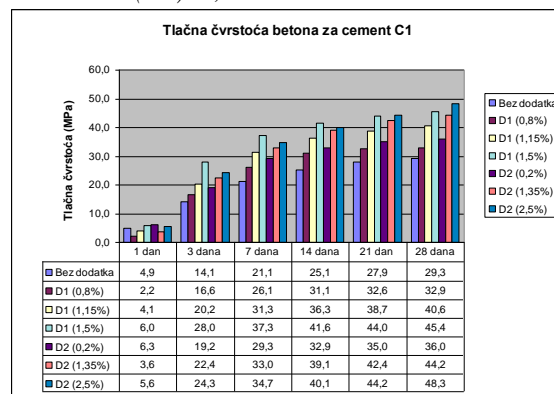


Slika 3. Mješavina betona prije i nakon dodavanja aditiva

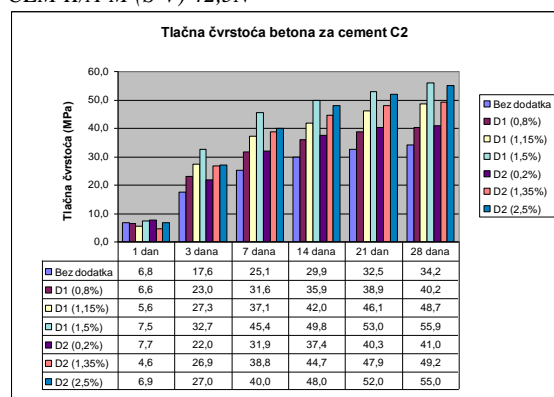
### 3. REZULTATI ISPITIVANJA

U tablicama 4, 5 i 6 prikazane su tlačne čvrstoće betona (MPa) za pojedine vrste cementa i starost betona. Ispitivanje tlačne čvrstoće je provedeno prema normi HRN EN 12390-3.[5], [6], [7].

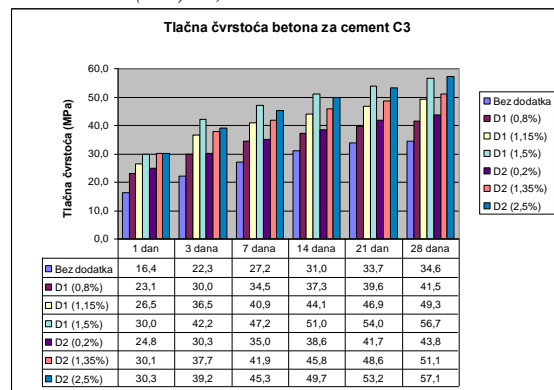
Tablica 4. Tlačne čvrstoće betona (MPa) sa cementom CEM II/B-M (S-L) 42,5N



Tablica 5. Tlačne čvrstoće betona (MPa) sa cementom CEM II/A-M (S-V) 42,5N



Tablica 6. Tlačne čvrstoće betona (MPa) sa cementom CEM II/B-M (S-V) 42,5 N



### 4. PROMJENA TLAČNE ČVRSTOĆE BETONA U VREMENU

Na osnovu svih prikazanih rezultata različitih mješavina napravljena je srednja vrijednost promjene tlačne čvrstoće betona u vremenu, tablica 7. Podaci u tablici određeni su kao srednja vrijednost 21 različite mješavine betona.

Tablica 7. Promjena tlačne čvrstoće betona u vremenu

dani (t)	$f_{cm}(t)/f_{cm}(28)$
1	0,27
3	0,59
7	0,78
14	0,89
21	0,96
28	1,00

Gdje je:

$f_{cm}(t)$  je srednja vrijednost tlačne čvrstoće betona u nekom trenutku vremena,  
 $f_{cm}(28)$  je srednja vrijednost tlačne čvrstoće betona nakon 28 dana,  
 $t$  je starost betona u danima.

Dobivene vrijednosti interpolirane su većim brojem različitih funkcija među kojima su najbolje rezultate dale sljedeće funkcije:

- Modificiran Hoerlov model(koeficijent korelacije: 0,99992)
- Vapor pressure model(koeficijent korelacije: 0,99992)
- Weibullov model(koeficijent korelacije: 0,99978)

#### 4.1. Modificiran Hoerlov model

$$f_{cm}(t) = f_{cm} \left( a \cdot b^{1/t} \cdot t^c \right) \quad (1)$$

Gdje su koeficijenti:

$$\begin{aligned} a &= 0,73171607 \\ b &= 0,37016168 \\ c &= 0,10397179 \end{aligned}$$

Standardna greška: 0,00455

Koeficijent korelacije: 0,99992

#### 4.2. Vapor pressure model

$$f_{cm}(t) = f_{cm} \left( e^{\frac{a+b}{t} + c \ln t} \right) \quad (2)$$

Gdje su koeficijenti:

$$\begin{aligned} a &= -0,3123624 \\ b &= -0,99381529 \\ c &= 0,10397175 \end{aligned}$$

Standardna greška: 0,00455

Koeficijent korelacije: 0,99992

#### 4.3. Weibullov model

$$f_{cm}(t) = f_{cm} \left( a - b e^{-ct^d} \right) \quad (3)$$

Gdje su koeficijenti:

$$\begin{aligned} a &= 1,1751652 \\ b &= 6,0891464 \\ c &= 1,908252 \\ d &= 0,18378739 \end{aligned}$$

Standardna greška: 0,00915

Koeficijent korelacije: 0,99978

Poznato je nekoliko jednadžbi kojima se može opisati povećanje tlačne čvrstoće betona u vremenu pri njegovanju na konstantnoj temperaturi. U nastavku su prikazane dvije najpoznatije, prema Eurokodu [5] i ACI propisu [9].

#### 4.3. Prema Eurokodu

Prema Eurokodu, HRN EN 12390, [5], odnosno CEB-FIP Models Code, [8], promjena tlačne čvrstoće betona u vremenu, za uzorke njegovane na 20°C, može se procijeniti prema izrazu:

$$f_{cm}(t) = f_{cm} \cdot \beta_{cc}(t) \quad (4)$$

Gdje je koeficijent  $\beta_{cc}$  u funkciji vremena:

$$\beta_{cc}(t) = e^{s \cdot \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{0.5} \right]} \quad (5)$$

$f_{cm}(t)$  je srednja vrijednost tlačne čvrstoće betona u nekom trenutku vremena,  
 $f_{cm}$  je srednja vrijednost tlačne čvrstoće betona nakon 28 dana,  
 $\beta_{cc}(t)$  je koeficijent ovisan o starosti betona,  
 $t$  je starost betona u danima.  
 $s$  je koeficijent ovisan o vrsti cementa:

$s = 0,20$  za cement klase (R) (CEM 42,5R, CEM 52,5)

$s = 0,25$  za cement klase (N) (CEM 32,5R, CEM 42,5)

$s = 0,38$  za cement klase (S) (CEM 32,5)

#### 4.3. Prema ACI propisu

Prema ACI Odboru 209, [9] promjena tlačne čvrstoće u vremenu opisuje se prema izrazu:

$$f_c(t) = f_c(28) \cdot \frac{t}{\alpha + \beta \cdot t} \quad (6)$$

Koeficijenti  $\alpha$  i  $\beta$  ovise o vrsti cementa. Za beton njegovan u vlazi spravljen s normalnim portland cementom (ASTM Tip I):

$$f_c(t) = f_c(28) \cdot \frac{t}{4 + 0,85 \cdot t} \quad (7)$$

Za portland cement (ASTM Tip III):

$$f_c(t) = f_c(28) \cdot \frac{t}{2,3 + 0,92 \cdot t} \quad (8)$$

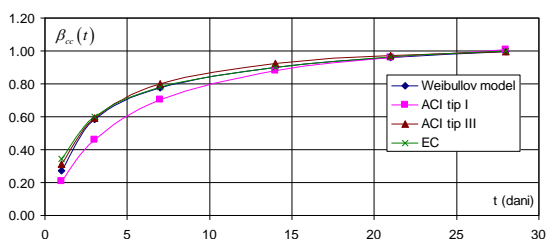
#### 4.3. Usporedba promjene tlačne čvrstoće betona

U tablici 8 prikazana je usporedba koeficijenta  $\beta_{cc}(t)$  koji opisuje vremensku promjenu tlačne čvrstoće betona. Zbog usporedbe dane su vrijednosti prikazanih izraza do 50 godina. Postoji veće odstupanje u konačnim vrijednostima. Eurokod (EC) pokazuje 27% veću čvrstoću nakon 50 godina u odnosu na 28 dana, dok kod ACI izraza to iznosi 18%.

Tablica 8. Koeficijent ovisan o starosti betona,

Vrijeme (t) dani	Izmjereno	Weibullov model $(a - be^{-ct^d})$	EC $e^{0,25 \left[ 1 - \left( \frac{28}{t} \right)^{0,5} \right]}$	ACI Tip I $\frac{t}{4 + 0,85 \cdot t}$	ACI Tip III $\frac{t}{2,3 + 0,92 \cdot t}$
1	0,27	0,27	0,34	0,21	0,31
3	0,59	0,59	0,60	0,46	0,59
7	0,78	0,78	0,78	0,70	0,80
14	0,89	0,90	0,90	0,88	0,92
21	0,96	0,96	0,96	0,96	0,97
28	1,00	1,00	1,00	1,01	1,00
365		1,15	1,20	1,16	1,08
730		1,17	1,22	1,17	1,08
1095		1,17	1,23	1,17	1,08
18250		1,18	1,27	1,18	1,09

Kao što je vidljivo na slici 4, razlike su zanemarive u izrazima prema Eurokodu i ACI tip III u odnosu na izmjerene vrijednosti. Isto tako postoji veće odstupanje krivulje ACI tip I koja bi trebala biti mjerodavna za ovu vrstu cementa.



Slika 4. Vremenska promjena tlačne čvrstoće betona

Od prikazanih funkcija kojima su interpolirani rezultati ispitivanja ne postoje razlike u području do 28 dana. Za konačnu funkciju odabran je Weibullov model zbog boljih ekstrapolacijskih vrijednosti. Prema tom modelu može se procijeniti konačna čvrstoća betona prema izrazu:

$$f_{cm}(28) = \frac{f_c(t)}{(a - be^{-ct^d})} \quad (9)$$

Gdje su koeficijenti:

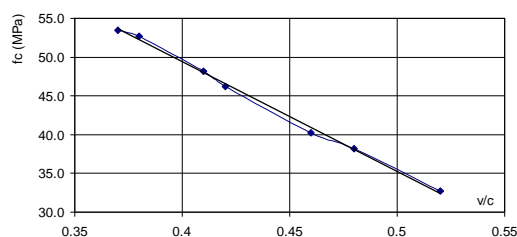
$$\begin{aligned} a &= 1,1751652 \\ b &= 6,0891464 \\ c &= 1,908252 \\ d &= 0,18378739 \end{aligned}$$

$f_c(t)$  je vrijednost tlačne čvrstoće betona u intervalu od 1 do 28 dana.

## 5. UTJECAJ V/C OMJERA NA TLAČNU ČVRSTOĆU BETONA

Ispitivani uzorci su imali različitu količinu superplastifikatora i različite vodocementne omjere. Za prikazane recepture betona dobivena je približno linearna funkcionalna ovisnost v/c omjera na tlačnu čvrstoću betona (slika 5.):

$$f_c = -141 \cdot v/c + 106 \quad (10)$$



Slika 5. Utjecaj v/c omjera na tlačnu čvrstoću betona

## 6. ZAKLJUČAK

Procjena razvoja tlačne čvrstoće betona kao i procjena konačne čvrstoće betona na osnovu ranih rezultata ispitivanja važna je u mostovima, prednapetom betonu, visokim građevinama i drugim konstrukcijama koje iskorištavaju materijale do granica njihovih dopustivih vrijednosti. U radu je dan izvorni izraz za vremensku promjenu tlačne čvrstoće betona do 28 dana. Prikazana su tri izraza od

kjih je odabran Weibullov model zbog boljih ekstrapolacijskih vrijednosti. Ispitivani su uzorci napravljeni od različitih mješavina i upotrebljeni su najzastupljeniji cementi u Hrvatskoj. Korišteni su i superplastifikatori i različiti v/c omjeri. Kod različitih vrsta cementa primjećena su veća odstupanja u čvrstoćama kako ranim već nakon jednog dana, tako i nakon 28 dana. Upotrebom superplastifikatora te smanjenjem v/c omjera, dobivene su do 60% veće tlačne čvrstoće betona u odnosu na betone bez dodataka.

## 7. LITERATURA

- [1] Radić, J. (2006), Betonske konstrukcije – Priručnik, Andris
- [2] Tomičić, I. (1996),: Betonske konstrukcije, DHGK, Zagreb,
- [3] Đureković, A. (1996), Cement, cementni kompozit i dodaci za beton, Zagreb
- [4] Ukrainczyk, V. (1994), Beton – Struktura svojstva tehnologija, Alcor, Zagreb
- [5] HRN EN 12390, (2012), Ispitivanje očvrstlog betona, Hrvatski zavod za norme
- [6] HRN EN 12504, (2012), Ispitivanje betona u konstrukcijama, Hrvatski zavod za norme
- [7] HRN EN 12350, (2010), Ispitivanje svježeg betona, Hrvatski zavod za norme
- [8] CEB-FIP (1990) Comité Euro-International du Béton, CEB-FIP Model Code 1990, First Draft, Lausanne, Mar., (Information Bulletin No. 195).
- [9] American Concrete Institute (ACI) (1978), ACI Committee 209, Subcommittee II. Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects, 2; Draft Report, Detroit, Oct.
- [10] Sekulić D., Mikulić D., Kuzminski D. (1998), Utjecaj mikrostrukture cementne paste na tlačnu čvrstoću betona, Građevinar 50, 145-152.

**Mario Juričić bacc. ing. aedif.**, završio je trogodišnji stručni studij graditeljstva na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu, smjer visokogradnja, nakon čega je upisao specijalistički diplomski stručni studij. Od 1999. do danas zaposlen je u tvrtki Juričić Invest d.o.o., kao voditelj laboratorija za ispitivanje građevnih materijala i proizvoda.

**Dr.sc. Igor Gukov dipl. ing. građ.** diplomirao je na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, gdje je i magistrirao i doktorirao. Prvo na Građevinskom fakultetu, a od 2005. godine na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu, bavi se betonskim konstrukcijama, mostovima i programiranjem. Sudjelovao je u radu na 22 stručna i tri znanstvena projekta. Kao autor ili koautor objavio je 42 rada, objavljena u domaćim i međunarodnim publikacijama. Kao viši predavač nositelj je predmeta Betonske konstrukcije I, Betonske konstrukcije II, Mostovi i Armiranobetonske inženjerske konstrukcije na Tehničkom veleučilištu u Zagrebu te voditelj brojnih završnih i diplomskih radova.

**Mr.sc. Donka Würth, dipl.ing.građ.** diplomirala je i magistrirala na Građevinskom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu i usavršavala se na Institutu Eduardo Torroja u Madridu. Ovlašteni je projektant. Ekspert. U Institutu IGH u Zagrebu voditelj ispitivanja svojstava svježeg i očvrstlog betona, radi u Laboratoriju za materijale na ispitivanjima kemijskih dodataka betonu, predgotovljenih proizvoda i sustavima za zaštitu i popravak konstrukcija. Vodila je istražne radove na armiranobetonskim konstrukcijama te tehnološki nadzor na sanacijama nadvožnjaka i mostova. Projektant je sastava betona i samozbijajućeg betona. Član ocjenitelj Certifikacijskog odbora (Institut IGH) u području mortova i kontrole kvalitete tvorničke proizvodnje betona. Predavač je Građevinskih materijala na TVZ.