



BETONI VISOKIH ČVRSTOĆA I VISOKIH UPORABNIH SVOJSTAVA

UVOD

- HRN EN 206-1 → tlačna čvrstoća je jedino osnovno svojstvo betona
- obični beton $\leq C50/60$
- betoni visokih čvrstoća $\geq C55/67, \leq C100/115$
- betoni ultra visokih čvrstoća $> C100/115$ → nisu obuhvaćeni u TPBK

BETONI VISOKIH UPORABNIH SVOJSTAVA

- Beton visokih uporabnih svojstava se razlikuje od običnog betona prema jednom ili više poboljšanih svojstava (čvrstoća, modul elastičnosti, propusnost, obradljivost, skupljanje, puzanje itd.) te prema strukturi, sastavu i načinu proizvodnje
- Ukoliko betoni visokih čvrstoća posjeduju i druga poboljšana svojstva osim tlačne čvrstoće tada se oni nazivaju betonima visokih uporabnih svojstava

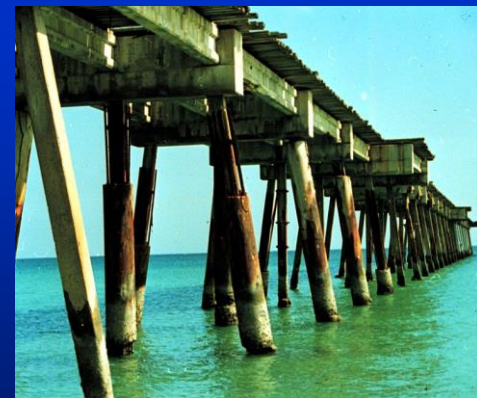


BETONI VISOKIH UPORABNIH SVOJSTAVA

- Vodocementni ili vodovezivni omjer od 0.40 najčešće predstavlja granicu između betona visokih uporabnih svojstava i običnog betona



- Prva primjena betona visokih čvrstoća bila je za stupove visokih zgrada
- Prvi inženjerski pristupi problemu trajnosti betonskih konstrukcija javljaju se 60-ih godina 20. stoljeća
- Betoni visokih uporabnih svojstava počeli su se upotrebljavati iz razloga povećanja trajnosti konstrukcija



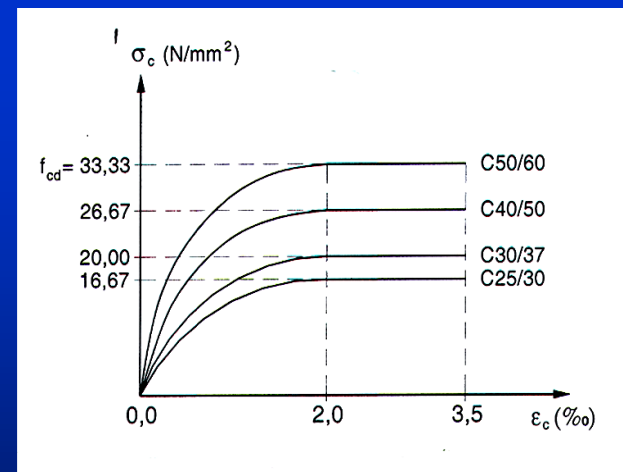
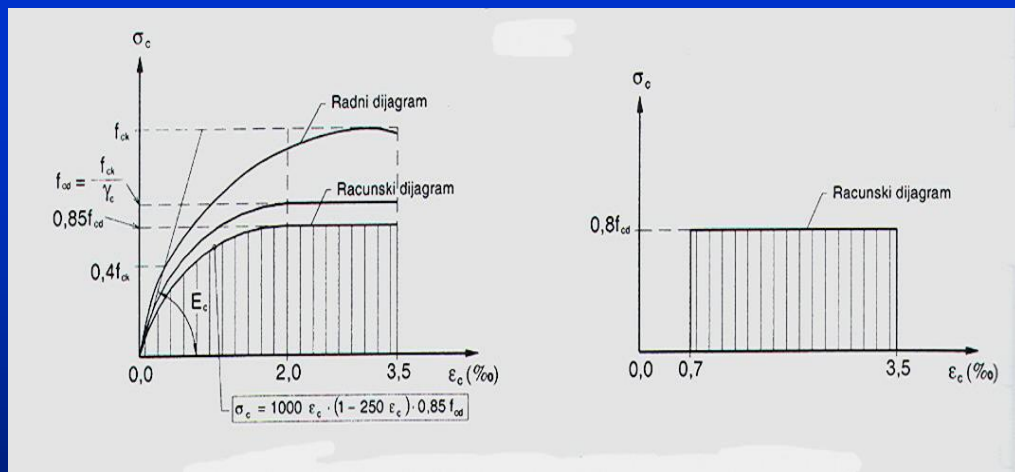
PRAVILA ZA PROIZVODNJU BETONA VISOKIH ČVRSTOĆA

- **Dodatak H, norme HRN EN 206-1 daje dodatne preporuke potrebne za betone visoke čvrstoće u pogledu:**
 - **kontrole materijala,**
 - **kontrole opreme,**
 - **kontrole postupka proizvodnje i svojstava betona.**

HRN ENV 1992-1-1 Eurokod 2: Projektiranje betonskih konstrukcija

1-1 dio: Opća pravila i pravila za zgrade

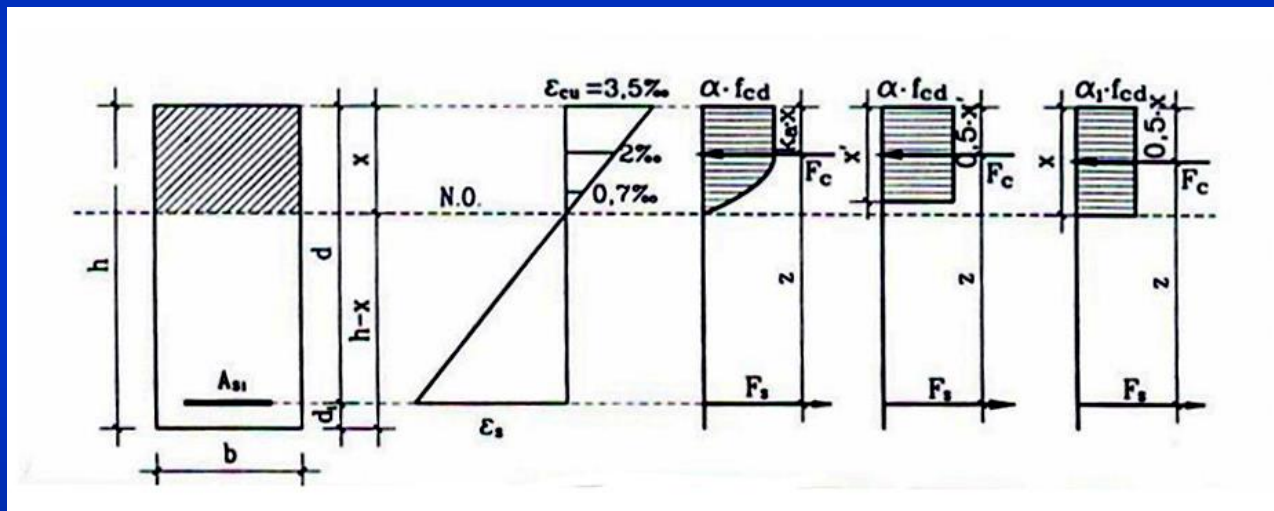
“Razrede betona > C50/60 dopušteno je koristiti u građenju armiranim i prednapetim betonom kada je njihova primjena dostatno utemeljena”



$$\alpha = 0,85, \gamma_c = 1,5$$

BETONI VISOKIH ČVRSTOĆA

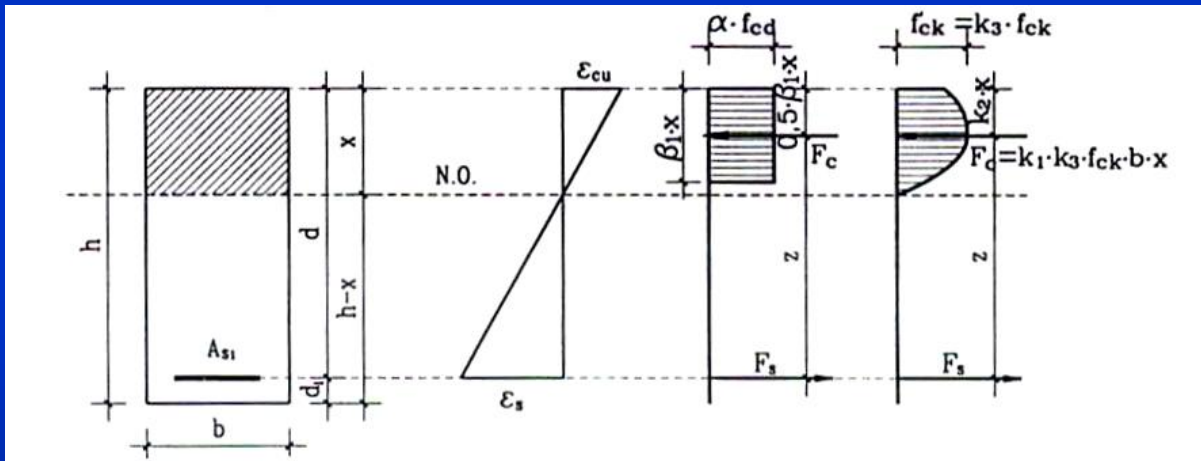
CEB/FIP Bulletin, High Strength Concrete, State of the Art Report, No. 197



$$\alpha = 0,6 + 10/f_{ck} \leq 0,85$$

BETONI VISOKIH ČVRSTOĆA

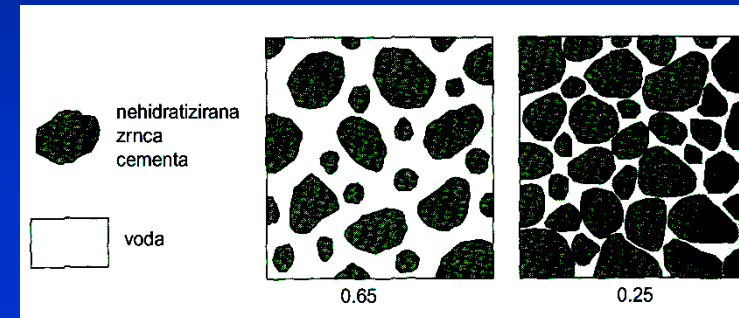
American Concrete Institute Committee 318-95:
Building Code Requirements for Structural Concrete



$$\beta_1 = 0,65, \alpha = 0,85$$

PRINCIPI DOBIVANJA

- **Visoke čvrstoće i visoka uporabna svojstva postižu se smanjenjem poroznosti te defekata unutar strukture i korištenjem kvalitetnijih komponenti sastava nego kod običnog betona**
- **Snižena poroznost postiže se smanjivanjem vodovezivnog omjera i korištenjem superplastifikatora i mineralnih dodataka**



SASTAV BETONA

- Sastavne komponente kao kod običnog betona uz promjene u količini i kvaliteti pojedinih komponenti:
 - veća količina veziva,
 - manje maksimalno zrno agregata,
 - veća količina superplastifikatora,
 - smanjenje vodovezivnog omjera.



ODABIR KOMPONENTI SASTAVA

- Odabiru sastavnih komponenti treba posvetiti više pažnje nego kod običnog betona
- Odabir komponenti sastava primarno ovisi o svojstvima koja se žele postići u svježem i očvrnutom stanju



ODABIR KOMPONENTI SASTAVA

- Redoslijed odabira komponenti sastava:
 - Odabir cementa
 - Odabir superplastifikatora
 - Provjera kompatibilnosti cementa i superplastifikatora
 - Odabir agregata, kemijskih i mineralnih dodataka



CEMENT

- **Cementi veće klase (42,5 ; 52,5) posjeduju dostatnu kvalitetu za dobivanje betona visokih čvrstoća i uporabnih svojstava**
- **Male promjene u deklariranom sastavu cementa bitno utječu na svojstva**
- **Normirana ispitivanja svojstava cementa su više podređena proizvodnji običnog betona**



CEMENT

- Finiji cementi su pogodniji za dobivanje većih čvrstoća betona, ali su nepovoljniji sa reološkog stajališta
- Ukoliko se ne mogu postići zahtijevana svojstva sa odabranim cementima potrebno je koristiti jedan ili više mineralnih dodataka



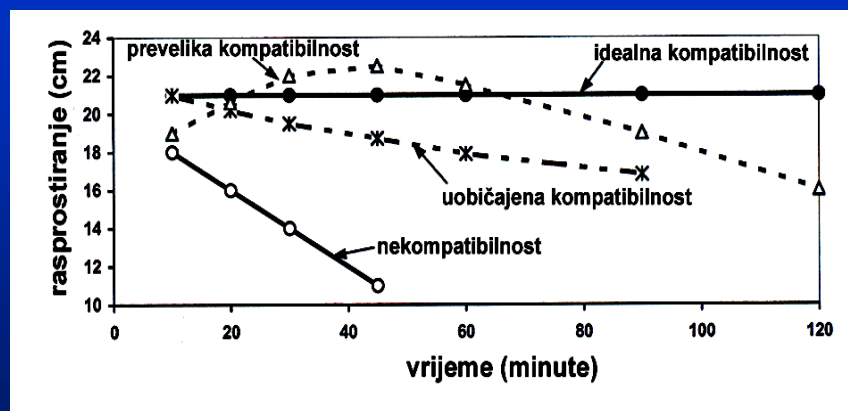
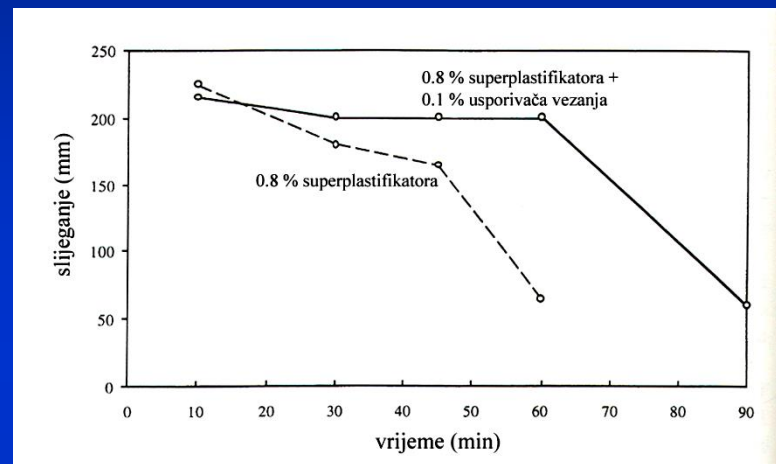
AGREGAT

- Veća zrna agregata su manje čvrstoće, imaju više unutarnjih defekata i treba izbjegavati njihovo korištenje
- Koristiti kvalitetniji agregat nego kod običnog betona (npr. eruptivni)
- U granulometrijskom sastavu ima veća količina sitnih čestica



KEMIJSKI DODACI

- Dodatkom superplastifikatora postiže se ista obradljivost svježeg betona uz manju količinu vode
- Dodatak aeranta za poboljšanje otpornosti na smrzavanje
- Usporivači vezanja za dužu obradljivost svježeg betona i lakšu ugradnju



SUPERPLASTIFIKATOR

- Pri odabiru superplastifikatora treba voditi računa o njegovoj kompatibilnosti s odabranim cementom
- Pojedini tipovi superplastifikatora razvijeni su prije veće uporabe betona visoke čvrstoće i uporabnih svojstava pa ih nije preporučljivo koristiti



SUPERPLASTIFIKATOR

- **Podjela superplastifikatora na temelju njihovog kemijskog sastava:**
 - Melaminski (5-25 % smanjenja vode)
 - Naftalenski (15-25 %)
 - Lignosulfatni (5-15 %)
 - Poliakrilni (20-30 %)
 - Polikarboksilatni (25-40 %).
- **Optimalno doziranje superplastifikatora ovisi o tome na koja svojstva želimo utjecati**



MINERALNI DODACI

- Silicijska prašina
- Leteći pepeo
- Pigmenti itd.



- Dodaju se radi poboljšanja mehaničkih i/ili trajnosnih svojstava, smanjenja topline hidratacije, poboljšanja obradljivosti, estetskog izgleda

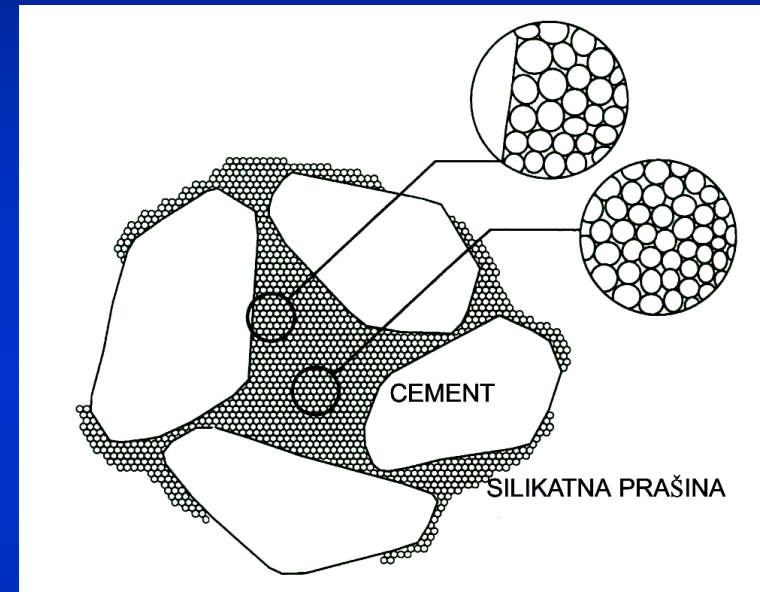
SILIKATNA PRAŠINA

- Najbolji pucolanski dodatak
- Glavna svojstva:
 - Amorfnost ($> 85 \% \text{SiO}_2$)
 - Velika specifična površina $15\text{-}35 \text{ m}^2/\text{g}$
 - Sitne čestice
- U armiranom betonu se koristi do količine od 10% u odnosu na masu cementa

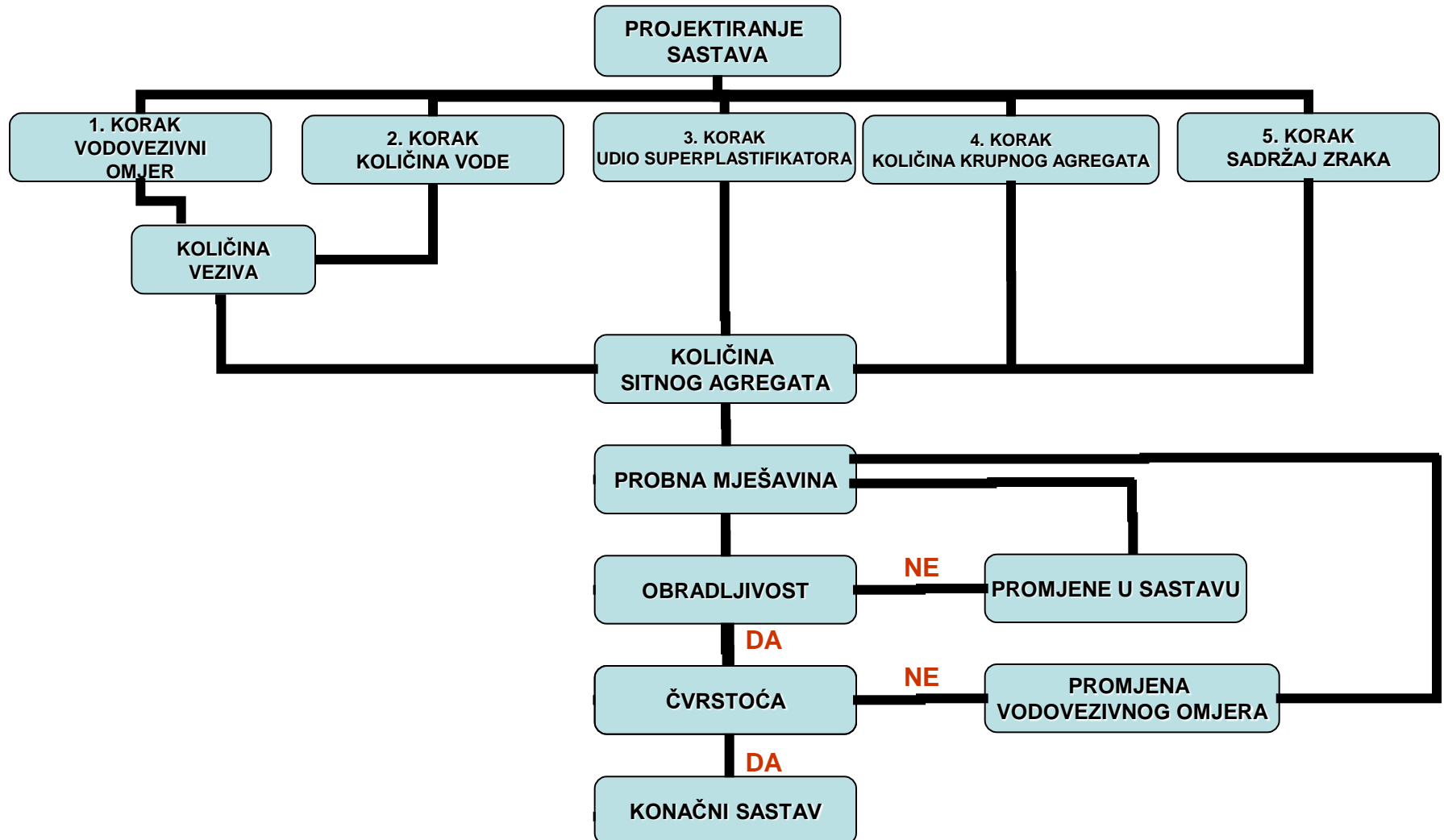


SILIKATNA PRAŠINA

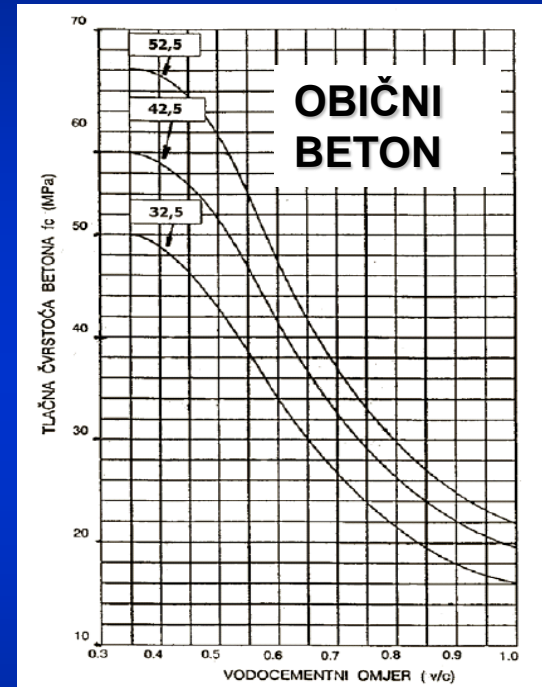
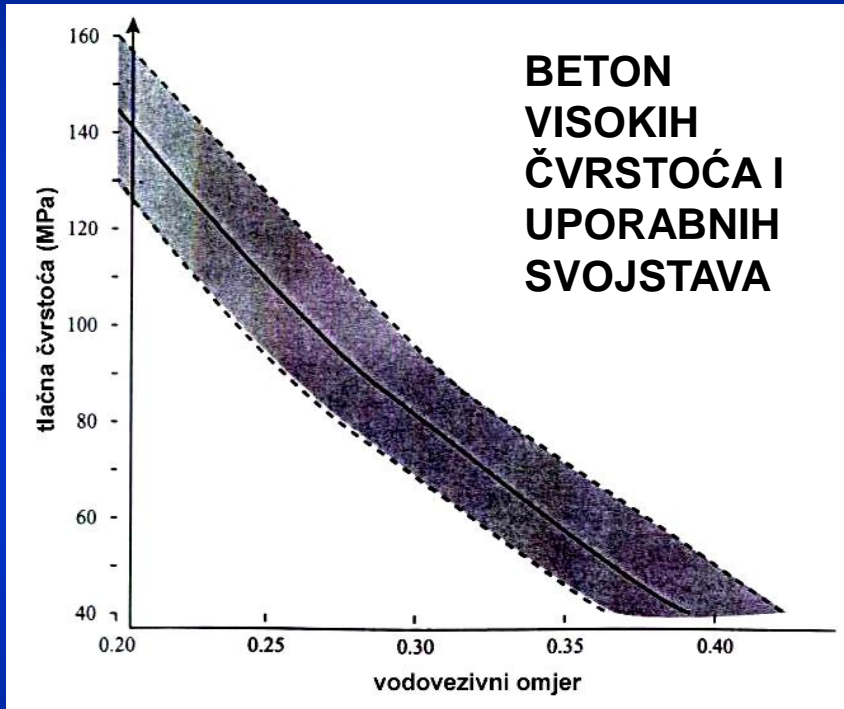
- Utječe na povećanje volumena koji okružuje cementne čestice i na ubrzanje hidratacije radi veće reaktivnosti
- Pored toga silikatna prašina reagira sa slobodnim vapnom stvarajući CSH gel



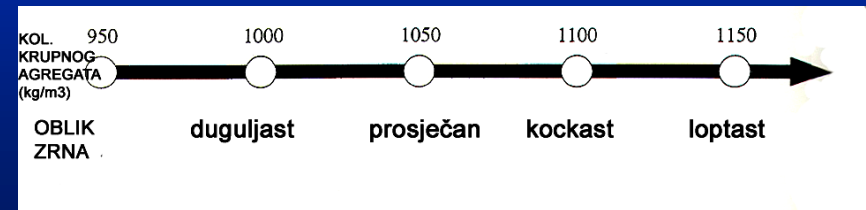
REDOSLIJED PROJEKTIRANJA SASTAVA



PROJEKTIRANJE SASTAVA



TOČKA SATURACIJE (%)	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
KOLIČINA VODE (l/m ³)	120 to 125	125 to 135	135 to 145	145 to 155	155 to 165



Primjer projektiranja sastava betona

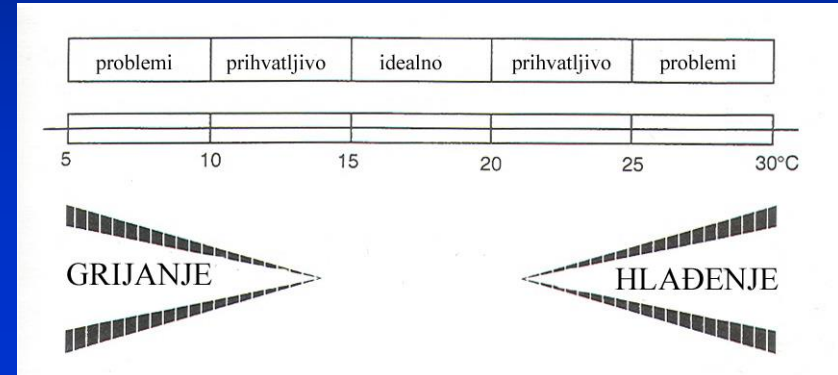
- **Cement** **600 kg**
- **Silikatna prašina** **59 kg**
- **Sitni agregat** **944 kg**
- **Krupni agregat** **883 kg**
- **Voda** **145 kg**
- **Superplastifikator** **5.2 kg**
- **Čelična vlakna** **100 kg**

Svojstva

- Tlačna čvrstoća 141.7 MPa
- Savojna čvrstoća 3.3 MPa
- Statički modul elastičnosti 40.8 MPa
- Dinamički modul elastičnosti 55.7 MPa
- Plinopropusnost $1.3 \times 10^{-18} \text{ m}^2$
- Upijanje vode $0.06 \text{ kg/m}^2\text{h}^{1/2}$
- Difuzija klor iona 416 Coulomb

SVOJSTVA SVJEŽEG BETONA

- Iste metode ispitivanja kao kod običnog betona
- Količina uvučenog zraka = 1 – 3 %
- Gustoća za 50-100 kg/m³ veća nego kod običnog betona



USPOREDBA MEHANIČKIH SVOJSTAVA

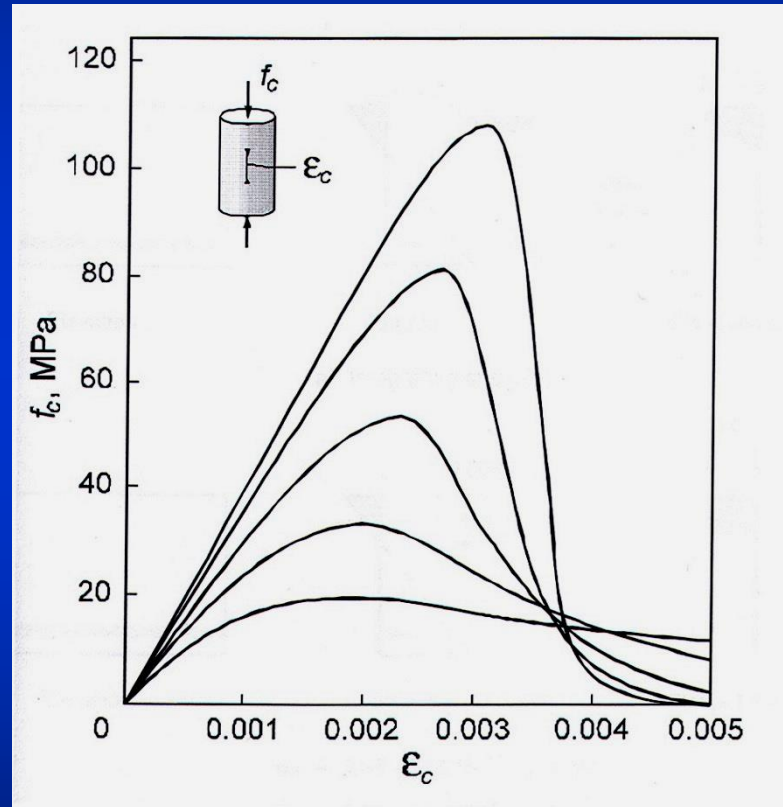
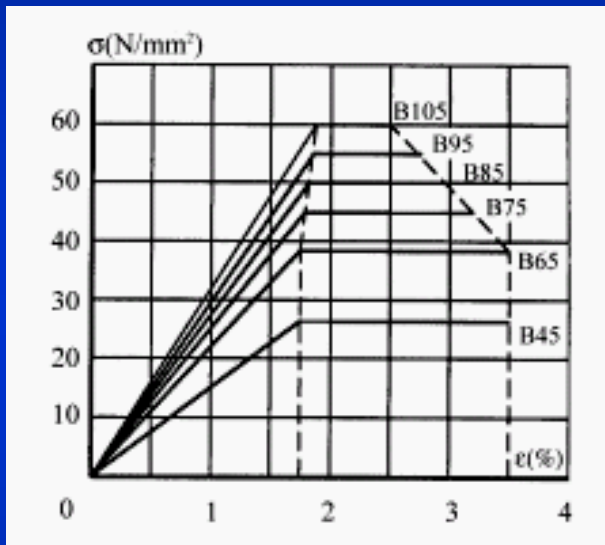
Svojstvo	obični beton	beton visokih čvrstoća	beton ultra visokih čvrstoća
Gustoća (g/cm ³)	2.3	2.4	2.5 - 2.6
Tlačna čvrstoća (MPa)	< C50/60	C55/67 – C100/115	> C100/115
Svojna čvrstoća (MPa)	5 - 6	7 - 9	20 - 60
Vlačna čvrstoća (MPa)	2 - 3	3 - 4	8 - 12
Modul elastičnosti (GPa)	25 - 40	40 - 45	45 - 60



OVISNOST TLAČNE ČVRSTOĆE I VODOVEZIVNOG OMJERA

Vodovezivni omjer	Tlačna čvrstoća (MPa)
0.40 – 0.35	50 – 75
0.35 – 0.30	75 – 100
0.30 – 0.25	100 – 125
0.25 – 0.20	> 125

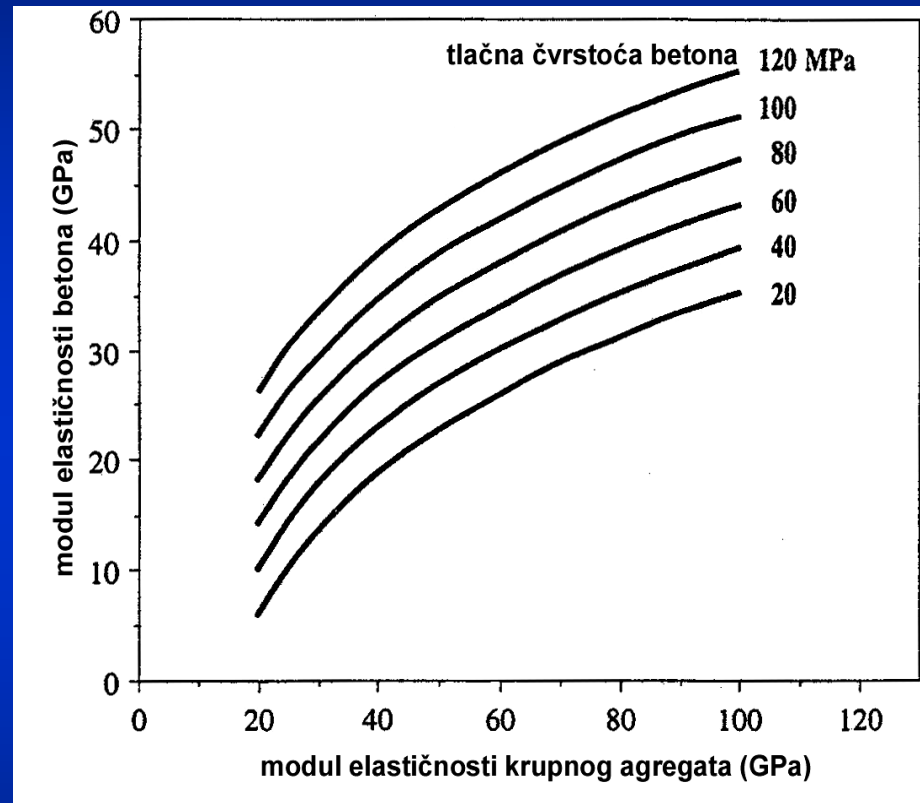
RADNI I PRORAČUNSKI DIJAGRAMI



Dutch Recommendations
for High Strength Concrete

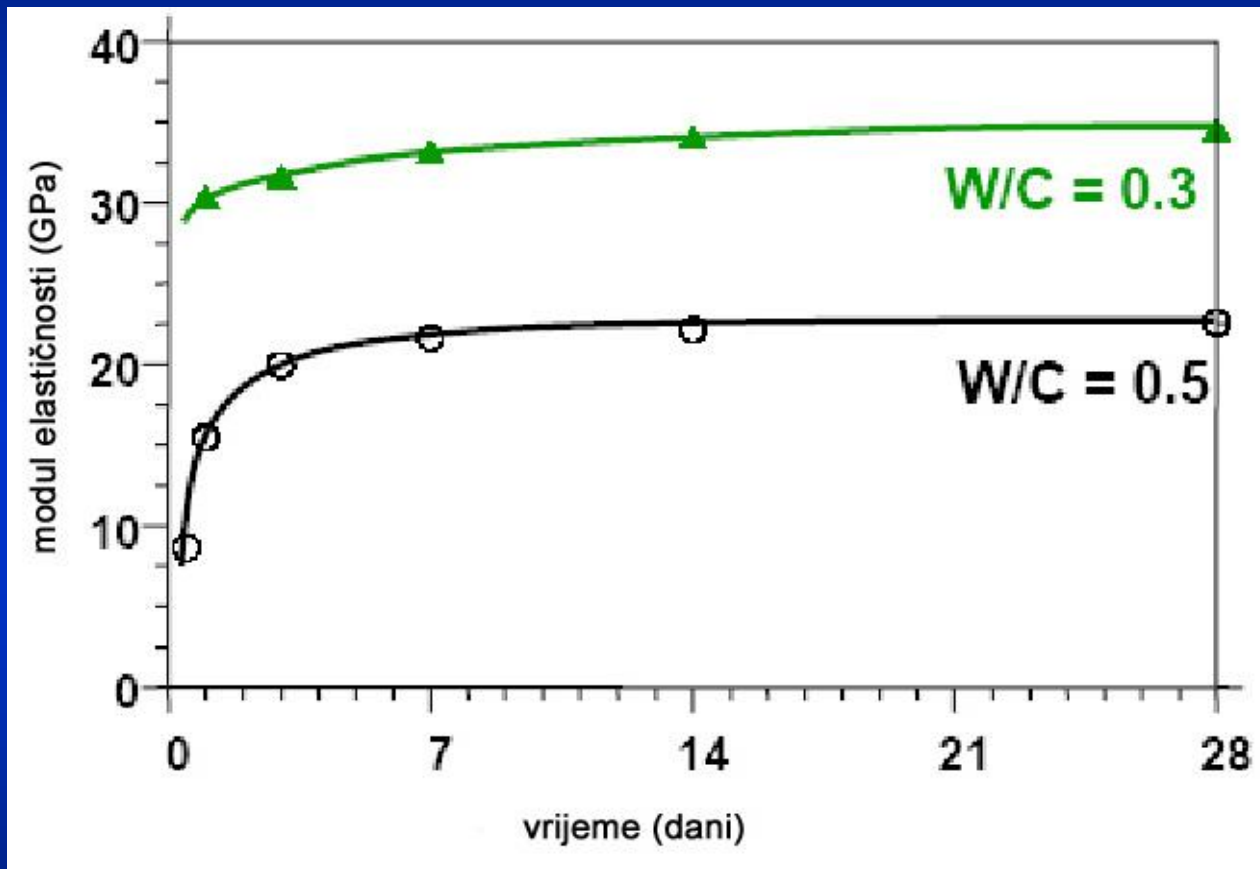
- Povećanjem tlačne čvrstoće radni dijagram je strmiji i linearan do blizine vrijednosti čvrstoće (ako nema vlakana)

MODUL ELASTIČNOSTI



- Ne vrijede isti empirijski izrazi za odnos ME i tlačne čvrstoće kao kod običnog betona

MODUL ELASTIČNOSTI

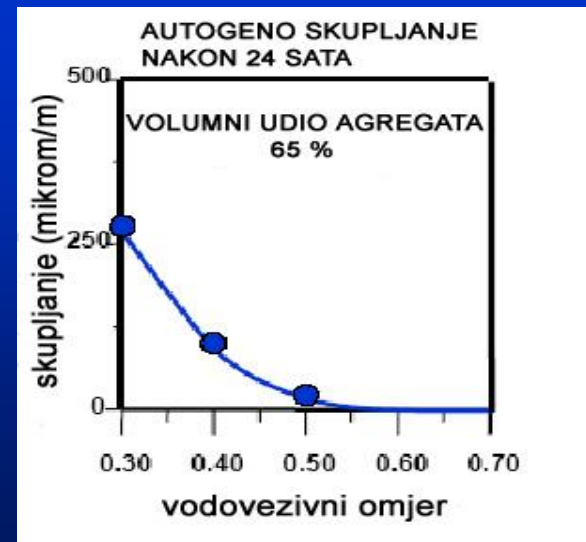
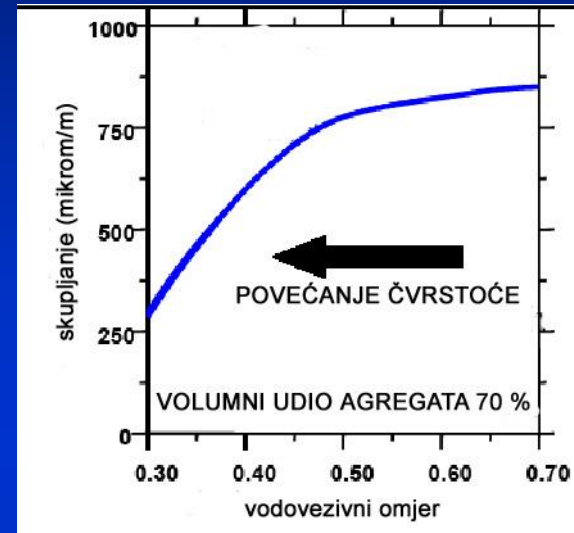


- Porast tlačne čvrstoće ne prati proporcionalni rast modula elastičnosti

SKUPLJANJE

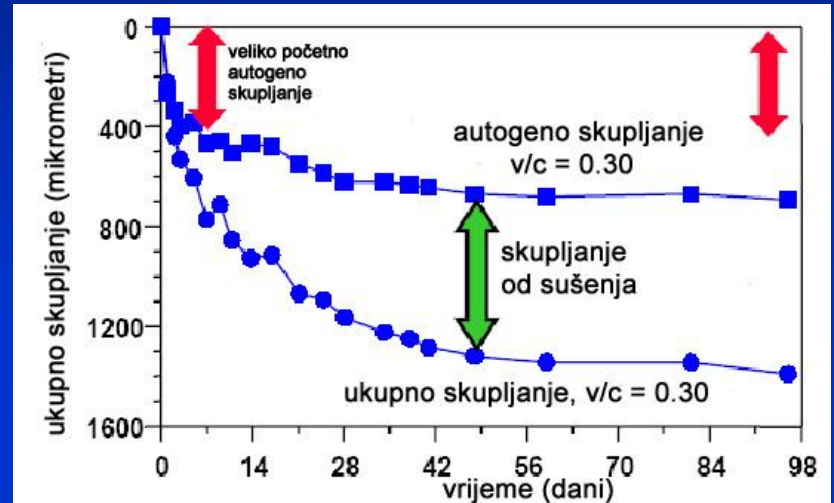
$$\varepsilon_{uk} = \varepsilon_{temperatura} + \varepsilon_{autogeno} + \varepsilon_{sušenje}$$

- Manje skupljanje nego kod običnog betona
- Skupljanje je primarno vezano uz način njegovanja, a ne uz količinu cementa
- Izraženo autogeno skupljanje



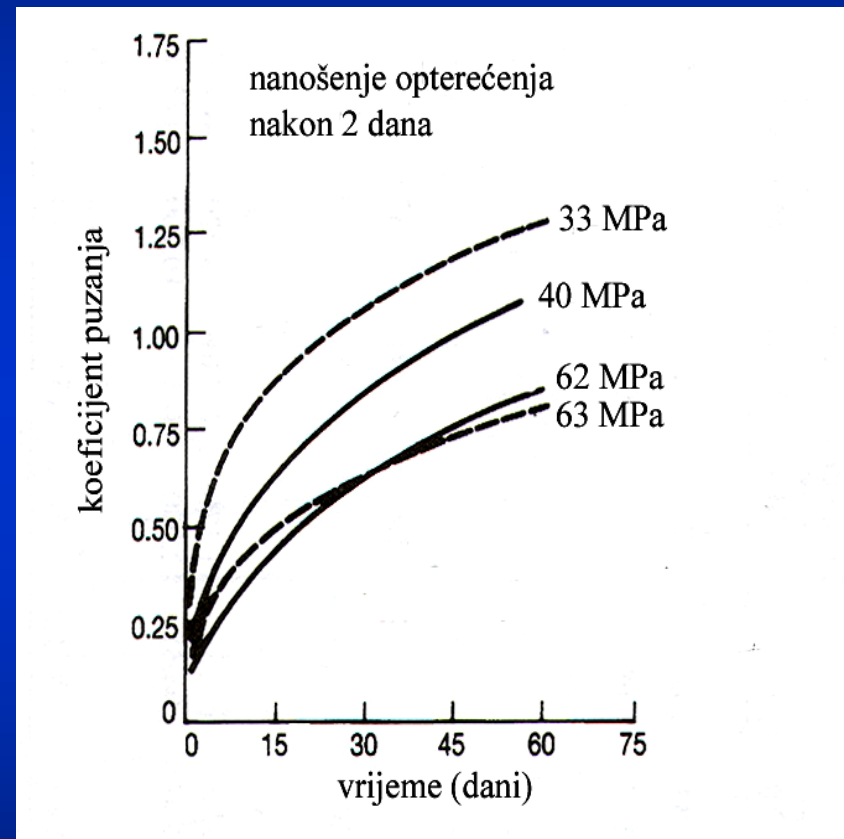
SKUPLJANJE

- Veliko autogeno skupljanje posljedica je sniženog vodovezivnog omjera
- Njegovanje treba početi što ranije i trajati što duže



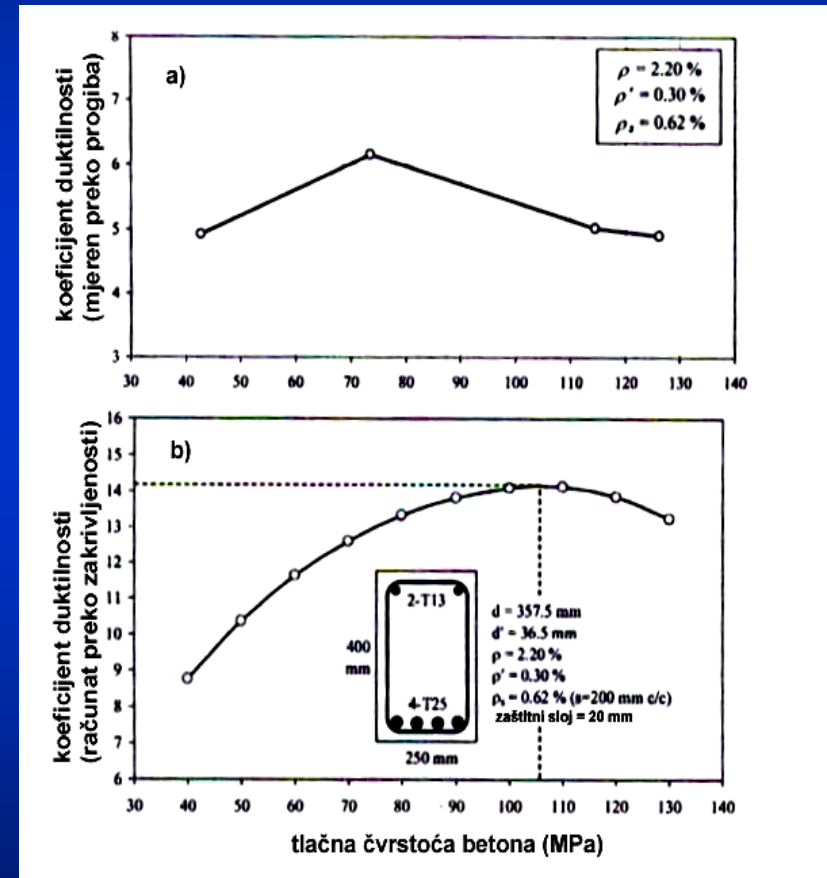
PUZANJE

- **Manje je puzanje kod betona visokih čvrstoća i visokih uporabnih svojstava nego kod običnih betona**



DUKTILNOST

- Povećanjem tlačne čvrstoće raste krtost betona
- Brzo odlamanje i drobljenje zaštitnog sloja u području plastičnih zglobova



DUKTILNOST

- Neki državni propisi u seizmičkim područjima ograničavaju čvrstoću betona, a pojedini primjenjuju modificirani proračun za ovijanje plastičnih zglobova
- Utjecaj armature na duktilnost elemenata od betona visokih čvrstoća



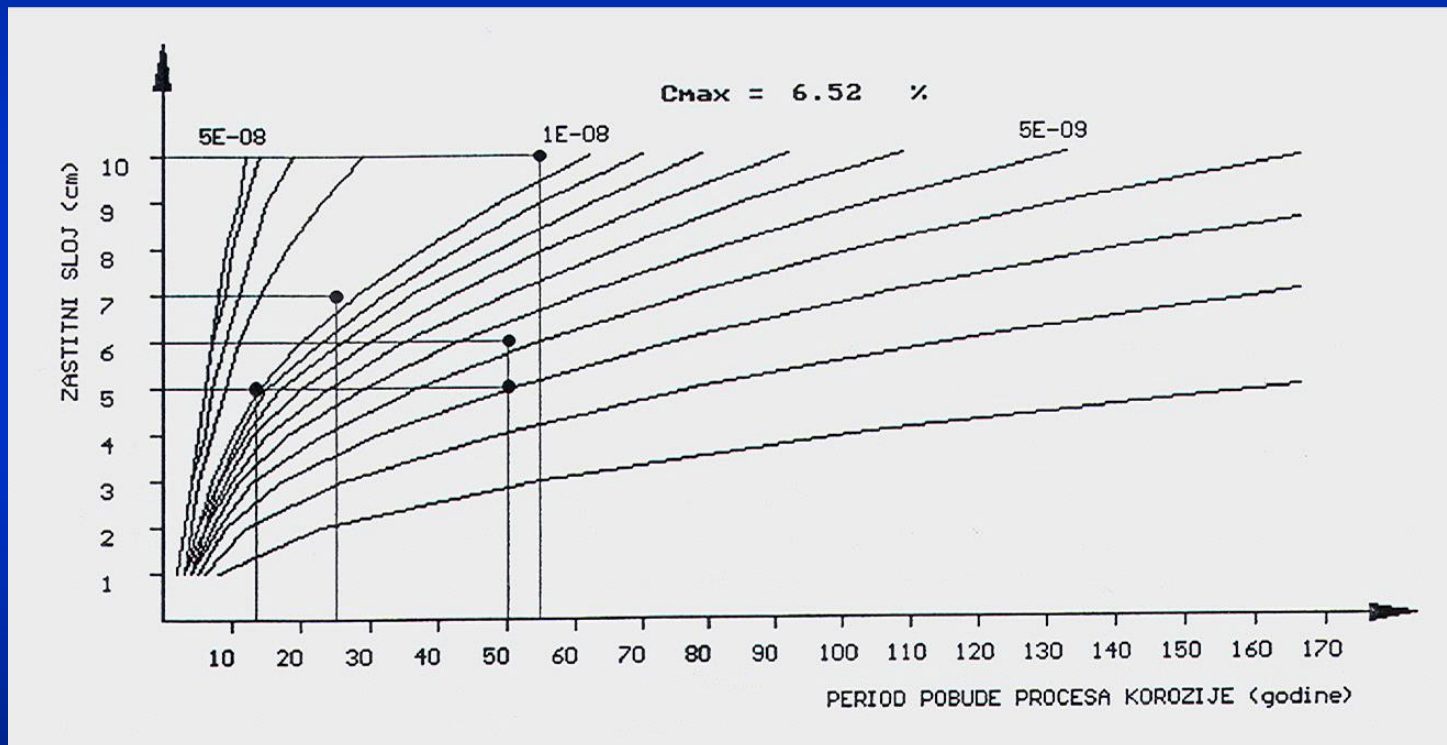
USPOREDBA TRAJNOSNIH SVOJSTAVA



Svojstvo	obični beton	beton visokih čvrstoća	beton ultra visokih čvrstoća
Koeficijent plinopropusnosti (m ²)	10 ⁻¹⁵ – 10 ⁻¹⁶	10 ⁻¹⁷	< 10 ⁻¹⁹
Koeficijent difuzije klorida (m ² /s)	1.1·10 ⁻¹²	0.6·10 ⁻¹²	2·10 ⁻¹⁴
Brzina korozije (μm/god)	1.2	0.25	< 0.01
Koeficijent abrazije	4	2.8	1.3
Ukupna poroznost (% vol.)	15	8-9	6
Kapilarna poroznost (% vol.)	8-9	5-6	1-2

ODREĐIVANJE VIJEKA TRAJANJA OBJEKATA

C-D-c-t monogram (Bjegović, Mikulić, Krstić)

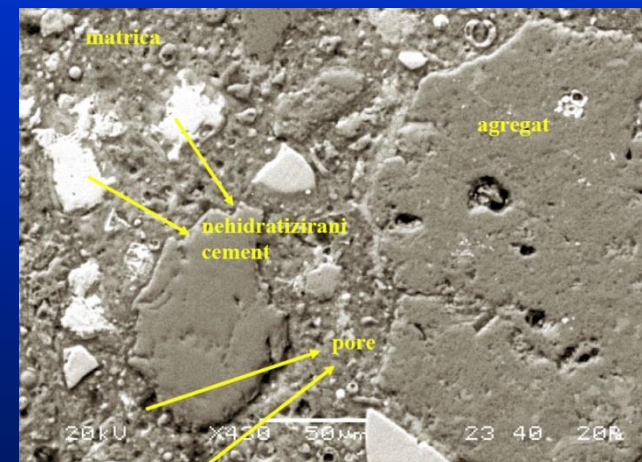
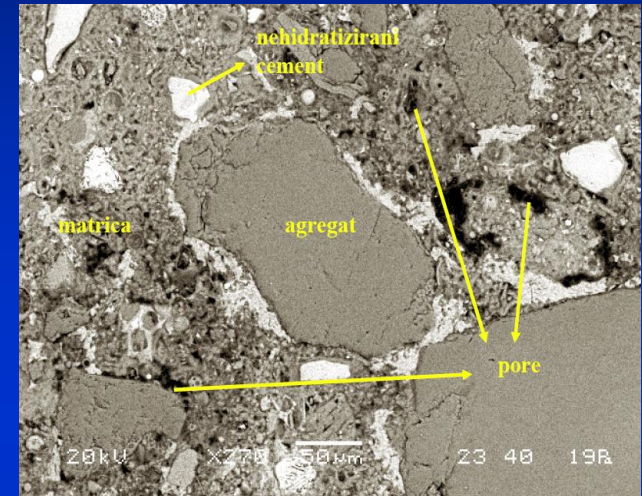


Obični beton $\rightarrow D_{C1} = 1.1 \cdot 10^{-8}$ cm²/s $\Rightarrow t_0 = 13$ godina

Beton visoke čvrstoće $\rightarrow D_{C1} = 3 \cdot 10^{-9}$ cm²/s $\Rightarrow t_0 = 50$ godina

STRUKTURA

- **Betoni visokih čvrstoća i uporabnih svojstava imaju homogeniju strukturu od običnog betona**
- **Zbog niskog vodovezivnog omjera i korištenja silikatne prašine imaju manju kapilarnu i ukupnu poroznost, veću količinu nehidratiziranog cementa i poboljšani sučeljak cementnog kamena i agregata**



TEHNOLOGIJA BETONA VISOKIH ČVRSTOĆA I UPORABNIH SVOJSTAVA

- **Proizvodnja, transport i ugradnja ovih betona je slična ili ista kao kod običnih betona**
- **Veća duljina miješanja pri proizvodnji**
- **Moguće su različite tehnologije ugradnje**



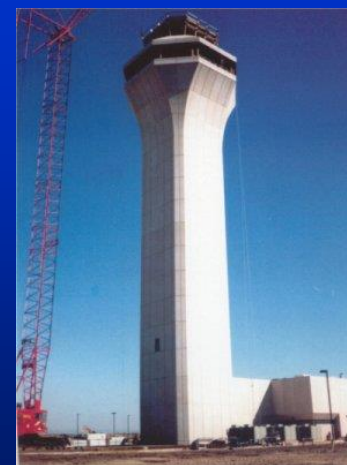
NJEGOVANJE

- Treba početi što prije i trajati što duže
- Bolji razvoj hidratacije betona
- Minimaliziranje skupljanja betona pravilnim njegovanjem
- Što beton postiže veću čvrstoću, to oslobađa više topline hidratacije, i veće je skupljanje



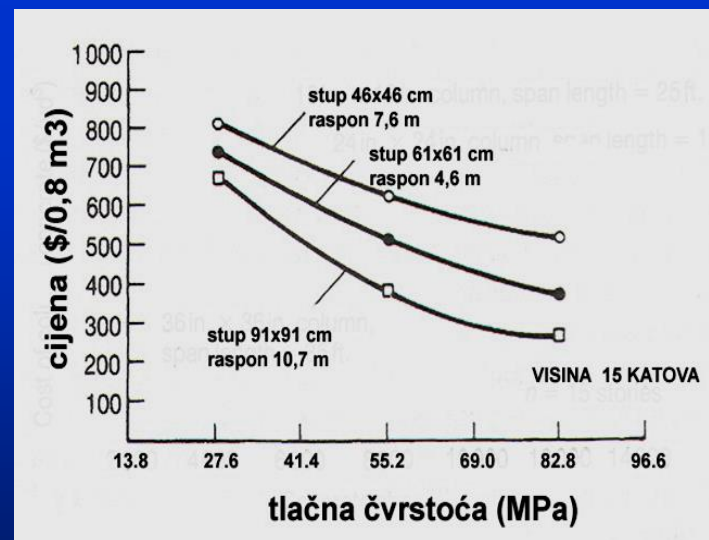
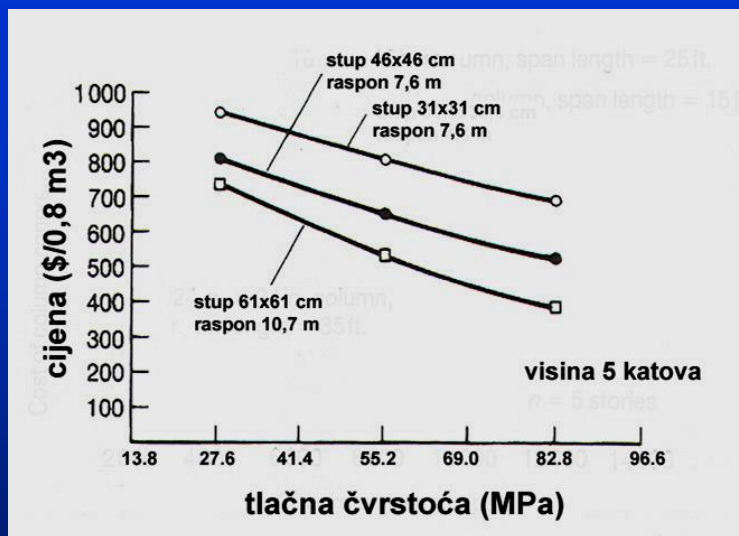
PRIMJENA BETONA VISOKIH ČVRSTOĆA I VISOKIH UPORABNIH SVOJSTAVA

- **VISOKOGRADNJA – STUPOVI I STROPNE KONSTRUKCIJE VISOKIH ZGRADA**
 - Manje dimenzije konstruktivnih elemenata utječu na povećanje iskoristivog prostora
 - Ranije skidanje oplata
 - Veća krutost, manje skupljanje i puzanje



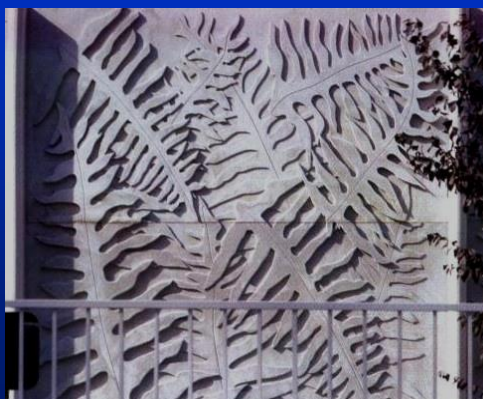
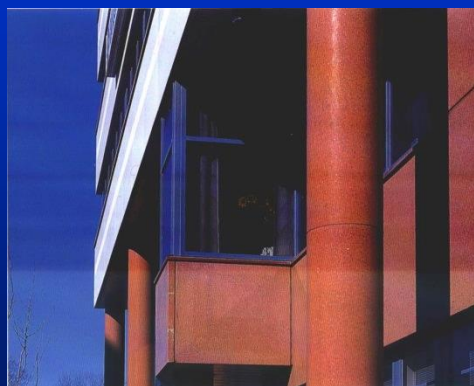
PRIMJENA BETONA VISOKIH ČVRSTOĆA I VISOKIH UPORABNIH SVOJSTAVA

- VISOKOGRADNJA - STUPOVI VISOKIH ZGRADA
 - Ekonomičnost primjene



PRIMJENA BETONA VISOKIH ČVRSTOĆA I VISOKIH UPORABNIH SVOJSTAVA

- **VISOKOGRADNJA**
 - Izrada arhitektonski zahtijevnih elemenata
 - Veći rasponi, manja vl.težina



PRIMJERI IZVEDENIH OBJEKATA VISOKOGRADNJE

- **Two Union Square (1987, Seattle, 138 MPa)**
- **Pacific First Center (1992, Seattle, 124 MPa)**
- **Chicago Mercantile (1982, Chicago, 97 MPa)**
- **Royal Bank Plaza (1975, Toronto, 61 MPa)**
- **La Leurentienne Building (1984, Montreal, 80 MPa)**
- **Melbourne Central (1991, Melbourne, 65 MPa) itd.**

PRIMJER

Two Union Square (1987, Seattle, USA)

- 58 etaža
- Visina 227 m
- Čelične cijevi promjera 3 m ispunjene betonom od 130 MPa (bez armature)
- Da bi se osigurala krutost konstrukcije i smanjile vibracije modul elastičnosti betona trebao je biti 50 GPa



PRIMJER

Two Union Square (1987, Seattle, USA)

- Čelične cijevi sa moždanicima duljine 300 mm koji su postavljeni na svakih 300 mm za zajednički rad betona i čelika
- Visina svake cijevi 7.2 m
- Beton je transportiran i ugrađivan po noći (do 750 m³)



PRIMJER

Two Union Square (1987, Seattle, USA)

- **Sastav betona:**

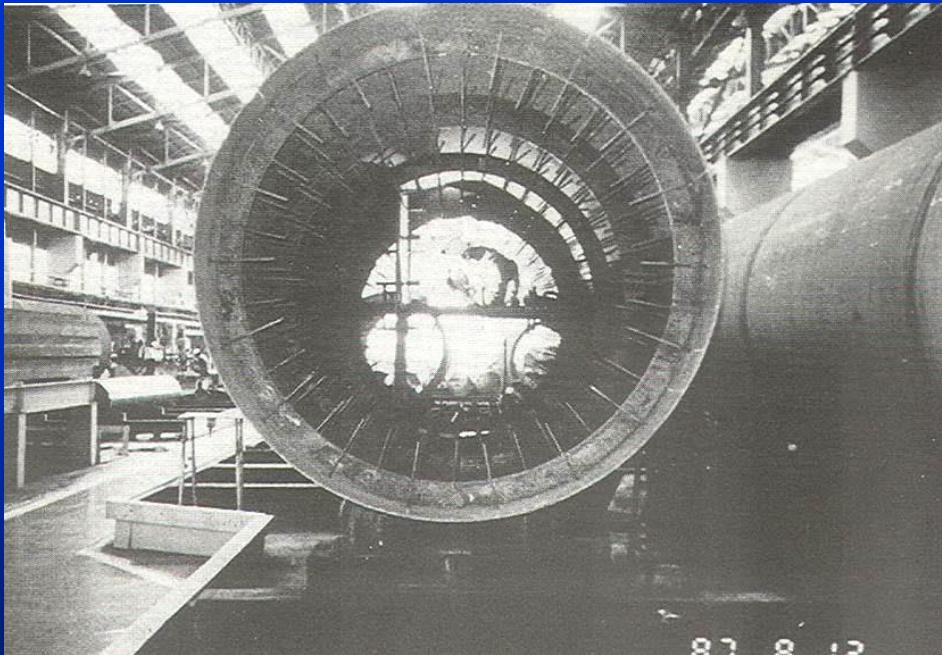
- **Cement** 564 kg
- **Silikatna prašina** 44 kg
- **Sitni agregat** 682 kg
- **Krupni agregat** 1100 kg
- **Voda** 124 l
- **Superplastifikator** 21 kg
 - **Vodovezivni omjer 0.20**
 - **Slijeganje 200-250 mm**



BETON VISOKIH ČVRSTOĆA

BETON VISOKIH UPORABNIH SVOJSTAVA

Two Union Square, Seattle



PRIMJER

Confederation Bridge (1997, Kanada)

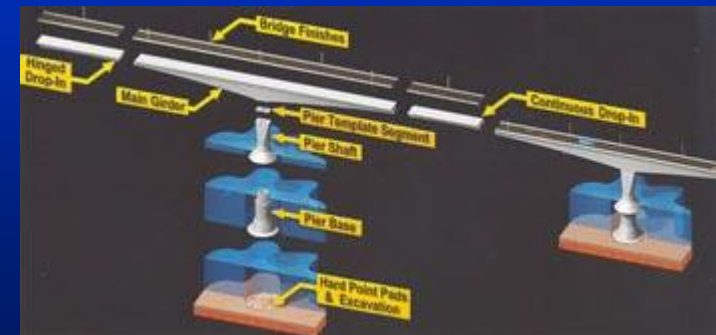
- Povezuje Prince Edward Island i New Brunswick, duljina cca 13 km
- Zaštita od leda betonom visokih uporabnih svojstava i čeličnom pločom



PRIMJER

Confederation Bridge (1997, Kanada)

- Projektirani vijek trajanja 100 godina
- Zahtjev: 500 ciklusa smrzavanje/odmrzavanje po ASTM C 666
- Ukupna količina betona visokih uporabnih svojstava 280 000 m³



PRIMJER

Confederation Bridge (1997, Kanada)

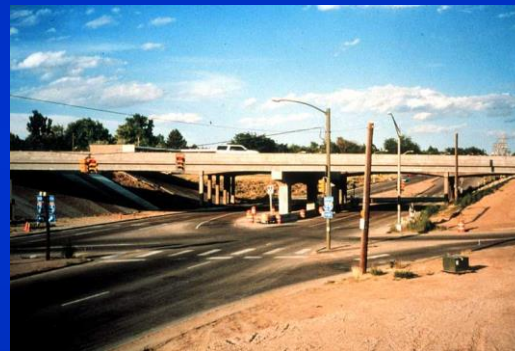
	Nosači	Zaštita od leda
Vodovezivni omjer	0.30	0.25
Voda	145	142
Cement	430	520
Leteći pepeo	45	60
Krupni agregat	1030	1100
Sitni agregat	703	748
Aerant	1.80	1.60
Usporivač vezanja	-	0.58
Superplastifikator	3.20	6.00
Plastifikator	-	0.58



PRIMJENA BETONA VISOKIH ČVRSTOĆA I VISOKIH UPORABNIH SVOJSTAVA

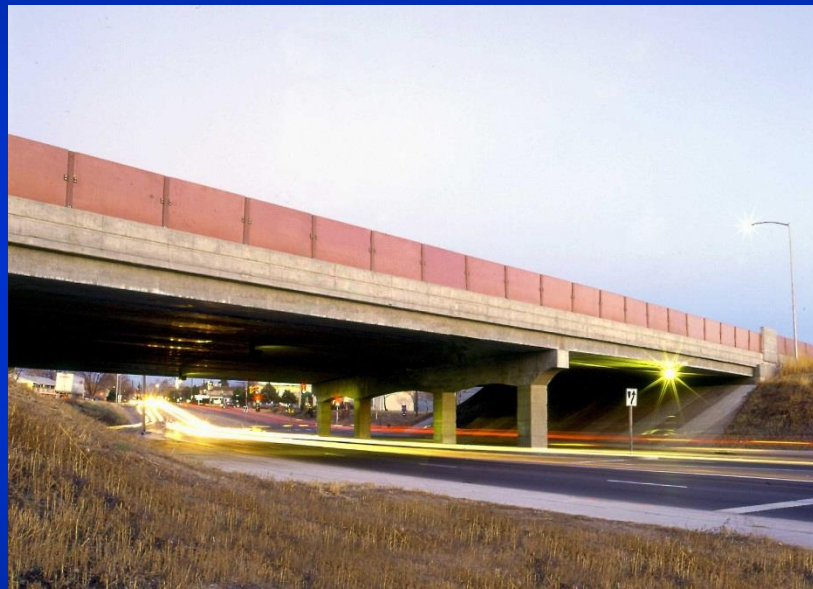
• MOSTOGRADNJA

- Veći rasponi, veća trajnost
- Manji gubici sile prednapinjanja
- Smanjeni troškovi održavanja



PRIMJERI IZVEDENIH MOSTOVA

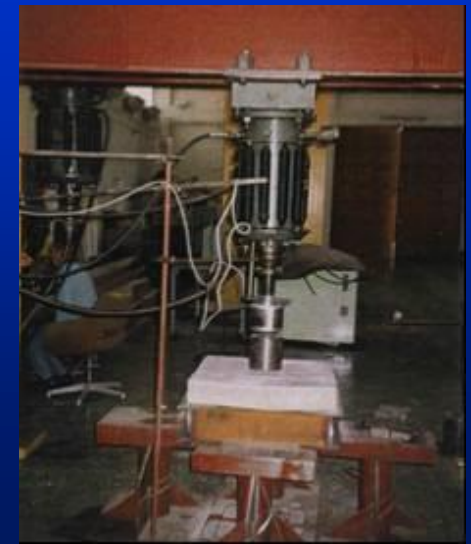
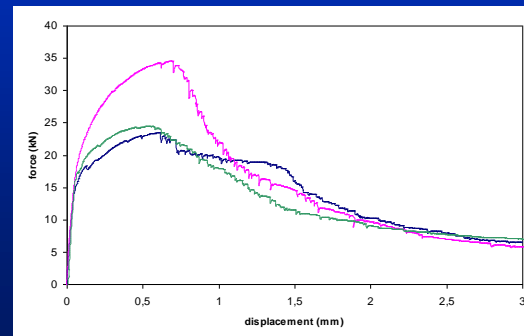
- **I-25 and Yale Bridge (Colorado, 69 MPa)**



- **Nova Scotia Bridge (Kanada, 60 MPa)**
- **Mile Creek Bridge (Ontario, 80 MPa) itd.**

PRIMJENA BETONA VISOKIH ČVRSTOĆA I VISOKIH UPORABNIH SVOJSTAVA

- TUNELOGRADNJA
 - MLAZNI BETON
 - Brz prirast čvrstoće
 - Manji odskok
 - Veća trajnost



PRIMJENA BETONA VISOKIH ČVRSTOĆA I VISOKIH UPORABNIH SVOJSTAVA

- **KONSTRUKCIJE U
AGRESIVNOJ
OKOLINI**

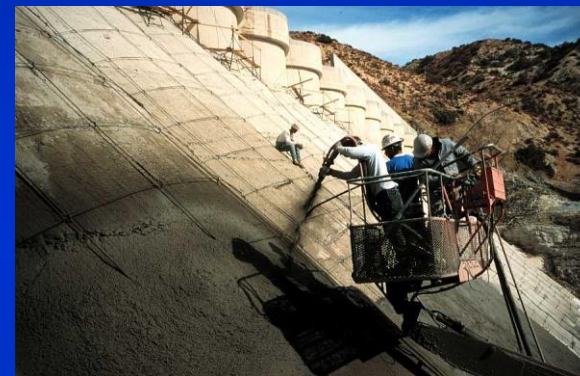
- Zbog poboljšanih svojstava trajnosti primjereni su uporabi u različitim agresivnim sredinama gdje postoji rizik pojave korozije armature ili drugih oblika oštećenja armiranobetonskih konstrukcija



- Manji troškovi održavanja

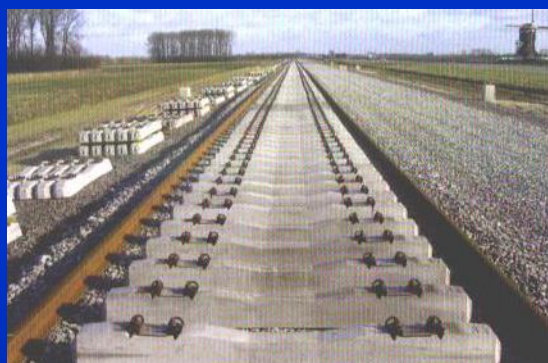
PRIMJENA BETONA VISOKIH ČVRSTOĆA I VISOKIH UPORABNIH SVOJSTAVA

- SANACIJE I OJAČANJA
ARMIRANOBETONSKIH
KONSTRUKCIJA



PRIMJENA BETONA VISOKIH ČVRSTOĆA I VISOKIH UPORABNIH SVOJSTAVA

- PREDGOTOVLJENI BETONSKI ELEMENTI



BETONI ULTRA VISOKIH ČVRSTOĆA

BETONI ULTRA VISOKIH ČVRSTOĆA

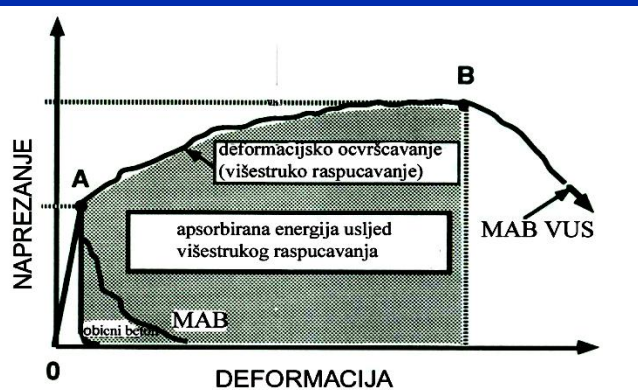
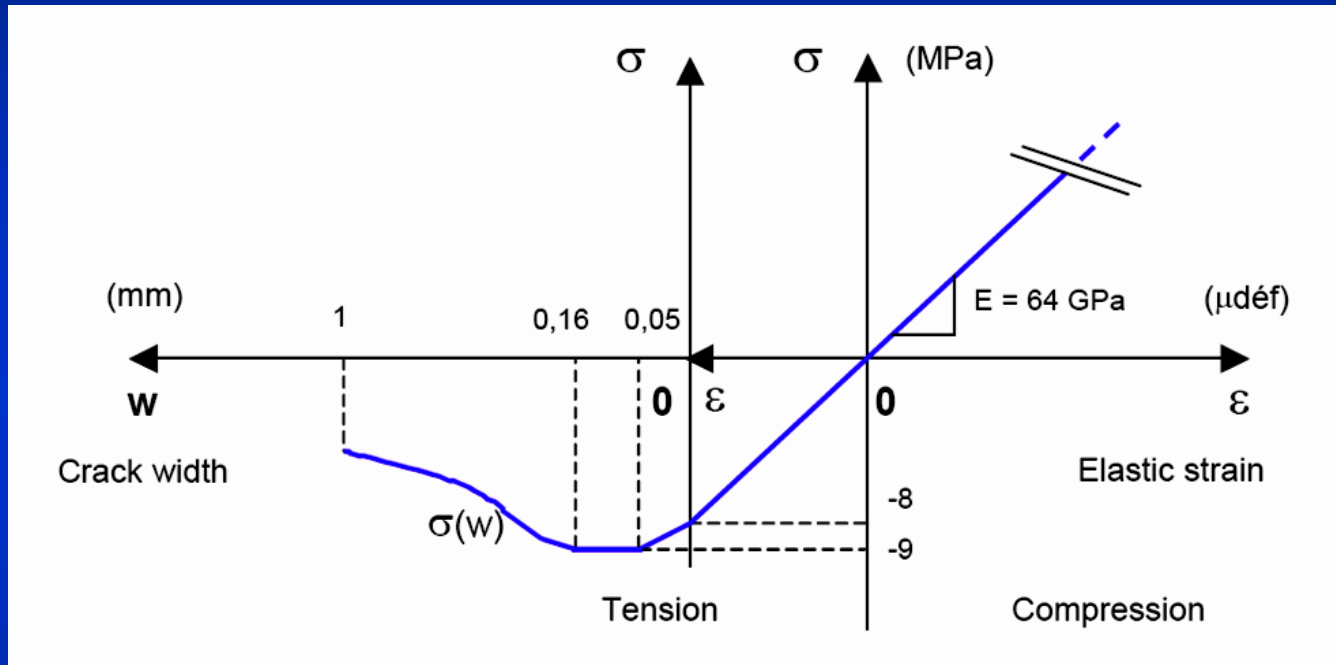
- S obzirom na vrijednosti tlačne čvrstoće to su betoni razreda tlačne čvrstoće većeg od C 100/115
- Sastavne komponente: cement, silikatna prašina, superplastifikator, kvarcni pijesak, krupni agregat, čelična vlakna, voda
- Koriste se za nearmirane konstruktivne elemente sa ili bez prednapinjanja

OSNOVNI PRINCIPI DOBIVANJA BETONA ULTRA VISOKIH ČVRSTOĆA

- Povećanje homogenosti djelomičnom ili potpunom eliminacijom krupnog agregata
- Povećanje gustoće ugrađenog betona optimaliziranjem granulometrijskog sastava
- Poboljšanje mikrostrukture toplinskim tretiranjem ugrađenog betona
- Poboljšanje duktilnosti dodavanjem vlakana



BETONI ULTRA VISOKIH ČVRSTOĆA



USPOREDBA MEHANIČKIH SVOJSTAVA

Svojstvo	obični beton	beton visokih čvrstoća	beton ultra visokih čvrstoća
Gustoća (g/cm ³)	2.3	2.4	2.5 - 2.6
Tlačna čvrstoća (MPa)	< C 50/60	C 55/67 – C 100/115	> C 100/115
Svojna čvrstoća (MPa)	5 - 6	7 - 9	20 - 60
Vlačna čvrstoća (MPa)	2 - 3	3 - 4	8 - 12
Modul elastičnosti (GPa)	25 - 40	40 - 45	45 - 60

USPOREDBA TRAJNOSNIH SVOJSTAVA

Svojstvo	obični beton	beton visokih čvrstoća	beton ultra visokih čvrstoća
Koeficijent plinopropusnosti (m ²)	10 ⁻¹⁵ – 10 ⁻¹⁶	10 ⁻¹⁷	< 10 ⁻¹⁹
Koeficijent difuzije klorida (m ² /s)	1.1·10 ⁻¹²	0.6·10 ⁻¹²	2·10 ⁻¹⁴
Brzina korozije (μm/god)	1.2	0.25	< 0.01
Koeficijent abrazije	4	2.8	1.3
Ukupna poroznost (% vol.)	15	8-9	6
Kapilarna poroznost (% vol.)	8-9	5-6	1-2

PREDNOSTI BETONA ULTRA VISOKIH ČVRSTOĆA ZA KONSTRUKTIVNU PRIMJENU

- reduciranje dimenzija konstruktivnih elemenata
- velika sloboda u konstruktivnom oblikovanju
- eliminacija meke armature
- estetski kvalitetan izgled površine
- znatno produljena trajnost
- minimalni troškovi za održavanje i sanaciju
- duktilnost i sposobnost apsorpcije energije



PRIMJENA BETONA ULTRA VISOKIH ČVRSTOĆA

- mostovi
- konstruktivni elementi u iznimno agresivnoj okolini
- konstrukcije velikih raspona
- stupovi nebodera
- elementi za sanaciju
- elementi složenog oblika i obrade površine
- trezori za čuvanje vrijednosti
- zaštitni paneli od udara projektila i eksplozija
- kontejneri za čuvanje radioaktivnog i drugog otpada itd.

