

ČVRSTOĆE BETONA  
BETONSKE KONSTRUKCIJE

## ČVRSTOĆE BETONA

- VRSTE BETONA
- TLAČNA ČVRSTOĆA ( $f_{cc}$ )
- VLAČNA ČVRSTOĆA ( $f_{ct}$ )
- ČVRSTOĆE NA ODREZ I POSMIK ( $f_{cp}$ )
- ČVRSTOĆE NA UDAR I ZAMOR
- ENERGIJA SLOMA
- ČVRSTOĆE U KONSTRUKCIJAMA

# KOMPOZIT : BETON - ČELIK

## BETON

- 
- VISKOELASTIČAN
- MALA VLAČNA ČVRSTOĆA
- NEHOMOGEN
- VREMENSKE DEFORMACIJE

## ČELIK

- ELASTOPLASTIČAN
- VLAČNE I TLAČNE ČVRSTOĆE PRIBLIŽNO UJEDNAČENE

# SVOJSTVA BETONA

**KRUTO TIJELO ? IZVANA, DA!  
IZNUTRA PORE = PSEUDOKRUTO TIJELO**

1. PROCES STVRDNJAVANJA DUGOTRAJAN  
SVOJSTVA U VREMENU PROMIJENJIVA

2. BITNI PARAMETRI:

- CEMENT I NJEGOVA KOLIČINA
- VODA I NJENA KOLIČINA
- GRANULOMETRIJSKI SASATAV AGREGATA
- MINERALNI SASATAV AGREGATA
- DODACI CEMENTU I SMJESI BETONA

PREVELIKI BROJ PARAMETARA UZROKUJE NEKOZISTENTNOST  
STRUKTURE ŠTO DOVODI DO RASAPA REZULTATA ISPITIVANJA  
PROBNIH TIJELA I NEHOMOGENOSTI SVOJSTAVA BETONA

## **FIZIKALNO MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA**

- **GUSTOĆA**
- **ČVRSTOĆE**
- **DEFORMABILNOST**
- **VDP**
- **TOPLINSKA PROVODLČJIVOST**
- **ZVUČNA PROVODLJIVOST**
- **OTPORNOST NA POŽAR**
- **OTPORNOST NA MRAZ**
- **OTPORNOST NA KOROZIJU**

**U DIREKTNJOJ SU VEZI SA STRUKTUROM PA SU ZBOG TOGA  
JEDNAKO NEKONZISTENTNA.**

## GUSTOĆA – POROZNOST BETONA

### TRI GLOBALNE VRSTE BETONA:

- UOBIČAJNI BETON  $\rho = 2\,000 - 2\,800 \text{ kg/m}^3$
- LAGANI BETON  $\rho < 2\,000 \text{ kg/m}^3$
- TEŠKI BETON  $\rho > 2\,800 \text{ kg/m}^3$

### ZA POTREBE PRORAČUNA REPREZENTATIVNE VRIJEDNOSTI GUSTOĆE BETONA SU:

- NEARMIRANI BETON  $\gamma = 24 \text{ Kn/m}^3$
- ARMIRANI BETON  $\gamma = 25 \text{ Kn/m}^3$

## KOEFICIJENT ISPUNJENOSTI $\delta$

$$\delta = \rho / \rho' (\%)$$

$\rho'$ - gustoća zbijenog i osušenog betona

## KOEFICIJENT POROZNOSTI $p$

$$p = 1 - \delta (\%)$$

za  $p = 1\%$  - potpuno zbijen beton

### **POROZNOST BETONA OVISI O:**

- **POROZNOSTI CEMENTNOG KAMENA**
- **GRANULOMETRIJSKOM SASTAVU**
- **UGRADNJI**

**ZA  $\delta = 0,98 - 0,85$  MIKROPOROZNI BETONI**

**ZA  $\delta < 0,85$  MAKROPOROZNI BETONI**

**SVA OSTALA SVOJSTVA U DIREKTNOJ SU VEZI S POROZNOŠĆU,  
tj. STRUKTUROM**

# ČVRSTOĆE BETONA

## KAO FUNKCIJA STRUKTURE

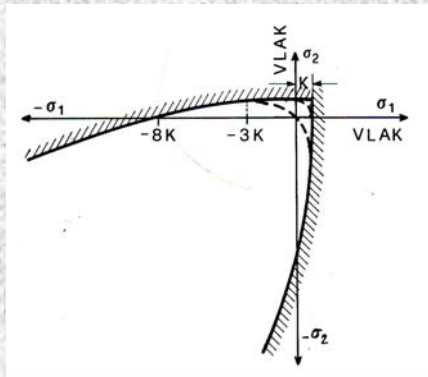
MEHANIZAM SLOMA BETONA NEPOZNAT I  
OVISI O:

- VEZAMA U CEMENTNOJ PASTI
- VEZAMA NA KONTAKTU CEMENTA I ISPUNE

### GRIFFITH-ova INTERPRETACIJA:

Usljed vlačnih sila mikroskopski slom na lokaciji jedne od pora (pukotine). Napon raste bez povećanja vanjskog opterećenja. Progresivni slom.

## OROWAN-ova KVANTIFIKACIJA:



$K$  = vlačna čvrstoća pri aksijalnom vlaku

VELIČINA I SMJER MAKSIMALNOG VLAČNOG NAPONA NA VRHU PUKOTINE U FUNKCIJI GLAVNIH NAPONA (KOMBINACIJE SLOMA)

AKSIJALNI TLAK =  $8K$  (Mehanizam sloma vlačni naponi okomiti na aksijalni tlak. Za to treba 8 puta veća sila od aksijalno vlačne)

VLAK JE UZROK SVIH OBLIKA SLOMA.

# TLAČNA ČVRSTOĆA BETONA $f_c$

Definicija:

PROJEKTOM PROPISANA, tj. UVJETOVANA KARAKTERISTIČNA TLAČNA ČVRSTOĆA BETONA JE MB (PBAB87) ili KLASA BETONA C.

ISPITUJE SE tj. UTVRĐUJE NA PROBNIM TIJELIMA STAROSTI 28 DANA.

## KLASIFIKACIJA

PBAB87: MB 15; 20; 25; 30; 35; 40; 45; 50; 55; 60

EC2: C12/15; 16/20; 20/25; 30/37; 35/45; 40/50; 45/55; 50/60

PROBNA TIJELA:

PBAB87: KOCKA 20cm

EC2: VALJAK 15/30 / KOCKA 15cm

VEZA NAVEDENIH VRIJEDNOSTI  $f_{c, kocka 20} / f_{c i}$

	KOCKA 20	KOCKA 15	VALJAK 15/30	VALJAK 10/10	PRIZMA 12/12/36	PRIZMA 20/20/60
	1,0	0,95	1,20	1,02	1,25	1,25
MB30	30	32	25	29	24	24

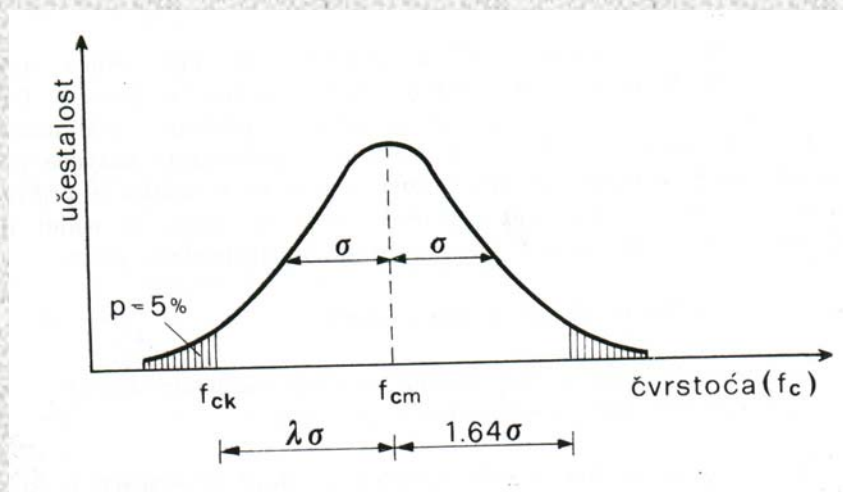
**KARAKTERISTIČNA TLAČNA ČVRSTOĆA BETONA DEKLARIRA SE  
ISPITIVANJEM ODREĐENOG BROJA PROBNIH TIJELA UZ PRIMJENU  
RAČUNA VJEROJATNOSTI I STATISTIKE UZ PRETPOSTAVKU GAUSOVE  
NORMALNE DISTRIBUCIJE:**

**$n$  = broj uzoraka**

**$f_{cm}$  = srednja vrijednost**

**$\sigma$  = standardna devijacija**

**$\lambda$  = koeficijent varijacije za odabrani fraktil**



**PRI TOME SE:**

**1. UNAPRIJED ODREĐUJE FRAKTIL (%)**

**ODREĐEN JE NORMOM:**

**PBAB87 10%**

**EC2 5%**

**FRAKTIL ZNAČI VRIJEDNOST ČVRSTOĆE ISPOD KOJE POSTOJI NAJVIŠE n% REZULTATA ISPITIVANJA**

**2. POSTAVLJA KRITERIJ SUKLADNOSTI**

**OCJENA KVALITETE RADI SE KONTROLOM STATISTIČKOG UZORKA:**

$$f_{ck} = f_{cm} - \lambda \sigma$$

**I OVISI O  $n$  (BROJU UZORAKA)**

**3. UTVRĐUJE UJEDNAČENOST KVALITETE**

**MJERA UJEDNAČENOSTI JE KOEFICIJENT VARIJACIJE tj. OMJER STANDARDNE VARIJACIJE I SREDNJE VRIJEDNOSTI:**

$$V_c = \sigma / X_m.$$

<b>PREMA ACI:</b>	<b>&lt;10%</b>	<b>vrlo dobra</b>
	<b>10%-15%</b>	<b>dobra</b>
	<b>15%-20%</b>	<b>prihvatljiva</b>
	<b>&gt; 20%</b>	<b><u>neprihvatljiva</u></b>

## TLAČNA ČVRSTOĆA U VREMENU

### PRIBLIŽNI ODNOSI NA PROBNIM TIJELIMA

$$f_{c,n}/f_{c,28}$$

<b>Starost (dani)</b>	<b>3</b>	<b>7</b>	<b>28</b>	<b>90</b>	<b>365</b>
<b>Normalni PC</b>	<b>0,40</b>	<b>0,65</b>	<b>1,00</b>	<b>1,20</b>	<b>1,35</b>
<b>Visokovrijedni PC</b>	<b>0,55</b>	<b>0,75</b>	<b>1,00</b>	<b>1,15</b>	<b>1,20</b>

# VLAČNA ČVRSTOĆA BETONA $f_{c,t}$

U INŽENJERSKOJ PRAKSI KORISTI SE PRI PROVJERI GLAVNIH VLAČNIH NAPONA I GRANIČNIH STANJA UPORABLJIVOSTI.

TRI METODE ISPITIVANJA VLAČNE ČVRSTOĆE:

1. DIREKTNI OSNI VLAK  $f_{ct, ax} = F_u / A_c$
2. CIJEPANJE PROBNOG TIJELA (VALJAK, KOCKA)

$$f_{ct, sp} = 2F_u / \pi d h \quad f_{ct, sp} = 2F_u / \pi a^2$$

Presjek sloma nije izložen samo vlačnim naprezanjima

3. UZORCI GREDICE, OPTEREĆENJE SAVIJANJE

$$f_{ct, tl} = 6M_u / b h^2$$

MEĐUSOBNI ODNOSI:

$f_{ct, ax}$  JE “PRAVA” VLAČNA ČVRSTOĆA

$$f_{ct, ax} = 0,9 f_{ct, sp} \quad f_{ct, ax} = 0,5 f_{ct, tl}$$

**VELIKA RAZLIKA VLAČNE ČVRSTOĆE PRI  
SAVIJANJU I “PRAVE” VLAČNE ČVRSTOĆE LEŽI U  
MEHANIZMU SLOMA GREDE, PRESTANKA  
NAVIEORVE HIPOTEZE NAKON RAZARANJA TE  
NELINEARNOG ODNOSA NAPON-DEFORMACIJA  
NAPONI SU PARABOLA i PARABOLA+  
PRAVOKUTNIK**

**PROJEKTANTSKA PRAKSA UPUĆENA NA NORME I PROPISE KORISTI SLJEDEĆE IZRAZE ZA VELIČINU VLAČNOG NAPONA BETONA, KAO FUNKCIJU KARAKTERISTIČNE TLAČNE ČVRSTOĆE BETONA:**

**PBAB 87**

$$f_{ct, ax} = 0,25 \cdot \sqrt[3]{f_{ck, cube}^2}$$

ili jednostavniji izraz

$$f_{ct, ax} = 0,70 + [f_{ck, cube} / 20]$$

**EC 2**

**SREDNJA VRIJEDNOST VLAČNE ČVRSTOĆE ZA JEDNU KLASU BETONA**

$$f_{ct, m} = 0,30 \cdot \sqrt[3]{f_{ck}^2}$$

**VLAČNA ČVRSTOĆA UVJETOVANA 5% FRAKTILOM**

$$f_{ct, k 0,05} = 0,70 f_{ct, m}$$

**VLAČNA ČVRSTOĆA UVJETOVANA 95% FRAKTILOM**

$$f_{ct, k 0,95} = 1,30 f_{ct, m}$$

# ČVRSTOĆA BETONA NA ODREZ I POSMIK $f_{c,p}$

**ODREZ U ČISTOM OBLIKU (PRESJECANJE GREDE NA DVA DIJELA).  
NAPONSKO STANJE GOTOVO BEZ NORMALNIH NAPONA.**

**POSMIK JE ZAPRAVO ODREZ UZ IZRAŽENE (NEZANEMARIVE) NORMALNE  
NAPONE.**

**U PRAKSI “OPASNI” PRIMJERI KOD KOJIH SU POSMIČNI NAPONI ZNATNI U  
ODNOSU NA NORMALNE NAPONE OD SAVIJANJA.**

**NE POSTOJI NORMIRANA METODA (BEZ ZAMJERKI I PRIMJEDABA)  
KOJOM SE ODREĐUJU ČVRSTOĆE NA ODREZ I POSMIK.**

**TEORIJSKE ANALIZE KAO I PROJEKTANTSKA PRAKSA  
VRIJEDNOSTI GRANIČNIH I DOPUŠTENIH, ZA ODREZ I POSMIK VEŽU  
UZ GLAVNE NAPONE, ODNOSNO ZA TLAČNU I VLAČNU ČVRSTOĆU  
BETONA.**

**EMPIRIJSKI JE UTVRĐENO DA VRIJEDI PRIBLIŽNO SLJEDEĆI  
ODNOS:**

$$f_{cp} \sim 3 f_{ct, m} \text{ za ČISTI ODREZ}$$

$$f_{cp} \sim 2 f_{ct, m} \text{ za POSMIK}$$

### **MEĐUSOBNI ODNOSI (KVALITATIVNI):**

- 1. AKO POSTOJE GLAVNI TLAČNI NAPONI POSMIČNA ČVRSTOĆA JE VEĆA**
- 2. AKO POSTOJE GLAVNI VLAČNI NAPONI POSMIČNA ČVRSTOĆA JE MANJA**
- 3. AKO POSTOJE POSMIČNI NAPONI SLOM TLAČNOG ELEMENTA DOGAĐA SE PRI NAPONU NIŽEM OD MAKSIMALNOGA**
- 4. MAKSIMALNI TLAČNI I VLAČNI NAPON BITI ĆE DOSEGNUT SAMO AKO NEMA POSMIČNIH NAPREZANJA**

## **ČVRSTOĆE NA UDAR I ZAMOR**

### **UDARNA DJELOVANJA NA BETONSKO TIJELO**

**MJERA: RAD PRIJE POJAVE PRVE PUKOTINE**

**NIJE UTVRĐENA VEZA ČVRSTOĆE NA UDAR I TLAČNE ČVRSTOĆE**

**KVALITATIVNI ČINBENICI:**

- **SPOSOBNOST DEFORMIRANJA**
- **MASNIJI BETON (VIŠE CEMENTA)**
- **DROBLJENAC KAO AGREGAT**

**STUDIJA MEHANIZMA UKAZUJE DA SU BITNE LOKALNE POSMIČNA I  
VLAČNA ČVRSTOĆA MEĐU ČESTICAMA**

**ZAMOR: CIKLIČKO PONAVLJANJE NAPREZANJA OD NULE DO  $\sigma_{\max, \text{tlak.}}$**

**SLOM NASTUPA PRI NIŽIM OPTEREĆENJIMA NEGO ZA JEDNOLIKO RASTUĆE OPTEREĆENJE.**

**“GRANICA ZAMORA” JE ČVRSTOĆA PRI BESKONAČNOM BROJU CIKLUSA ( $10^6$  ili  $2 \cdot 10^6$ )**

**EMPIRIJSKI ODNOSI SU:**

**$0,6 f_{ck}$  ZA REBRASTU ARMATURU**

**$0,4 f_{ck}$  ZA GLATKU ARMATURU**

**DAKLE DIREKTNA VEZA S NAPONOM PRIJANJANJA**

# ČVRSTOĆA PRI DUGOTRAJNOM MIRNOM OPTEREĆENJU

Npr: AB STUPOVI

**PRI  $0,9 f_{ck}$  SLOM NAKON 30 minuta**

**PRI  $0,85f_{ck}$  SLOM NAKON NEKOLIKO SATI**

**MEHANIZAM:**

**PLASTIČNE DEFORMACIJE U CEMENTNOM KAMENU KOJE AGREGAT NE MOŽE SLIJEDITI. VEZE MEĐU NJIMA SE KIDAJU, STVARAJU SE SITNE PUKOTINE KOJE SE POD TIM NIVOOM OPTEREĆENJA ŠIRE ŠTO DOVODI DO PROGRESIVNOG SLOMA.**

**TO JE IZMEĐU OSTALIH JEDAN OD RAZLOGA UVOĐENJA PARCIJALNOG KOEFICIJENTA SIGURNOSTI ZA GRADIVO  $\gamma_m$**

# ČVRSTOĆA BETONA U KONSTRUKCIJAMA

**STVARNA ČVRSTOĆA UGRAĐENOG BETONA RAZLIKUJE SE OD ČVRSTOĆE PROBNIH TIJELA**

**RAZLOZI:**

- **UVJETI NJEGE I ZRIJENJA**
- **TRANSPORT**
- **UGRADBA**
- **ATMOSFERSKE PRILIKE**
- **POLOŽAJ U KONSTRUKCIJI (dolje uvijek viša  $f_c$ )**

**NAKON 90 DANA LAB. KOCKE IMAJU 16% VIŠU  $f_c$**

**NAKON 180 DANA LAB. KOCKE IMAJU 27% VIŠU  $f_c$**

**KAKO SE ODREĐUJE  $f_{ck}$  UGRAĐENOG I STVRDNUTOG BETONA U KONSTRUKCIJAMA:**

- VALJCI
- SKLEROMETAR
- ULTRAZVUK