

Osobine očvrstlog betona

Predavanje, 22.11.2016.



Pripremili:
Van.prof.dr.Merima Šahinagić-Isović
Viši ass.mr.Marko Čećez

SADRŽAJ

- Struktura očvrslog betona
- Voda u očvrslom betonu
- Prsline i pukotine
- Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona
 - Osnovni zakoni čvrstoće materijala
 - Čvrstoća betona pri pritisku
 - Čvrstoća betona pri zatezanju
 - Čvrstoća betona pri čistom smicanju
 - Vodonepropustljivost betona
 - Otpornost prema dejstvu mraza
 - Otpornost prema dejstvu mraza i soli
 - Otpornost na habanje
 - Otpornost na hemijske agense
 - Deformacije pod uticajem kratkotrajnih opterećenja



Struktura očvrslog betona

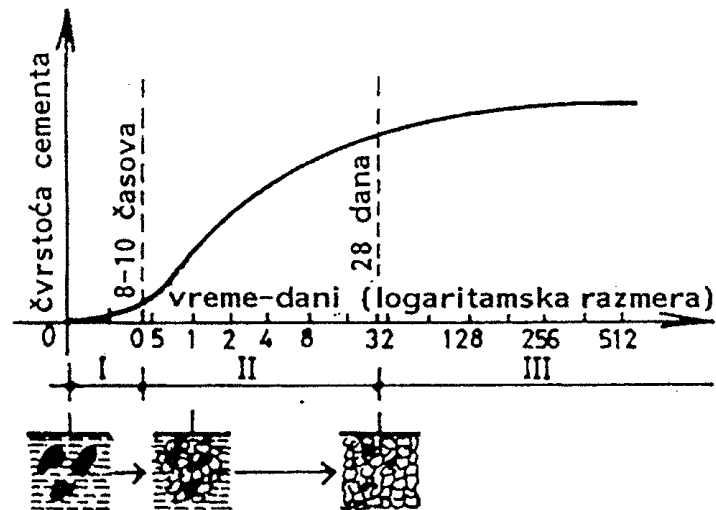


- Svojstva očvrslog betona zavise:

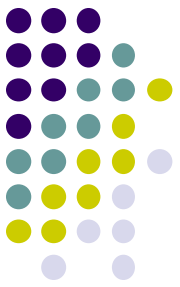
- ⇒ Karakteristika komponenata
- ⇒ Strukture mješavine

- Formiranje strukture:

- ⇒ I etapa: početna etapa, etapa formiranja početne strukture, cementna masa svježeg betona počinje da prelazi u čvrsto agregatno stanje (usljed vezivanja)
- ⇒ II etapa: postepeno formiranje strukture očvrslog betona koju prati povećanje čvrstoće
- ⇒ III etapa: stabilizacija strukture, kada se dostignuta čvrstoća tokom vremena bitnije ne mjenja



Struktura očvrslog betona



● Tipovi makrostrukture očvrslog betona:

⇒ struktura I:

⇒ zrna **agregata** su na velikim rastojanjima, međudejstvo ne postoji, utiču samo na dijelove **cementnog kamena** sa kojima su u dodiru (uticaj zrna proporcionalan sadržaju zrna i specifičnoj površini)

⇒ struktura II

⇒ cementni kamen obavija zrna (do 0,06mm) i ispunjava praznine između njih, dejstva pojedinih zrna se preklapaju, javlja se dopunski efekat trenja

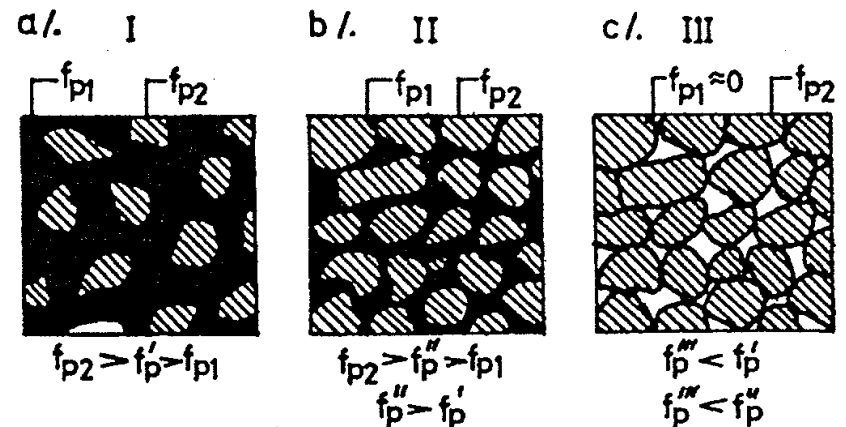
⇒ struktura III

⇒ manjak cementnog kamena, obavija zrna agregata u slojevima male debljine, a praznine između njih ispunjava samo djelomično

$$\overline{v_a} + \overline{v_{cp}} + \overline{v_p} = 1$$

$$\overline{v_{cp}} \approx \overline{v_{ck}}$$

$$\overline{v_{ck}} = 1 - \overline{v_p} - \overline{v_a}$$



Struktura očvrslog betona



- Osnovni strukturni elementi:

- ⇒ Agregat

- ⇒ Cementni kamen

- Mikrostruktura betona:

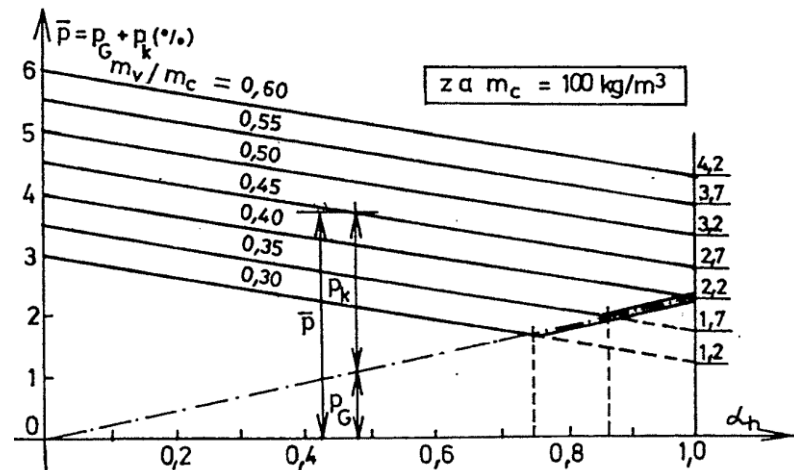
- ⇒ Poroznost:

- ⇒ agregat: nije od interesa sa aspekta upijanja, kvašenja zidova zrna

- ⇒ cementni kamen: gelska (p_G), kapilarna (p_k) i Δp (neefikasno ugrađivanje, primjena aeranata, <5-6%)

- ⇒ Kontaktni sloj (0,06mm): ima veću poroznost od ostale mase cementnog kamena

$$p = p_G + p_k + \Delta p (\%)$$





Voda u očvrslom betonu

- Cementni kamen sadrži:

- ⇒ hemijski vezanu vodu: cementni gel
- ⇒ međuslojnu vodu: dio gelske vode, 10^{-6} mm
- ⇒ apsorbovanu vodu: gelska voda cementnog kamena
- ⇒ slobodnu vodu: kapilarne pore cementnog kamena
- ⇒ vodenu paru: kapilarne pore i veće šupljine cementnog kamena

Prsline i pukotine u betonu

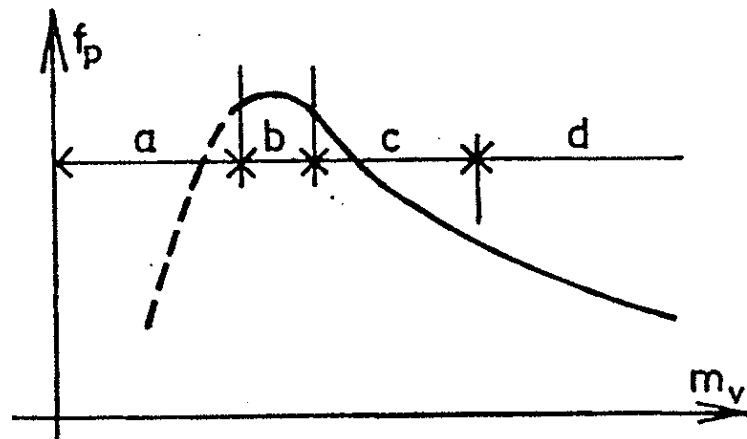
- ⇒ Prsline: defekti sa otvorima $< 0,3$ mm
- ⇒ Pukotine: defekti sa otvorima $\geq 0,3$ mm
- ⇒ Uzroci nastajanja:
 - ⇒ skupljanje cementa i termički naponi (nije izložen opterećenju)
 - ⇒ izloženost opterećenjima
- ⇒ fenomen “samozalječnja”: hidratacija nehidratiranih čestica i karbonatizacija



Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

● Osnovni zakoni čvrstoće betona

- ⇒ Odnos čvrstoća betona - količina vode za $m_c = \text{const}$, $m_a = \text{const.}$, te isti postupak kompaktiranja
 - ⇒ područje “a”: nedovoljno kompaktiran beton (kruta konzistencija)
 - ⇒ područje “b”: najbolje kompaktiranje, optimalni sadržaj vode (plastična konzistencija)
 - ⇒ područje “c”: čvrstoća opada, poroznost raste (tečna konzistencija)
 - ⇒ područje “d”: segregacija betona





Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

● Osnovni zakoni čvrstoće betona

⇒ Čvrstoća betona (za $m_c = \text{const}$) zavisi: od vodocementnog faktora i stepena zbijenosti (kompaktnosti)

⇒ Empirijski obrasci:

⇒ Beljajev:
$$f_{k,28} = \frac{f_{pc}}{k \cdot \omega^{1,5}}$$

riječni šljunak $k=4,0$

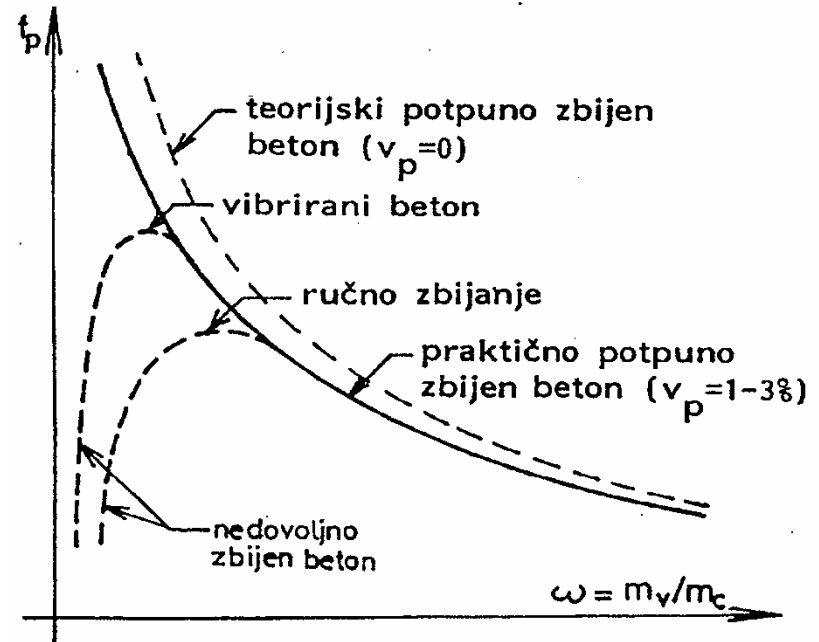
drobljeni kamen $k=3,5$

⇒ Fere:
$$f_{k,28} = \frac{k}{\left(1 + \omega \frac{\gamma_{sc}}{\gamma_{sv}}\right)^2}$$

cement klase 25 – $k = 180$ MPa
cement klase 35 – $k = 250$ MPa
cement klase 45 – $k = 320$ MPa
cement klase 55 – $k = 390$ MPa;

⇒ Bolomej:
$$f_{k,28} = A \cdot f_{pc} \frac{1 - 0,5\omega}{\omega}$$

$A=0,55-0,65$ (manje vrijednosti za betone nižih čvrstoća, agregate lošije granulom.kompozicije)



Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

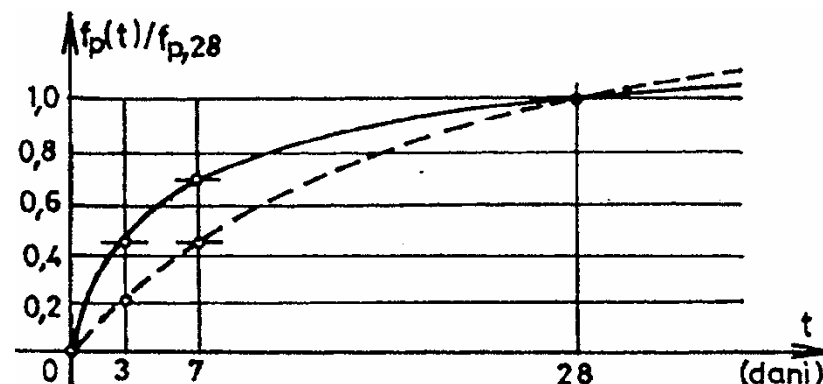


● Osnovni zakoni čvrstoće betona

⇒ Promjena čvrstoće betona u funkciji vremena

⇒ beton spravljeni od PC

⇒ betoni spravljeni od PC sa dodacima

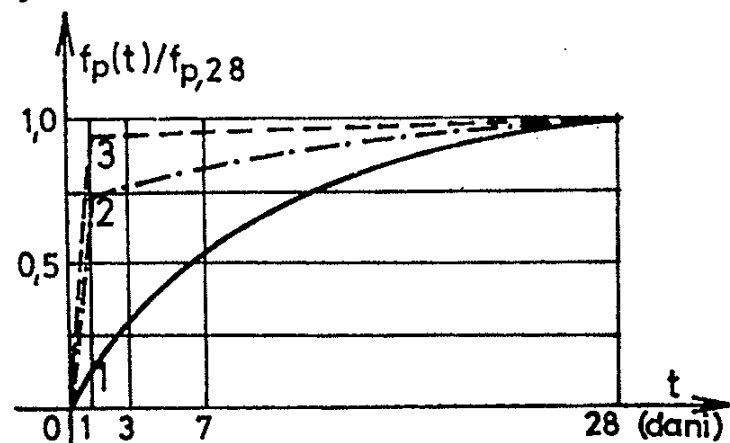


⇒ Čvrstoća betona u funkciji režima očvršćavanja

⇒ Kriva "1" normalni uslovi

⇒ Kriva "2" zaparivanje pod atmosferskim pritiskom
(T= 85°C)

⇒ Kriva "3" autoklavno očvršćavanje pod pritiskom
(vodena para na 0,8MPa, T=175°C)





Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

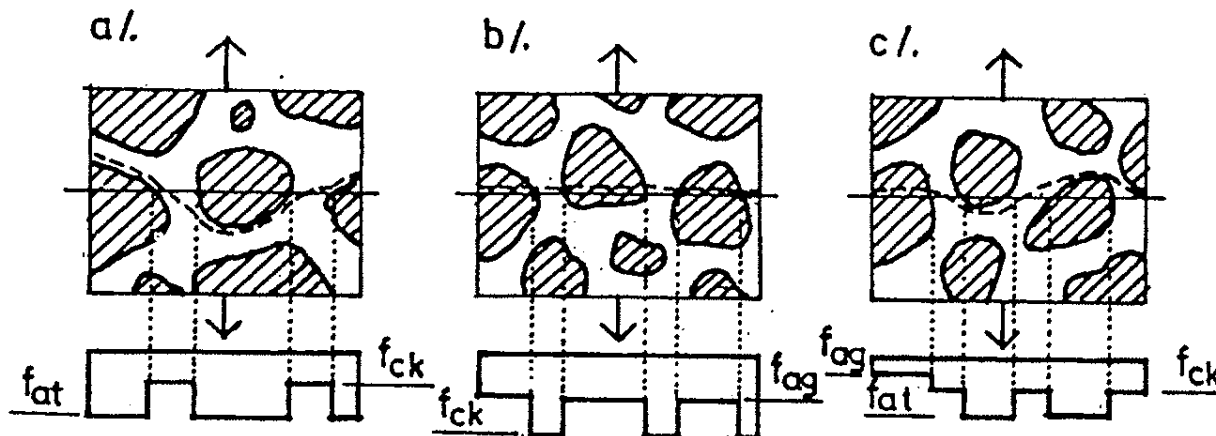
● Osnovni zakoni čvrstoće betona

⇒ Struktura betona je grubo nehomogena

- ⇒ krupan agregat i malterski dio (vazdušne pore i “džepovi”)
- ⇒ cementni kamen i pijesak
- ⇒ cementni kamen (značajna količina pora, nehidratirana zrna cementa)

⇒ Mehanizmi loma: tri osnovna tipa

- ⇒ čvrstoća agregata veća od čvrstoće na zatezanje cementnog kamena (f_{ck})
- ⇒ čvrstoća agregata manja od čvrstoće na zatezanje cementnog kamena (f_{ck})
- ⇒ čvrstoća agregata i čvrstoća na zatezanje cementnog kamena (f_{ck}) bliske





Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

● Čvrstoća betona pri pritisku

- ⇒ cilindar, prizma, kocka
- ⇒ nema značajnijih promjena čvrstoće ($h/a \geq 3$)
- ⇒ kocka 20x20x20cm

Oblik i veličina ispitivanog tijela		Odnos čvrstoće pri pritisku kocke ivice 20cm i odnosnog tijela
Kocka	10 cm	0,90
	15 cm	0,95
	20 cm	1,00
	30 cm	1,08
Prizma	12x12x36 cm	1,25
	20x20x60 cm	1,25
Cilindar	10x20 cm	1,17
	15x30 cm	1,20
	20x40 cm	1,26
	10x10 cm	1,02
	15x15 cm	1,05
	20x20 cm	1,10

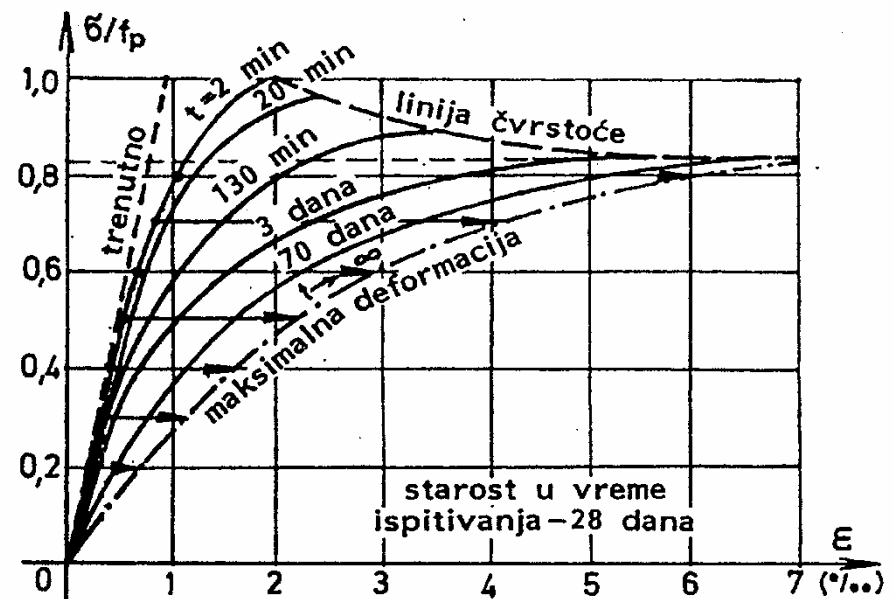
Koeficijenti
konverzije



Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

● Čvrstoća betona pri pritisku

- ⇒ $t=2\text{min}$, brzina porasta opterećenja ($0,2-0,8\text{MPa/s}$)
- ⇒ Na rezultate ispitivanja utiče:
 - ⇒ postupak ugrađivanja betona
 - ⇒ režim njege uzorka
 - ⇒ nominalno najkrupnije zrno agregata
 - ⇒ čvrstoća agregata (20%)
 - ⇒ cementa (klasa i količina)
 - ⇒ voda (v/c faktor)





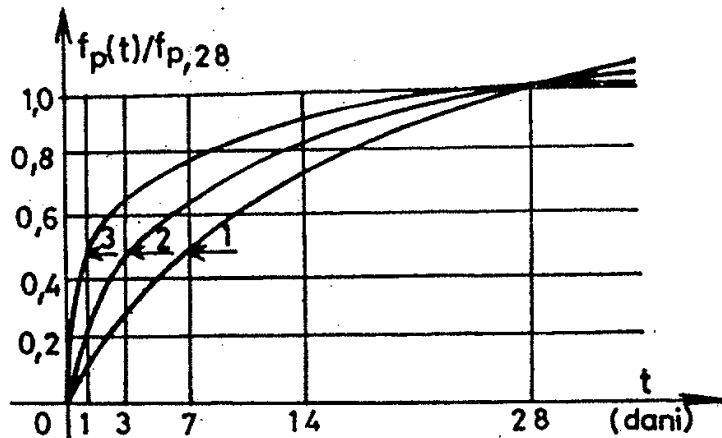
Fizičko-mehaničke osobine očvrstlog betona

● Čvrstoća betona pri pritisku

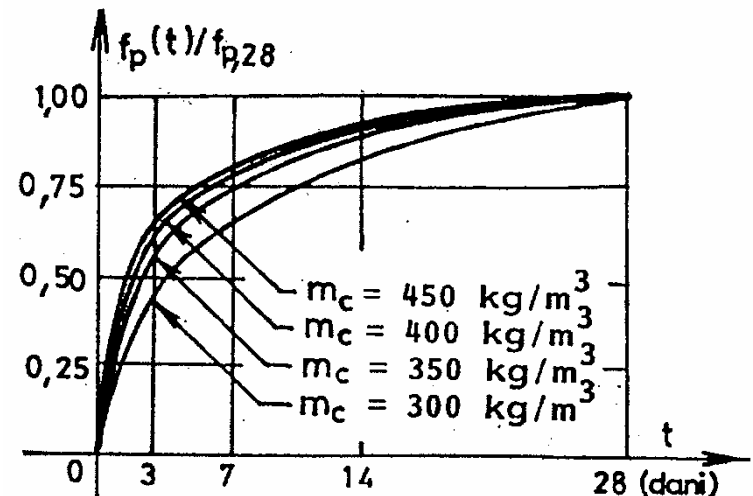
⇒ Promjena čvrstoće tokom vremena: $f_p(t) = f_{p,\infty} \cdot (1 - e^{-at})$
 $f_p(t) = a + b \cdot \ln t$

a- konstanta koja odgovara čvrstoći betona starog 1 dan

b- konstanta koja se određuje na bazi poznate čvrstoće dovoljno starog betona



1. -cementi klasa 25, 35S i 45S
2. -cementi klasa 35B i 45B
3. -cement klase 55

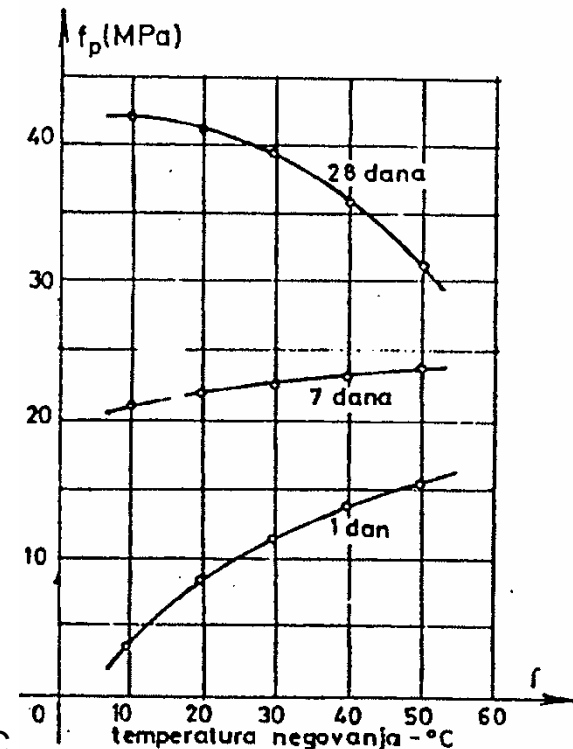
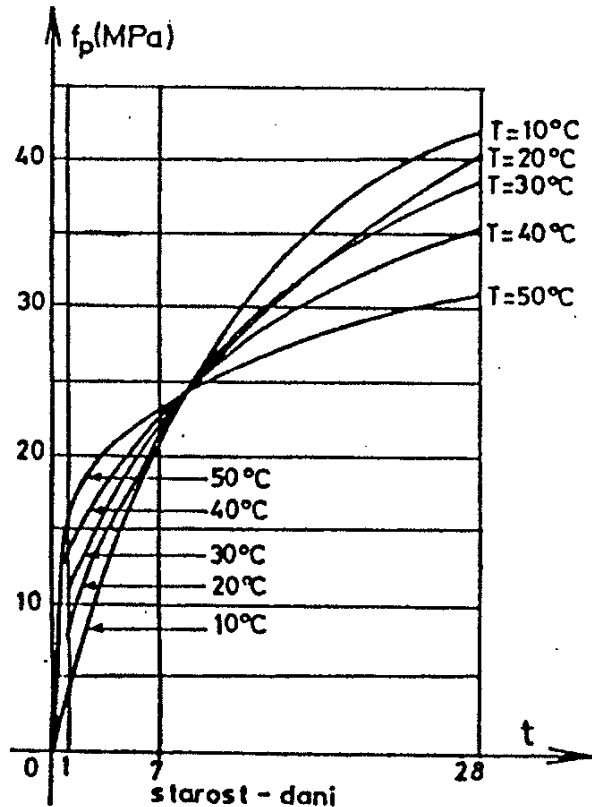




Fizičko-mehaničke osobine očvrstlog betona

- Uticaj temperature i vremena na čvrstoću betona:

- ⇒ normalne (radne) temperature 15-20°C
- ⇒ -10°C hidratacija prestaje, 30°C hidratacija se ubrzava



Beton sa PC
RH=100%



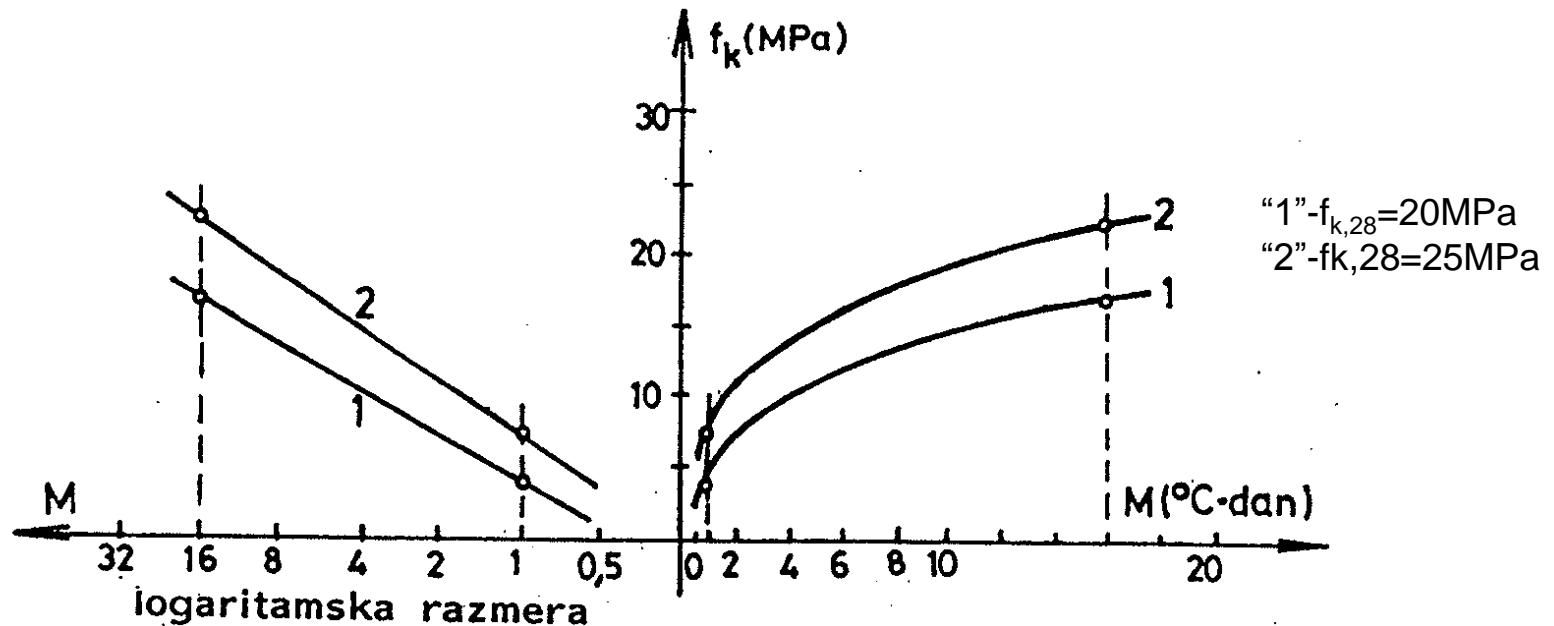
Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

- Funkcija zrelosti (vrijeme·temperatura):

- ⇒ uslovi zimskog betoniranja
- ⇒ kod viših temperatura, pri određivanju čvrstoće betona mlađih od 7 dana

$$M = (T - T_0) \cdot t_r$$

$$M = \sum_{j=1}^{r-1} (\overline{T}_j - t_0) \cdot \Delta t_j$$





Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

- Čvrstoća betona pri pritisku \Rightarrow Marka betona

\Rightarrow normirana (uslovna) čvrstoća, 20x20x20cm, 28 dana

\Rightarrow 20 \pm 4h u kalupima, T=20°C

\Rightarrow do ispitivanja u vodi ili u prostoriji sa RH=95% i T=20°C

\Rightarrow prirast napona od 0,2-0,8MPa/s

\Rightarrow MB10,15,20,25,30,35,40,45,50,55,60

\Rightarrow Tri kriterijuma:

\Rightarrow Kriterijum 1 (3,6,9,12 ili 15 uzoraka)

$$m_3 \geq MB + k_1$$

$$x_1 \geq MB - k_2$$

\Rightarrow Kriterijum 2 (10 \leq n \leq 30)

\Rightarrow poznata vrijednost standardne devijacije

$$S_{no} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{no} (m_{no} - x_i)^2}{no}}$$

$$m_{no} \geq MB + 1,25S_{no}$$

$$x_1 \geq MB - 4(MPa)$$

\Rightarrow Kriterijum 3 (15 \leq n \leq 30)

\Rightarrow procjenjena vrijednost standardne devijacije

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (m_n - x_i)^2}{n-1}}$$

$$m_n \geq MB + 1,3S_n$$

$$x_1 \geq MB - 4(MPa)$$



Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

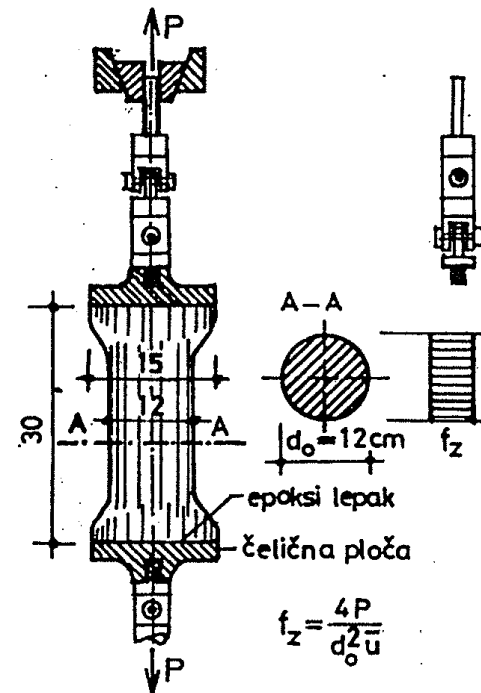
● Čvrstoća betona pri zatezanju:

- ⇒ Zavisí od: vrste i količine agregata, sadržaja cementa, v/c faktora, tehnološkog procesa spravljanja, ugrađivanja, njege i dr.
 - ⇒ drobljeni agregat veće f_z od riječnog agregata
 - ⇒ povećavanjem sadržaja cementa f_z se povećava u manjoj mjeri od f_p
 - ⇒ povećavanjem v/c faktora f_z manje opada u odnosu na f_p
- ⇒ direktno aksijalno zatezanje

$$\kappa = 0,12 \text{ za } f_p = 20\text{MPa}$$

$$\kappa = 0,10 \text{ za } f_p = 30\text{MPa} \quad \kappa = f_p / f_z$$

$$\kappa = 0,07 \text{ za } f_p = 50\text{MPa}$$





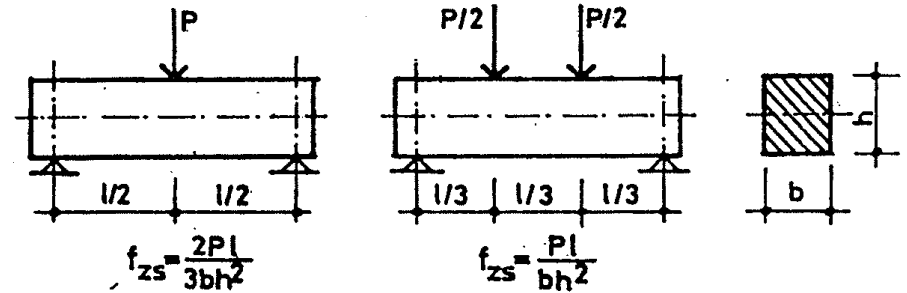
Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

- Čvrstoća betona pri zatezanju:

⇒ savijanjem (JUS U.M1.010 i JUS U.M1.011)

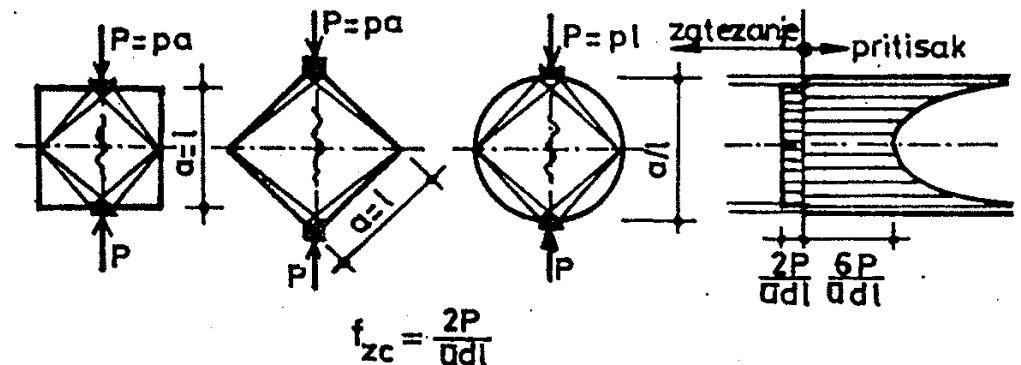
$$f_{zs} = \frac{6M_{gr}}{b \cdot h^2} \quad f_z / f_{zs} = 0,45 - 0,60$$

$$f_{zs} / f_z = 1 - 1,25$$



⇒ cjepanjem putem linijskog pritiska (JUS U.M1.022)

$$f_{zc} = \frac{2P_{gr}}{\pi dl} \quad f_z / f_{zc} = 0,85$$





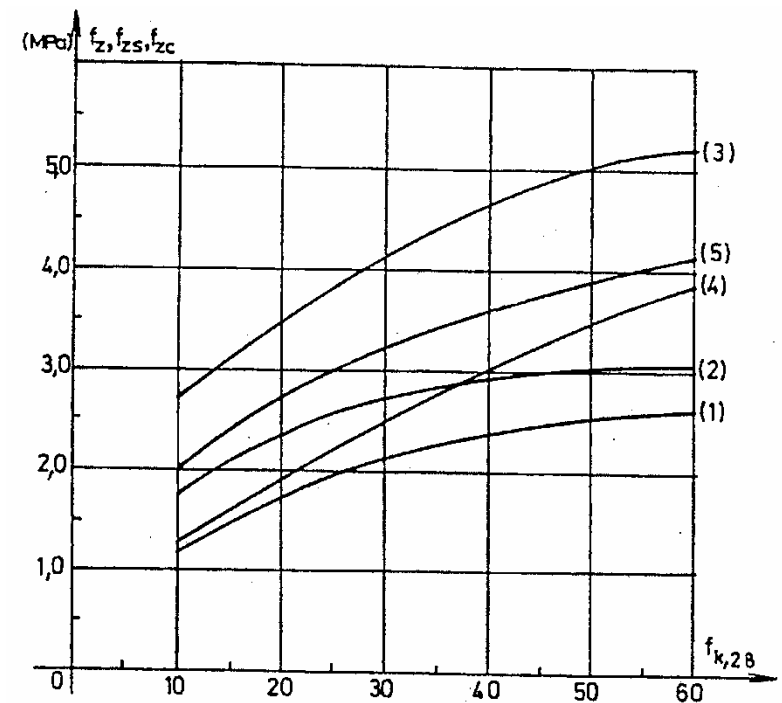
Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

● Čvrstoća betona pri zatezanju:

- ⇒ Kriva (1)- rezultati ispitivanja direktnom metodom
- ⇒ Kriva (2)- rezultati ispitivanja metodom “cijepanja”
- ⇒ Kriva (3)- rezultati ispitivanja putem savijanja jednom koncentrisanom silom
- ⇒ Kriva (4)- veličine izračunate putem izraza (a)
- ⇒ Kriva (5)- veličine izračunate putem izraza (b)

$$(a) \quad f_{zm} = 0,25 \cdot \sqrt[3]{f_{bk}^2}$$

$$(b) \quad \frac{f_{zs}}{f_z} = \left(0,60 + \frac{0,40}{\sqrt[4]{h}} \right) < 1$$





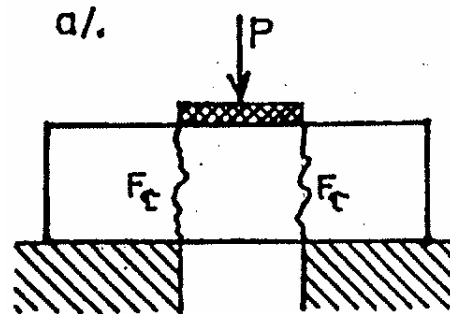
Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

- Čvrstoća betona pri čistom smicanju:

⇒ zavisi od:

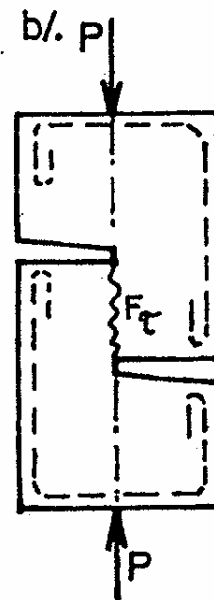
- ⇒ otpornosti na smicanje krupnog agregata (moždanici),
- ⇒ čvrstoće spoja (adhezije između agregata i cementnog kamena)

⇒ pretpostavka je da su naponi smicanja pri lomu ravnomjerno raspoređeni po površini presjeka po kojoj se vrši smicanje



$$a/. \tau_c = \frac{P}{2F_c}$$

$$b/. \tau_c = \frac{P}{F_c}$$



$$f_{\tau} = (0,07 - 0,08) \sqrt{f_p \cdot f_z}$$

$$f_{\tau} \cong 2f_z$$

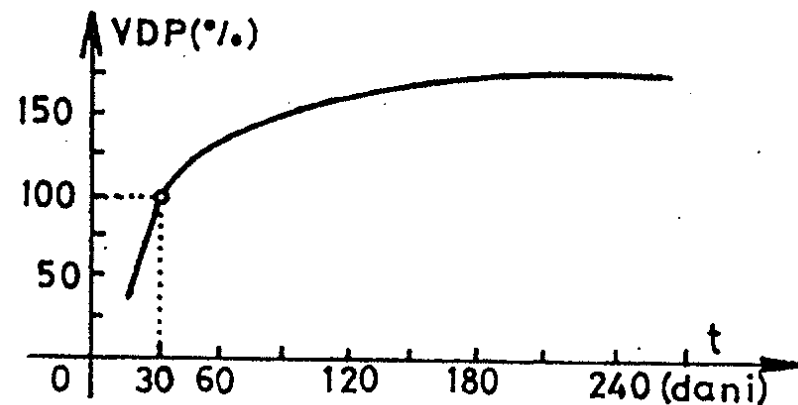
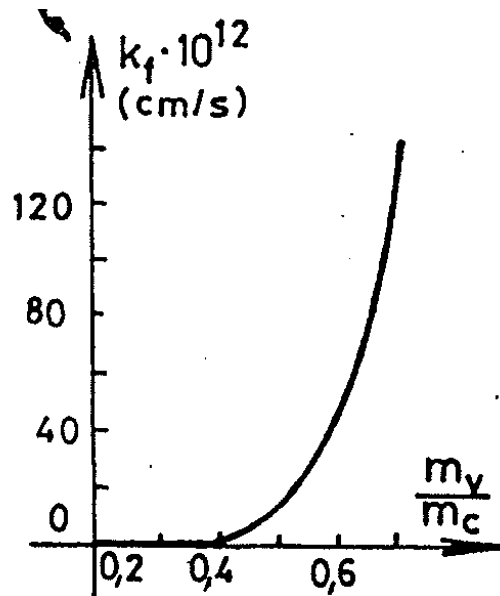


Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

● Vodonepropustljivost betona

- ⇒ zavisi od: vodocementnog faktora, stepena hidratacije cementa, od poroznosti cementnog kamena, **strukture pora** (otvorene i zatvorene pore), svojstva cementa i agregata, načina ugrađivanja, njege i dr.
- ⇒ mikrokapilari do 10^{-7} mm (gelske pore) ⇒ ne utiču na ovu osobinu
- ⇒ makrokapilari preko 10^{-7} mm (kapilarne pore) ⇒ utiču na ovu osobinu
- ⇒ VDP (koeficijent filtracije):

$$k_f = \frac{Q_{fv} \cdot a}{S \cdot \Delta p \cdot t} \left(\frac{m}{s} \text{ ili } \frac{cm}{s} \right)$$

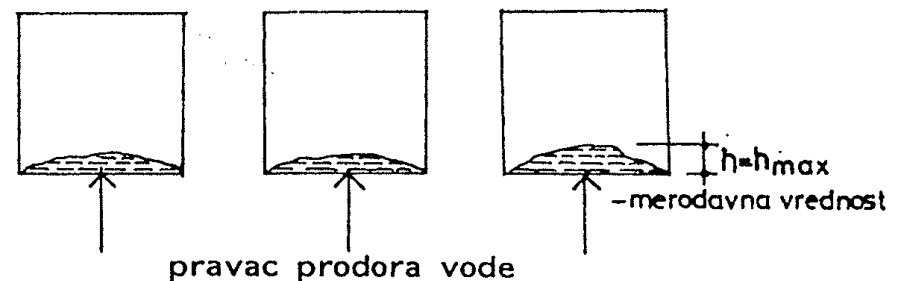
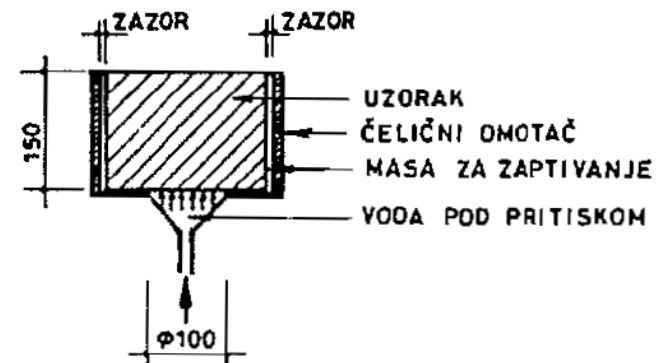




Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

● Vodonepropustljivost betona

- ⇒ JUS U.M1.015: VDP
- ⇒ Cilindar: 150/150mm (ili ploča: 200x200x150mm)
- ⇒ donja površina prečnika 100mm ohrapavi se i izlaže pritisku
- ⇒ uzorci stari 28 dana, 7 dana prije početka ispitivanja u prostoriju sa RH=65% i T= 20°C
- ⇒ marka vodonepropusnosti:
 - ⇒ V-2 (3 uzorka)
 - ⇒ V-4, V-6, V-8 i V-12 (6 uzoraka)
- ⇒ DIN 1048: dubina kvašenja
- ⇒ kocka: 20cm, 3 uzorka
- ⇒ 1bar 48h, 3bara 24h, 7 bara 24h
- ⇒ $h < 12\text{cm}$, danas $h \leq 4\text{cm}$





Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

● Otpornost prema dejstvu mraza

- ⇒ JUS U.M1.016
- ⇒ zavisi od: kompaktnosti betona (kapilarne pore preko 10^{-7} mm)
- ⇒ ispitivanje čvrstoće pri pritisku, min 75%, gubitak mase 5%
- ⇒ marke otpornosti na mraz: M-50, M-100, M-150, M-200
- ⇒ 15 uzoraka kocke od 15 cm ili 20 cm, ili cilindri 15 cm (9 etalona, 6 za ispitivanje)
 - ⇒ za M-50, 9 uzoraka (6 etalona, 3 za ispitivanje)
- ⇒ smrzavanje -20°C (4h ili 6h) – odmrzavanje $20 \pm 3^{\circ}\text{C}$ (4h ili 6h)
- ⇒ Ekvivalentna starost etalonskih uzoraka: $t_c = t_a + c \cdot n$

t_a = 28 dana

n - broj ciklusa

c - parametar koji zavisi od broja ciklusa u 24h

	Tri ciklusa	Dva ciklusa	Jedan ciklus
Kocke a=15 cm i cilindri $\varnothing=h=15$ cm (ciklus 4+4 sata)	0,20	0,35	0,80
Kocke a=20 cm (ciklus 6+6 sati)	--	0,25	0,70



Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

● Otpornost prema dejstvu mraza i soli

⇒ JUS U.M1.055

⇒ troprocentni rastvor NaCl

⇒ nakon djelovanja rastvora 25 ciklusa (smrzavanja-odmrzavanja) :

⇒ 16-18h $T=-20^{\circ}\text{C}$, 6-8h na sobnoj temperaturi($T =20^{\circ}\text{C}$)

Stepen oštećenja	Gubitak mase (mg/mm)	Dubina oštećenja najviše (mm)	Vizuelni opis	Kriterijum za cijenu
0 – bez ljuštenja	0	0	Nema promjene na površini	Otporan
1 – slabo ljuštenje	0,20	1	Oštećenje finog materijala	Otporan
2 – srednje ljuštenje	0,50	4	Oštećenje površine vidljiva pojedina zrna agregata	Neotporan
3 – jako ljuštenje	1,00	10	Vidljiva zrna agregata na cijeloj površini	Neotporan



Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

● Otpornost na habanje

- ⇒ JUS B.B8.015: kocke od 7,1cm ($A=50\text{cm}^2$)
- ⇒ drobljeni agregat (krupne frakcije, min sitnih frakcija)
- ⇒ cementi visokih klasa
- ⇒ niski vodocemnetni faktori
- ⇒ njega betona

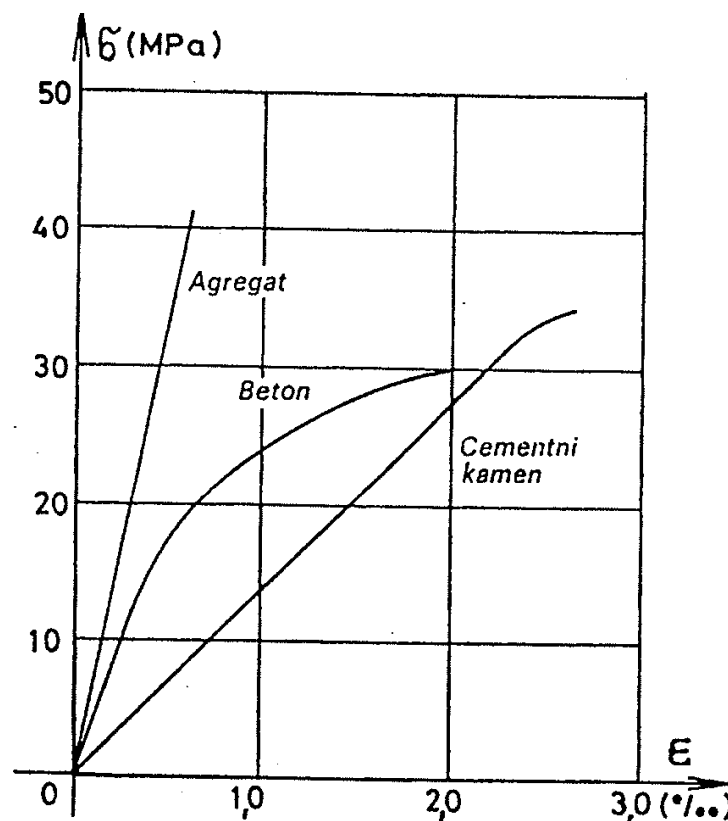
● Otpornost na hemijske agense

- ⇒ zavisi od hemijske otpornosti cementa i kompaktnost betona
- ⇒ niski vodocemnetni faktori
- ⇒ efikasno ugrađivanje (kompaktiranje)
- ⇒ njega betona
- ⇒ Praktično: dokaže se hemijska otpornost cementa

Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona



- Deformacije pod uticajem kratkotrajnih opterećenja
 - ⇒ cementni kamen i agregat: linearna zavisnost
 - ⇒ beton: kontaktna površina cementnog kamena i agregata (mikroprrsline pri srazmjerno niskim nivoima naprezanja)
 - ⇒ radni dijagram
 - ⇒ modul elastičnosti
 - ⇒ Poasonov koeficijent





Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

- Deformacije pod uticajem kratkotrajnih opterećenja

⇒ radni dijagram (σ - ε)

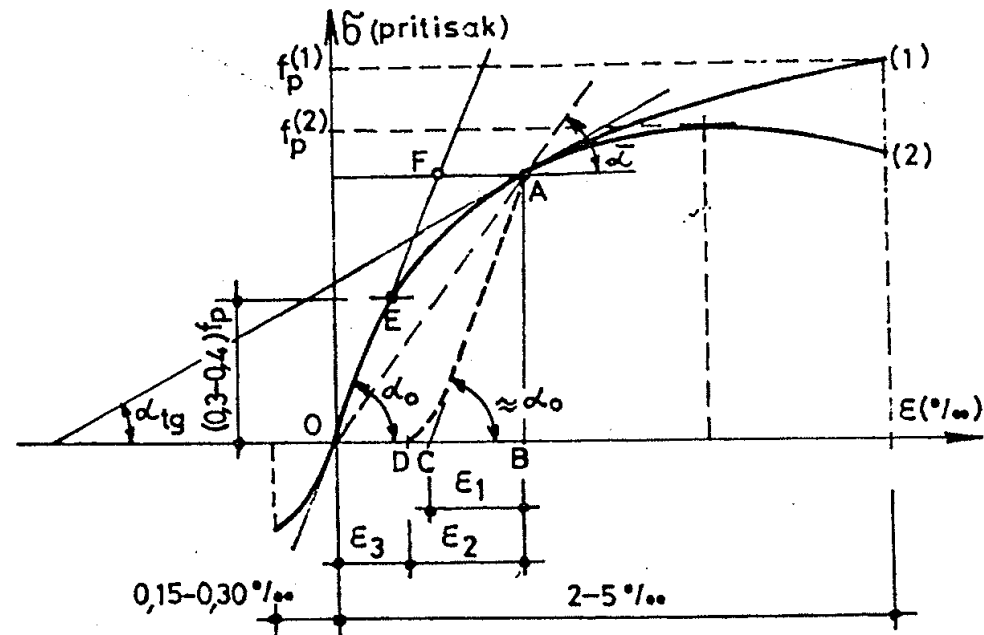
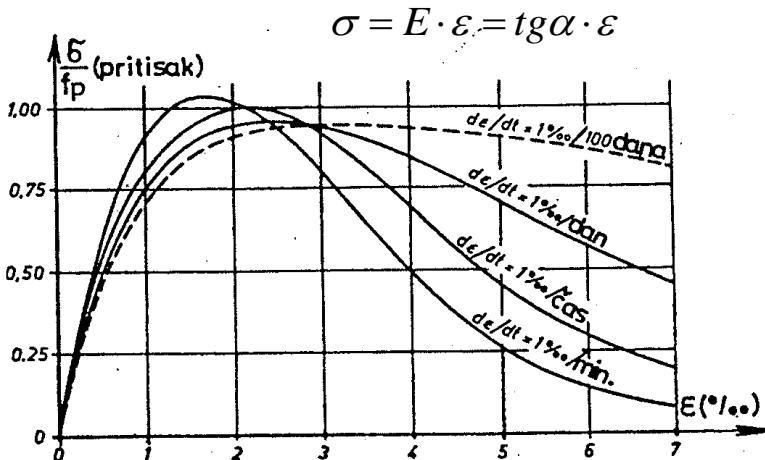
⇒ "1"betoni većih čvrstoća: režim diktiranog povećanja napona $0,5 \pm 0,3 \text{ MP/s}$

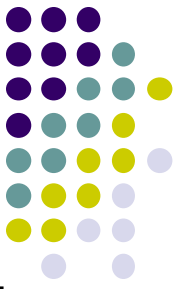
⇒ "2"betoni manjih čvrstoća: režim diktiranog povećanja dilatacija

⇒ tangnetni modul elastičnosti $\text{tg} \alpha_{\text{tg}}$

⇒ sekantni modul elastičnosti $\text{tg} \bar{\alpha}$

⇒ $(0,3-0,5)f_p$ područje radnih napona





Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

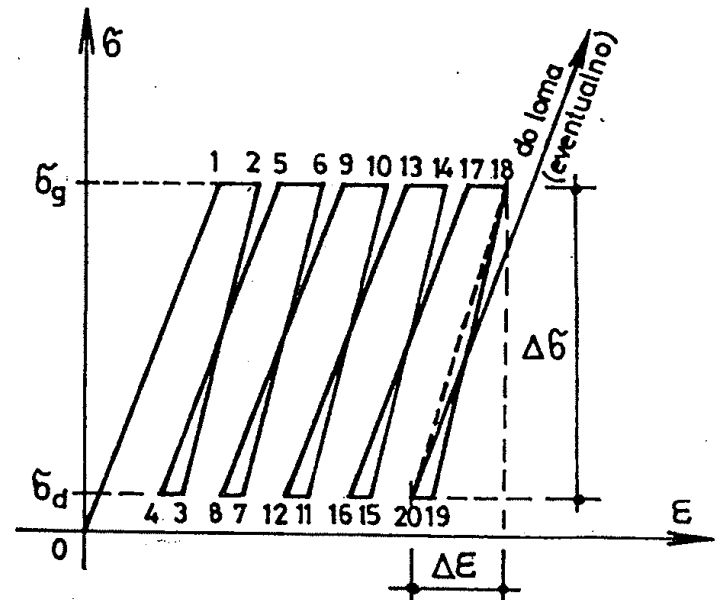
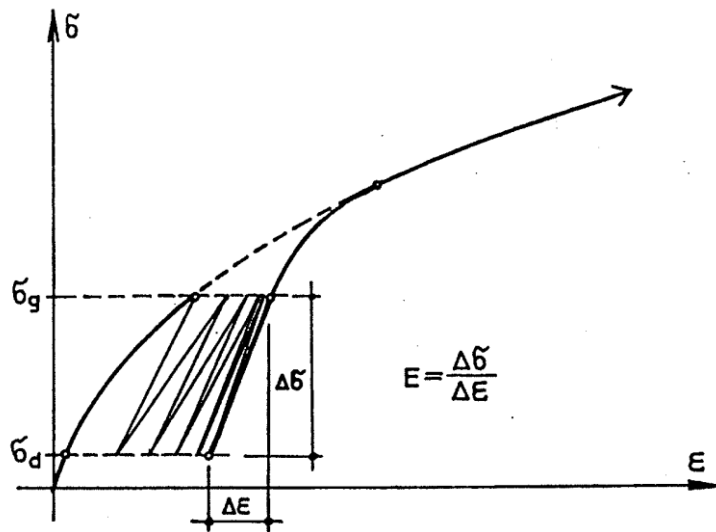
- Deformacije pod uticajem kratkotrajnih opterećenja

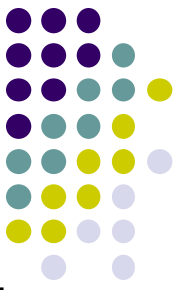
⇒ modul elastičnosti

⇒ JUS U.M1.025

⇒ $2 \leq h/a \leq 4, a \geq 4D, \sigma_d = 0,5 \text{MPa}, \sigma_g = f_p/3$

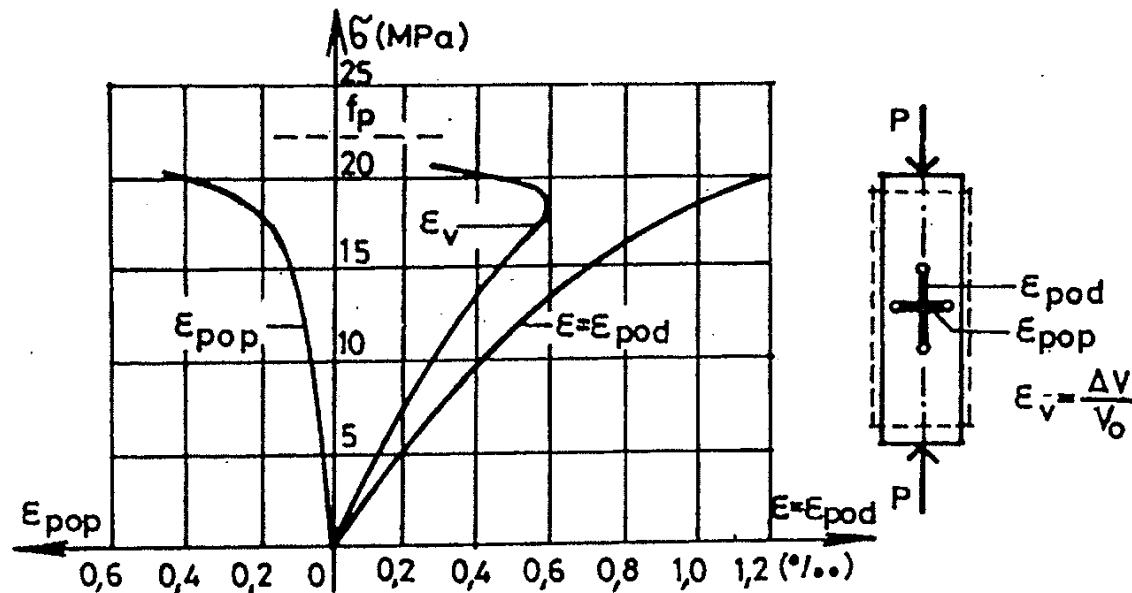
⇒ Prema PBAB: $E = 9,25 \cdot \sqrt[3]{f_k + 10}$





Fizičko-mehaničke osobine očvrslog betona

- Deformacije pod uticajem kratkotrajnih opterećenja
 - ⇒ Poasonov koeficijent (μ)
 - ⇒ odnos poprečnih i podužnih dilatacija uzorka
 - ⇒ $\mu=0,15-0,25$ (u području radnih napona)
 - ⇒ $\mu=0,4-0,5$ neposredno pred lom (pop.deformacije $0,8-1,0\text{mm/m}^1$)



Slijedeće predavanje:



REOLOŠKA SVOJSTVA OČVRSLOG BETONA