

Slika 1.1 Volumenski odnosi konstituenata prisutnih u svežem (a) i očvrslom betonu (b).

Materijali za izradu betona

- Agregat (70 – 80% u betonskoj masi)
- Cement (15 – 20% u betonskoj masi)
- Voda (5 – 10% u betonskoj masi)
- Aditivi (neobavezni, ali se u novije vreme vrlo često koriste)

AGREGAT KAO KOMPONENTA BETONA

- Učestvuje sa 70 – 80 % u masi betona
- Ravnopravno se koriste

Prirodni (rečni) šljunak i pesak (jeftiniji, povoljniji oblik zrna – ugradljivost i obradljivost)

Drobljeni krupan i sitan agregat (bolje povezivanje zrna – oštroivičnost, veća athezija sa cementnim kamenom)

- Štetni sastojci u agregatu: škriljci, lapori, serpentini, liskun, ugali

Liskuna sme da ima najviše: 1%, odnosno 2%, za beton koji će biti stalno u vodi

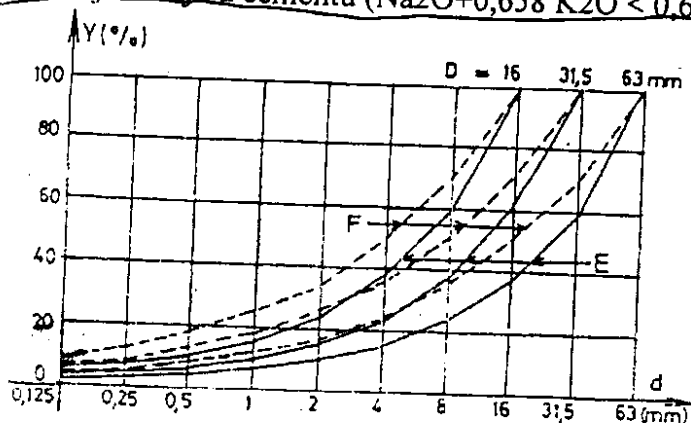
- Reaktivni, alkalno – silikatni sastojci (amorfna silicija):

U krupnom agregatu < 5%

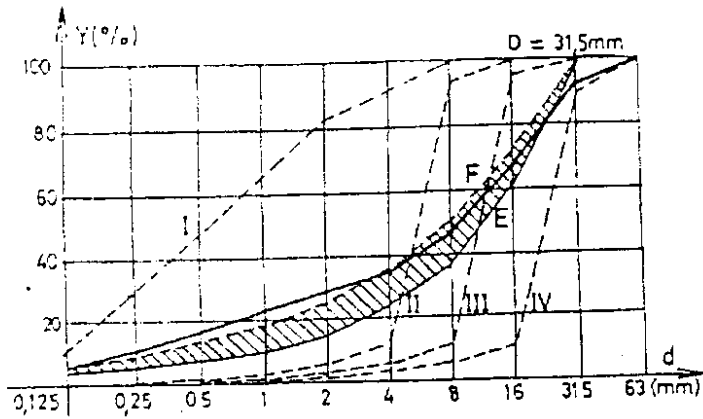
U sitnom agregatu < 0,5%

- Do alkalno – silikatne reakcije neće doći ukoliko je:

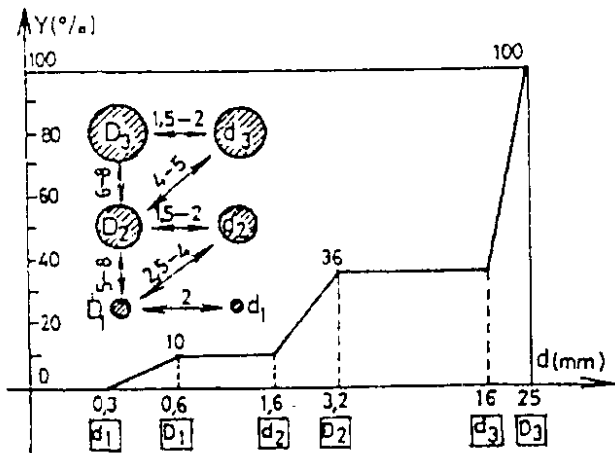
Sadržaj alkaliya u cementu ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O} < 0,6\%$ po masi)



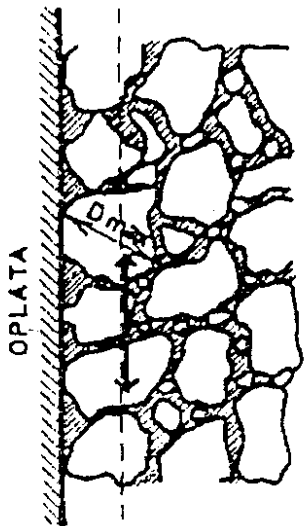
Slika 1.6 Fullerove i EMPA krive.



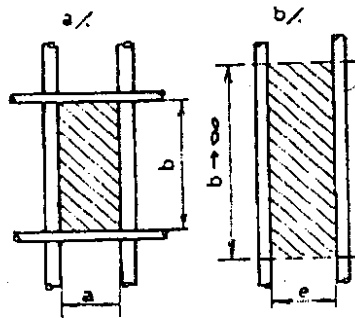
Slika 1.8 Granulometrijska kriva agregata sastavljenog od četiri frakcije.



Slika 1.10 Valetova diskontinualna granulometrijska kompozicija agregata.

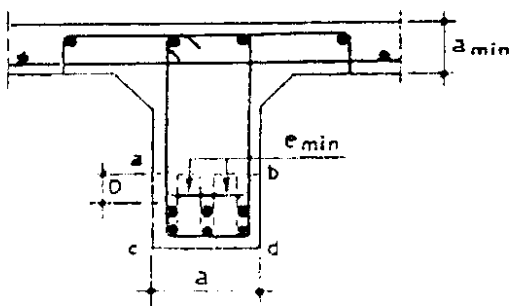


$$R = \frac{V}{S} = \frac{\text{zapremina koja se ispunjava betonom}}{\text{ukupna površina zidova i armature}}$$



Sl. 6.9 Efekat rešetke

Sl. 6.10. Efekat zida



Sl. 6.7. Elementi za definisanje zrna veličine D
 $D \leq a_{min} / 3$; $D \leq a / 4$; $D \leq 1.25 e_{min}$

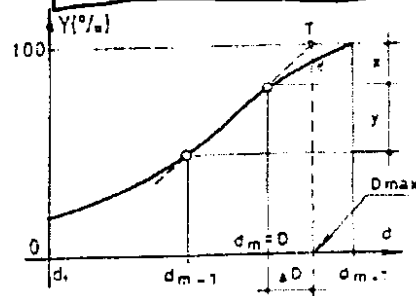
$$E_z = 0.8 - 1.0 (E_z = 0.9)$$

$$\Rightarrow D_{max} \leq 0.9 R$$

$$E_r \leq 1.4 \text{ za rečni agregat}$$

$$E_r \leq 1.2 \text{ za drobljeni agregat}$$

$$\Rightarrow D_{max} \leq 1.4 \rho \quad (D_{max} \leq 1.2 \rho)$$

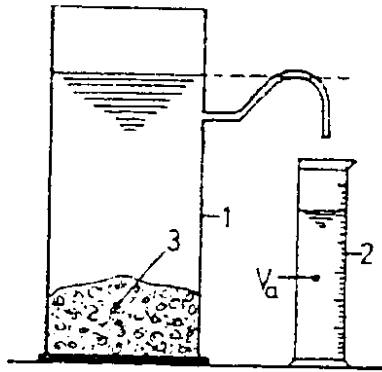


Sl. 6.8. Određivanje zrna veličine D_{max}

$$D_{max} = D + \Delta D = d_m + (d_m - d_{m-1}) x / y$$

Vlažnost agregata i njeno određivanje

- S obzirom na značaj vodo cementnog faktora u proizvodnji betona, vlažnost agregata mora biti uzeta u obzir prilikom doziranja. Kako uobičajeni postupak određivanja vlažnosti – putem sušenja do konstantne mase dugo traje, potrebno je primeniti mnogo brži postupak – putem sifonskog suda.



Slika 1.12 Postupak određivanja površinske vlažnosti agregata.

- Postupak podrazumeva određivanje mase vlažnog agregata M_{av} vagom, a zatim njegove zapremine V_{av} pomoću sifonskog suda i men-zure (v. sliku). (γ_{sa} je prethodno određeno za čitavu isporuku agregata).

$$H_a = \frac{\frac{V_{av} - \frac{M_{av}}{\gamma_{sa}}}{\frac{M_{av}}{\gamma_v} - V_{av}}} \cdot 100 \quad [\%]$$

CEMENT KAO KOMPONENTA BETONA

Učestvuje u betonu sa svega 10 – 20 % po masi, ali ima vrlo veliki uticaj na svojstva betona.

- Izbor cementa treba vršiti na osnovu njegovih sledećih svojstava:

Čvrstoća i brzina rasta čvrstoće (klasa cementa)

Toplota hidratacije

Hemijska otpornost

- Cemente sa dodatkom pucolana ili sa mešanim dodatkom koristiti samo za konstrukcije u vlažnoj sredini

Minimalne količine cementa za armiranobetonske konstrukcije:

250 kg/m³, za beton koji nije izložen atmosferilijama,

300 kg/m³, za beton koji je izložen atmosferilijama,

350 kg/m³, za beton izložen agresivnim uticajima.

- Minimalna količina cementa u funkciji nominalno najkrupnijeg zrna agregata:

min $m_c = \frac{550}{\sqrt{D}}$ kg/m³, odnosno

min $m_c = \frac{700}{\sqrt{D}}$ kg/m³, ako se radi o betonu izloženom hemijskoj agresiji

- U praksi, količina cementa se najčešće kreće u granicama 300 – 400 kg/m³

Tabela 3 - Najvažnija fizička svojstva cementa - uslovi kvaliteta

Svojstvo	Vrsta cementa	Klasa čvrstoće	Zahtevi kvaliteta
Finoća mliva (ostatak na situ)	sve vrste	sve klase	≤ 10 %
Specifična površina	sve vrste	sve klase	≥ 2400 cm ² /g
Vreme vezivanja	Početak	sve vrste	32,5 N
			32,5 R
			42,5 N
			42,5 R
			52,5 N
			52,5 R
Postojanost zapremine	Kraj	sve vrste	sve klase
	Le Shatellier	sve vrste	sve klase
	Količnici	sve vrste	sve klase

¹⁾ Cement je postojane zapremine ako nema pojava radijalnih i neregularnih pukotina, krivljenja, mevljenja, raspadanja, vitoperenja

Voda kao komponenta betona

Voda kao komponenta učestvuje u betonu sa 5 – 10 % po masi.

- Voda za spravljanje betona ne sme da sadrži:

Sastojke koji utiču na proces hidratacije cementa

Sastojke uzročnike korozije armature u armiranobetonskim konstrukcijama

- Ovi sastojci mogu da budu:

Rastvoreni u vodi

U vidu čvrstih, suspendovanih primesa (muljevite, blatne, glinene, drvene, ugljene čestice i dr.)

Voda je podobna za izradu betona ako je:

Vodonikov pokazatelj (pH) 4,5 – 9,5

Sulfatnih jona manje od 2700 mg/l

Hloridnih jona manje od 300 mg/l

Indeks organskih sastojaka manji od 200 mg/l

Ukupno rastvorenih soli manje od 5000 mg/l (ne odnosi se na morsku vodu)

- Obična voda za piće: bez posebnih dokaza o podobnosti
- Morska voda: Može se upotrebiti za spravljanje betona za nearmirane konstrukcije (izuzev kod primene AC)

Aditivi (dodaci) kao komponenta betona

Aditivi (dodaci) su neobavezna, četvrta komponenta betona, kojom se, dodavanjem betonu prilikom spravljanja u vrlo maloj količini, mogu poboljšati neka svojstva svežeg i /ili očvrstlog betona.

- U opštem slučaju, najčešće se radi o sledećim vrstama aditiva (dodataka):

Plastifikatori (superplastifikatori),

Aeranti (uvlačivači vazduha),

Akceleratori (ubrzivači vezivanja i/ili očvršćavanja),

Retarderi (usporivači vezivanja),

Zaptivači,

Antifrizi (dodaci za betoniranje na niskim temperaturama).

Plastifikatori (superplastifikatori):

- Fino dispergovani materijali–bentonit, EF–pepeo, pucolani i dr.
- Površinski aktivne supstance, koje u svežem betonu deluju kao svojevrsna “maziva” – obavijaju zrnca cementa, stvarajući oko njih tanke opne, usled čega se značajno smanjuje trenje u masi
- Superplastifikatori u obliku površinski aktivnih supstanci danas imaju vrlo široku primenu, pri čemu se njihovim dodavanjem svežem betonu:
 - Snižava viskozitet, tj. poboljšava ugradljivost i obradljivost, nemenjajući pritom količinu vode u betonu, ili
 - Omogućava značajno smanjenje količine vode (HRWRA) bez promene viskoziteta (ugradljivosti i obradljivosti) betonske smeše

Aeranti (uvlačivači vazduha):

- U strukturi betona formiraju fine mehuriće (globule) vazduha reda veličine 0,01 – 0,3 mm, ravnomerno raspoređene u masi cementnog kamena, na međusobnim rastojanjima do 0,25 mm.
- Ovakva struktura betona uslovljava povećanje otpornosti očvrstlog betona na dejstvo mraza, jer “uvučeni” mehurići prekidaju mrežu finih kapilara u cem. kamenu, čime se, sa jedne strane smanjuje upijanje vode, a sa druge strane dobija prostor (za oko 20% rezervne zapremine pora) za širenje leda, čime se eliminišu unutrašnji naponi, koji dovode do destrukcije očvrstlog betona
- Optimalni procenat uvučenog vazduha obično iznosi 4–6% u odnosu na ukupnu zapreminu betona, čime se ne smanjuje čvrstoća betona, pošto uvučeni mehurići igraju i ulogu plastifikatora (smanjenje količine vode)

Akceleratori (ubrzivači vezivanja i/ili očvršćavanja):

- Najpoznatiji i najčešće primenjivan ubrzivač je, nsumnjivo, CaCl_2 , koji ne utiče bitno na vezivanje cementa, ali u značajnoj meri ubrzava proces očvršćavanja cementa. U količini od samo 0,2% u odnosu na masu cementa omogućava brzi rast čvrstoće u prvih 7 dana, dok pri dozi od 2% ponekad omogućava da se nakon 7 dana dobiju 28-dnevne čvrstoće
- Kako joni hlorida, kao što je već ranije naglašavano, veoma ozbiljno utiču na koroziju čelične armature u betonu, u novije vreme koriste se bezhlorni aditivi ubrzivači, koji takođe doprinose brzom rastu čvrstoće
- Razume se da je prevashodna primena ove vrste aditiva prilikom betoniranja pri niskim temperaturama

Retarderi (usporivači vezivanja):

- Retarderi deluju na taj način što oko zrna cementa stvaraju opne koje sprečavaju brzo odvijanje hemijskih reakcija na relaciji cement – voda

- Najpoznatiji i najrašireniji usporivač je sadra $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ o kojoj je već bilo reči u poglavlju mineralna (neorganska) veziva

- Pored sadre, kao retarderi se koriste i dekstrin, razne vrste šećera (glikoza, saharoza), glicerina, oksidi cinka, olova i dr. Treba napomenuti da se ove materije dodaju u vrlo malim količinama, reda veličine 0,1% i da postoje takvi aditivi koji do određenog procenta deluju kao usporivači, dok pri većim količinama kao ubrzivači vezivanja cementa

- Primena retardera dolazi u obzir pri betoniranju na visokim temperaturama, pri transportovanju betona na dužim relacijama, u situacijama koje nalažu izvođenje betoniranja bez prekida i slično

Zaptivači:

- Sastav aditiva zaptivača tako je podešen da se nakon njihove reakcije sa klinker mineralima dobijaju produkti koji zaptivaju kapilarne pore u cementnom kamenu. Na taj način se povećava stepen vodonepropustljivosti očvrslog betona

- Dobijaju se na bazi masnih kiselona, a upotrebljavaju u obliku emulzija ili smolastih bitumenoznih formulacija

o Antifrizi

- Antifrizi su sredstva protiv zamrzavanja svežeg betona – deluju tako što snižavaju tačku smrzavanja vode u njemu

- Njihovom upotrebom omogućava se izvođenje betonskih radova i na temperaturama nižim od 00°C (CaCl_2 , natrijum nitrat, NaCl (kuh. so) i dr.

- U slučaju nearmiranih konstrukcija primenjuju se u dozama i do 10%

Danas na tržištu postoji vrlo veliki asortiman aditiva i oni uglavnom nose različita trgovačka imena

■ Uz ove aditive idu i prospekti u kojima se daju uslovi primene i doziranja. Ovi uslovi se, međutim, uglavnom odnose na primenu sa čistim PC, a kako se čist PC kod nas primenjuje u vrlo ograničenim količinama, svaki od aditiva treba ispitati sa onim cementom sa kojim će se primenjivati

■ Kad je reč o aditivima plastifikatorima (superplastifikatorima), ubrzivačima, a posebno aditivima usporivačima, u cilju određivanja njihovih potrebnih doza, osim laboratorijskih ispitivanja, potrebno je vršiti i ispitivanja u realnim uslovima, na realnim temperaturama

SVOJSTVA SVEŽEG BETONA

Svež beton je specifičan, višekomponentni polidisperzan sistem, koji se dobija homogenizacijom mešavine komponentnih materijala o kojima je bilo reči u prethodnom poglavlju.

■ U ovom sistemu prisutne su fino disperzne čestice – cement, vrlo sitne čestice agregata i eventualno neki praškasti mineralni dodaci, zatim znatno krupnija zrna sitnog i krupnog agregata, voda, aditivi (eventualno) i mehurići vazduha (namerno uvučenog putem aditiva aeranta ili zarobljeni u svežem betonu tokom mešanja).

■ Usled prisustva unutrašnjih sila međudejstva čestica čvrste i tečne faze (medumolekularne sile, sile viskoznog trenja, kapilarne sile),

svež beton poseduje određen stepen kohezivnosti (strukturnu čvrstoću), ali se odlikuje i svojstvima koja su karakteristična za viskozne tečnosti.

■ Njegova svojstva su na sredini između “pravih” viskoznih tečnosti i čvrstih tela, pri čemu on poseduje svojstva tzv. “strukturirane viskozne tečnosti.

Od pravih tečnosti razlikuje se posedovanjem strukturne čvrstoće, a od čvrstih tela srazmerno malom elastičnošću i sposobnošću podnošenja značajnih plastičnih deformacija, čak i pri vrlo malim opterećenjima.

■ Svojstva svežeg betona zavise od velikog broja uticajnih parametara ali se celokupan kompleks ovih parametara generalno može svesti na dva osnovna faktora:

Karakteristike komponenata i strukturu mešavine.

➊ Jedno od najznačajnijih svojstava ovog sistema ogleda se u sposobnosti da pod uticajem različitih mehaničkih dejstava menja svoja svojstva. Reč je o “tiksotropiji”, tj. o pojavi promenljivosti parametara viskoznosti u funkciji mirovanja, odnosno kretanja čestica.

➋ Drugo bitno svojstvo je stalna promenljivost parametara u funkciji vremena (gubljenje fluidnosti, povećanje viskoznosti i dr.), što je uslovljeno odvijanjem fizičko – hemijskih procesa tokom hidratacije cementa.

Struktura svežeg betona

Struktura svežeg betona najčešće se razmatra kao struktura sistema koji se sastoji od dve komponente (faze) – cementne paste i agregata.

U sastav cementne paste uvek se uračunavaju i vrlo fine čestice agregata (ispod 0.09 mm), kao i eventualni mineralni dodaci (bentonit, EF – pepeo, pucolani i dr.)

■ Velika specifična površina ovih najsitnijih čestica ima za posledicu pojavu unutrašnjih sila veze u svežem betonu - sile apsorpcionog, molekularnog i kapilarnog međudejstva.

■ Ove sile bitno utiču na sva svojstva svežeg betona, a u prvom redu na stepen povezanosti (kohezivnost) sistema.

■ Svojstva cementne paste, kao i svežeg betona, zavise od odnosa čvrste i tečne faze: sa povećanjem sadržaja vode povećava se pokretljivost (fluidnost) a smanjuje strukturna čvrstoća.

■ Voda o kojoj je reč najčešće je vezana voda (hemijski ili fizički).

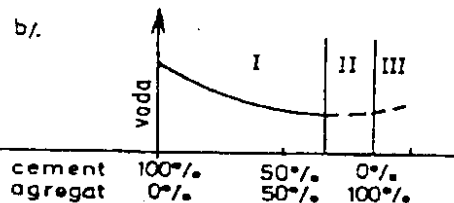
U tablici na sled. slajdu dati su neki podaci o vodi u svežem betonu. Iz priložene tablice se vidi da se osnovna količina vode koju sadrži svež beton nalazi u cementnoj pasti – u prostorima između zrna cementa i drugih praškastih komponenata.

■ Ovi prostori su reda veličine 0,001 – 0,050 mm, ponekad i nešto veći, što je za nekoliko desetina, pa i stotina puta veće od slojeva vode apsorbovane na površinama čestica (fizičko - hemijski vezana voda). Stoga ova voda, tzv. "slobodna voda", najviše utiče na fluidnost paste, odn. svežeg betona

Tabela 2.1 Količine i načini vezivanja vode u svežem betonu

Karakter veze	Orijentacioni relativni sadržaji vode u odnosu na ukupnu količinu (%)	
	u sveže pripremljenoj mešavini	u periodu vezivanja cementa
Hemijska – u tačno određenim kvantitativnim odnosima	1-2	4-5
Fizičko-hemijska – apsorpciona voda na površinama zrna	3-5	20-25
Mehanička – strukturna (voda u šuplinama, porama i kapilarama)	93-95	70-75

U zavisnosti od odnosa cem. paste i agreg., definišu se 3 tipa strukture svežeg betona:



Slika 2.1 Tipovi strukture svežeg betona.

■ Struktura II (nastavak)

- Da bi se ostvarila fluidnost kao kod Strukture I, potreban je veći mv/mc faktor, ili određenim uticajima smanjiti viskoznost mešavine (vibriranje, prit.)

● Struktura III

- Cementne paste je malo, ona samo obavića zrna agregata tankim slojem, a prostore između zrna delimično ispunjava.
- Obradljivost mešavine veoma slaba i pri kompaktiranju, ako je uopšte moguće, moraju se primeniti posebni postupci.
- Uticaj agregata na svojstva vrlo veliki (suvo trenje u mešav.)

Reološka svojstva

- Sa pozicija reologije, svež beton se može razmatrati kao elasto - plastično – viskozno telo (sistem), čije ponašanje ne zavisi samo od sastava, strukture i svojstava komponenata, već takode i od vremena i intenziteta spoljašnjih dejstava koja se primenjuju u procesu tehnološke obrade.

● Struktura I

- Zrna agregata veoma udaljena (razmaknuta) zbog prisustva velike količine cementne paste, tako da njihovo uzajamno delovanje ne postoji.
- Dobra fluidnost i dobra kompaktibilnost mešavine.

● Struktura II

- Cementne paste manje – samo ispunjava prostore između zrna, sa neznatnim razdvajanjem susednih zrna slojem "maziva" debljine 1-3 preč. zrna cementa.
- Dopunski efekat trenja, usled čega je slabija ugradljivost i obradljivost mešavina.

Ovo ponašanje bi se, generalno posmatrano, moglo definisati opštim izrazom za naprezanje pri tečenju: $\tau = c + \eta \cdot \frac{dy}{dt} + \sigma \cdot \eta \cdot \varphi$, gde je:

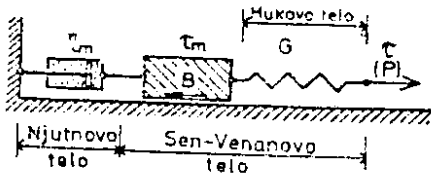
- τ – smičuće naprezanje,
- c – kohezija, η – koeficijent viskoznosti,
- dy/dt – brzina smicanja, σ – normalno naprezanje,
- φ – ugao unutrašnjeg trenja

pri čemu celokupan izraz, sa članom $\sigma \cdot \eta \cdot \varphi$ važi za mešavine svežeg betona kod kojih postoji značajno unutrašnje trenje (struktura III). Međutim, kako je primena ovakvih mešavina srazmerno mala, za praktične potrebe se kao dovoljno tačan može usvojiti sledeći izraz: $\tau = \tau_m + \eta_m \cdot \frac{dy}{dt}$, koji predstavlja, ustvari, izraz reološkog ponašanja Bingamov – og tela (modela).

- U Bingamovom izrazu τ_m se definiše kao smičuće naprezanje na granici tečenja (granično smičuće naprezanje – strukturna čvrstoća), dok η_m predstavlja koeficijent plastične viskoznosti (plastična – granična viskoznost).

- Bingamov reološki model svežeg betona zasnovan je na pretpostavci da se betonska smeša može tretirati kao jedinstveno fizičko telo i da pri delovanju opterećenja to telo na početku ima elastične deformacije, a da docnije, kada se dostigne nivo opterećenja koji odgovara strukturnoj čvrstoći, smeša počinje da teče kao svaka viskozna tečnost.

- S obzirom na to, reološki model može da se definiše kao na donjoj skici:



Slika 2.2 Reološki model svežeg betona - Bingamovo telo.

Pri postepenom povećanju naprezanja prvo radi samo elastični element, pa je pri $\tau < \tau_m$ elastična deformacija sistema jednaka τ/G .

Kada se premaši granično smičuće naprezanje (za $\tau > \tau_m$), betonska smeša počinje da teče kao svaka viskozna tečnost, pa je neelastična deformacija u vremenu t jednaka:

$$\frac{(\tau - \tau_m) \cdot t}{\eta_m}$$

Prema tome, reološka jednačina ponašanja posmatranog reološkog modela, tj. zavisnost između smičućeg naprezanja i deformacije smicanja ima oblik:

$$\gamma = \frac{\tau}{G} + \frac{\tau - \tau_m}{\eta_m} \cdot t$$

- Ukoliko pretpostavimo da je u datom slučaju napon τ konstantan i diferenciramo ovaj izraz po vremenu t , dobićemo da je:

$$\frac{d\gamma}{dt} = \frac{\tau - \tau_m}{\eta_m}, \text{ odnosno: } \tau = \tau_m + \eta_m \cdot \frac{d\gamma}{dt}$$

- Dobijen je, dakle, izraz identičan polaznom izrazu za naprezanje pri tečenju.

Grafički prikaz dobijene relacije dat je na skicama dole levo, odnosno dole desno (na skici dole desno je $\tau_f = \tau_m$). Tečenje do koga dolazi tek kada se dostigne granično smičuće naprezanje τ_m , u najvećem broju slučajeva ne odgova pravo, već isprekidanoj liniji sa slike dole levo. Tek pri većim vrednostima napona τ ova linija se približava pravoj liniji.

$$\frac{d\gamma}{dt} = \gamma \cdot \frac{1}{\eta_m} (\tau - \tau_m)$$

$$\frac{d\gamma}{dt} = \gamma \cdot \frac{1}{\eta_m} (\tau - \tau_m)$$

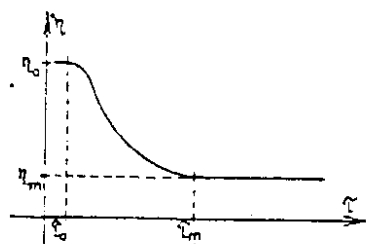
$$\tau = \tau_m + \eta_m \cdot \frac{d\gamma}{dt}$$

$$\tau = \tau_m + \eta_m \cdot \frac{d\gamma}{dt}$$

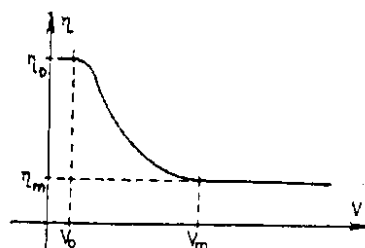
Bingamov izraz opisuje fizička svojstva betonske smeše tokom njenog ugrađivanja, tj. tokom primene određenih postupaka čiji je cilj da se ostvari zahtevana kompaktnost svežeg, ugrađenog betona (vibriranje, resovanje i sl.).

Viskozno ponašanje svežeg betona pri delovanju spoljašnjih sila može se definisati i dijagramima prikazanim na donje dve slike, koje daju zavisnost viskoznosti svežeg betona od smičućeg napona (levo). odnosno od brzine kretanja čestica – vibriranjem (desno).

■ Pri vrlo malim naponima smicanja $\tau < \tau_0$, odnosno malim brzinama oscilovanja čestica $V < V_0$, koef. viskoznosti η ima najveću vrednost - η_0 . Kada smičući napon τ , odnosno brzina V dostignu "kritične" vrednosti τ_m (odnosno V_m), koeficijent viskoznosti η dostiže najnižu vrednost η_m , koja se dalje ne menja. Dolazi do razaranja strukture svežeg betona, pa se on ponaša kao "teška" tečnost, sa konstantnom viskoznošću



Promena viskoznosti svežeg betona u funkciji smičućeg napona.



Promena viskoznosti svežeg betona u funkciji brzine kretanja čestica.

■ Iz dosadašnjih izlaganja može se zaključiti sledeće:
Kada se na svež beton deluje nekim mehaničkim uticajima (statičke sile ili dinamička dejstva – npr. vibracije) njegova viskoznost se smanjuje.

Drugim rečima, kada se na određeni način struktura sistema u potpunosti razori, tj. kada sistem izgubi svoju strukturnu čvrstoću, viskozitet se svodi na minimalnu vrednost i nastupa pojava tečenja; na ovaj način, a saglasno Bingamovoj relaciji, dolazi se do uprošćenog izraza:

$$\tau = \eta_m \cdot \frac{d\gamma}{dt}$$

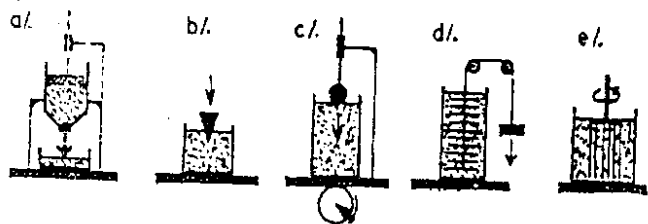
koji odgovara tečenju tzv. Njutnovskih tečnosti.

Po završetku delovanja spoljašnjih uticaja, međutim, sistem se vraća u predašnje stanje – uspostavlja se početna čvrstoća strukture i smanjuje pokretljivost (fluidnost) mase, što znači da viskoznost ponovo ima vrednost η_m

■ Spособnost svežeg betona, kao i svih strukturiranih sistema, da pod uticajem mehaničkih dejstava menja svoja reološka svojstva i da se po prekidu ovih dejstava ponovo vrati u predašnje stanje u pogledu strukturne čvrstoće i viskoznosti, naziva se tiksotropija.

■ Ovo svojstvo svežeg betona vrlo široko se koristi u njegovoj tehnologiji, posebno u tehnologiji ugrađivanja krutih (suvih) i slabo plastičnih mešavina, gde se primenjuju postupci vibriranja, presovanja, vibropresovanja i sl.

■ Betonske mešavine danas se najčešće ugrađuju postupkom vibriranja, jer se na taj način svež beton prevodi u stanje blisko teškoj tečnosti – iz mase se istiskuju globule vazduha, beton ispunjava sve prostore u oplati.



Slika 2.6 Tipovi viskozimetara za beton.

■ Za određivanje reoloških svojstava svežeg betona koriste se različiti aparati tipa viskozimetara. Ovi viskozimetri mogu da budu:

- Viskozimetri na principu merenja vremena isticanja svežeg betona kroz otvor određene veličine – sl. a) na sledećem slajdu (koristi se samo za tečnije mešavine).

- Viskozimetri na principu merenja dubine prodiranja u masu konusa ili nekog drugog tela – sl. b) na sledećem slajdu (uglavnom za tečnije betone).

- Uređaji (statički ili vibracioni) na principu merenja vremena ili brzine tonjenja u beton kugle određenog prečnika i mase – sl. c) na sledećem slajdu.

- Viskozimetri na principu merenja sile potrebne za izvlačenje iz mase betona skupa pločica, štapova ili cilindara – sl. d) na sledećem slajdu.

- Viskozimetri na principu merenja brzine rotacije koaksijalnih (koncentričnih) cilindara uronjenih u masu svežeg betona.

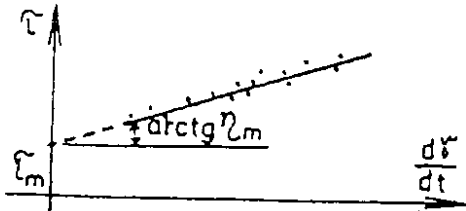
■ Kod svih navedenih uređaja postoji u principu mogućnost uspostavljanja zavisnosti između merene veličine i koeficijenta viskoznosti svežeg betona koji treba da se odredi. Na primer, kod uređaja sa kuglom koja tone u masu - sl. c) biće:

$$\eta = K (\gamma_k - \gamma_{b.sv}) \cdot t$$

(γ_k - $\gamma_{b.sv}$ - zapreminska masa materijala kugle, odnosno svežeg betona; t - vreme uronjavanja kugle do određene dubine; K - konstanta aparature, koja se određuje baždarenjem pomoću tečnosti poznatog koeficijenta viskoznosti)

■ Kod uređaja sa koaksijalnim cilindrima - sl. e), može se uspostaviti direktna zavisnost između ugaone brzine rotacije i veličina τ i $d\gamma/dt$.

■ Povlačenjem prave linije koja najbolje aproksimira skup tačaka parova vrednosti τ i $d\gamma/dt$ (rezultata ispitivanja) može se odrediti vrednost η_m , a ekstrapolacijom rezultata merenja i vrednost τ_m .



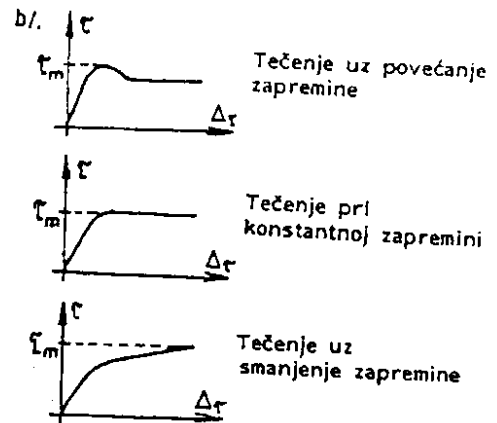
2.7 Zavisnost $\frac{d\gamma}{dt} - \tau$ dobijena direktnim merenjem.

■ Vrednost τ_m može se definisati i direktno-opitom prema Sl. a/, pošto se u datom slučaju može pretpostaviti jednakost kohezije i graničnog smičućeg naprezanja ($c \approx \tau_m$).

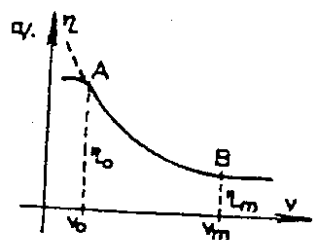
■ Pri realizaciji ovakvih opita u opštem slučaju dobijaju se zavisnosti $\Delta\tau - \tau$, saglasno Sl. b/, pri čemu se vrednost τ_m izračunava preko izraza $\tau_m = P_{max}/F\tau$

■ Strukturnu čvrstoću τ_m je moguće orijentaciono odrediti i na bazi standardnog ispitivanja konzistencije putem Abramsovog konusa:

$$\tau_m \approx \frac{\gamma_{h.w} \cdot V_u}{2F} \text{ ili } \tau_m \approx \frac{\gamma_{h.w} \cdot V_u + P}{2F}$$



- Kod rešavanja praktičnih problema, viskoznost svežeg betona može se definisati i funkcijom $\eta = \eta_m + a \cdot (1/v)$, gde je a - koeficijent tiksotropije.
- Ako se uvede promenljiva $1/v$, kriva viskoznosti u intervalu $v_0 - v_m$, sa Sl.2.9 a/ može se sa dovoljnom tačnošću predstaviti pravom linijom u sistemu $1/v - \eta$, sa Sl. 2.9 b/.
- Na taj način se, sa dovoljnom tačnošću, može odrediti viskozitet svežeg betona η za proizvoljnu vrednost brzine v .



Slika 2.9 Zavisnosti $v - \eta$

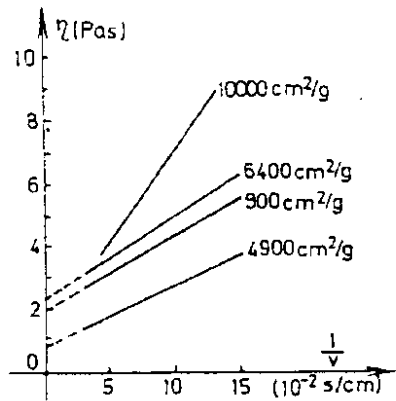
Reološka svojstva: Faktori uticaja

■ Značajan uticaj na reološka svojstva svežeg betona imaju:

- Mineraloški sastav cementa (jače izraženu tiksotropiju, na primer, imaju cementi sa povećanim sadržajem minerala C3 A i C4 AF),
 - Finoća mliva cementa (videti sliku dole - desno),
 - Krupnoća agregata (v. sledeći slajd),
 - Vodocementni faktor (v. sledeći slajd),
 - Primena plastifikatora (ili superplastifikatora) i njihov sadržaj (sl. slajd)
- Uticaj finoće mliva cementa

Kao što se sa skice desno može zapaziti, uticaj finoće mliva na viskoznost η i na koeficijent tiksotropije $1/\nu$ izuzetno je značajan.

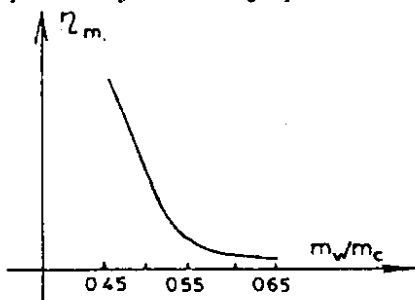
■ Sa povećanjem finoće mliva viskozitet i koef. tiksotropije prvo se smanjuju (pri 4500-5000 cm^2/g su najniži), a zatim se povećavaju.



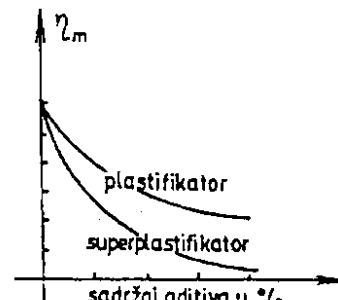
Koeficijent viskoznosti cementne paste u funkciji finoće mliva.

■ Sa povećanjem srednje veličine zrna agregata (desno), što je i razumljivo, viskozitet se značajno smanjuje
 ■ Potpuno je jasno, takođe, da se sa povećanjem m_v/m_c faktora, viskozitet mešavina značajno snižava, kao i da:

■ Sa povećanjem sadržaja plastifikatora (superplastifikatora) viskozitet opada



Uticaj vodocementnog faktora na graničnu viskoznost betona.



Uticaj plastifikatora i superplastifikatora na graničnu viskoznost betona.

■ Kad je reč o uticaju vodocementnog faktora m_v/m_c treba napomenuti da njegovo povećanje preko određene vrednosti može izazvati raslojavanje (segregaciju) betonske mešavine, što bitno ugrožava njenu homogenost.

■ Reološka svojstva svežeg betona uvek se moraju posmatrati u funkciji vremena, što je logična posledica odvijanja procesa hidratacije cementa, naime:

■ Tokom vremena povećava se kako viskozitet η_m , tako i granično smičuće naprezanje betonske mešavine τ_m . Promenljivost reoloških svojstava o kojoj je ovde reč zavisi od:

- Vrste cementa,
- Vodocementnog faktora,
- Sastava betona,
- Temperature mešavine,
- Primene aditiva i niza drugih faktora.

Tehnološka svojstva

■ Reološka svojstva svežeg betona značajno utiču na njegova Tehnološka svojstva, kao i na Svojstva očvrslag betona.

■ Da bi se dobio očvrslu beton zahtevanih karakteristika, neophodno je da sveži beton ima odgovarajuća svojstva, koja će pri primeni određenih Tehnoloških postupaka (spravljanje, transport, ugrađivanje i dr.) obezbediti da se dobije zahtevani kvalitet očvrslag materijala.

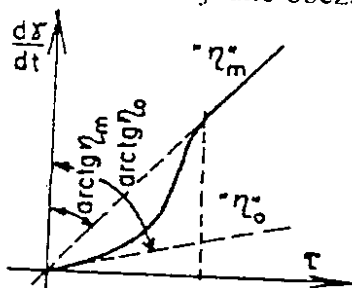
■ Drugim rečima, svež beton treba da ispunjava uslov Tehnologičnosti

što podrazumeva njegovu sposobnost da odgovori zahtevima koje nameću pojedine faze tehnološkog procesa proizvodnje betona i izrade konkretnog betonskog elementa (ili konkretne betonske konstrukcije).

■ Svojstvo tehnološkosti svežeg betona treba shvatiti kao skup većeg broja posebnih svojstava koje su od značaja u čitavom tehnološkom lancu – počev od doziranja, homogenizacije (mešanja), pa sve do završne obrade gornjih površina i nege ugrađenog betona.

■ Sve ove karakteristike se mogu posmatrati u funkciji reoloških parametara svežeg betona –

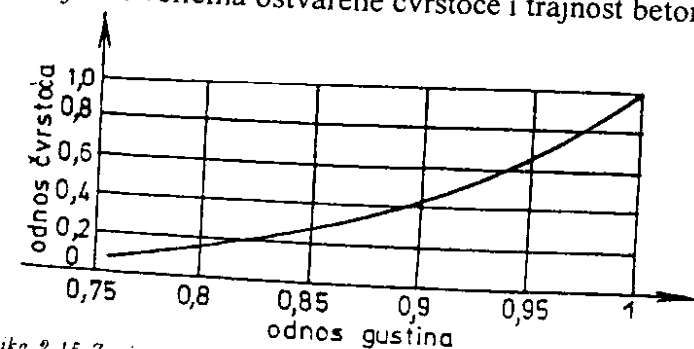
- U opštem slučaju, sva reološka svojstva svežeg betona funkcija su mehaničkih uticaja koji deluju na mešavinu, što se može ilustrovati i funkcijom $\tau - dy/dt$, prikazanom na donjoj slici, koja pokazuje promenljivost veličine η (od η_0 do η_m) u funkciji smičućeg napona τ .
- S obzirom na ovo, kao najadekvatnija definicija ugradljivosti (kompak-tibilnosti) može da se usvoji ona po kojoj ovo svojstvo opredeljuje količina mehaničkog rada potrebnog za prevodenje svežeg betona u stanje fluida sa strukturnom čvrstoćom $\tau_m=0$ i sa viskoznošću η_m .
- Kada se ostvari "fluidizacija" svežeg betona i kada on poprimi svojstva "teške tečnosti", u punoj meri se obezbeđuje mogućnost ispunjavanja svih prostora unutar oplata (kalupa), mogućnost da svež beton zade u sve prostore "pregrađene" prisutnom armaturom i stiskivanje mehurića vazduha uvučenih u masu tokom mešanja komponenti.
- Sve ovo zajedno obezbeđuje optimalno moguću zbijenost (kompaktnost) ugrađenog betona.



Slika 2.14 Promenljivost brzine smicanja.

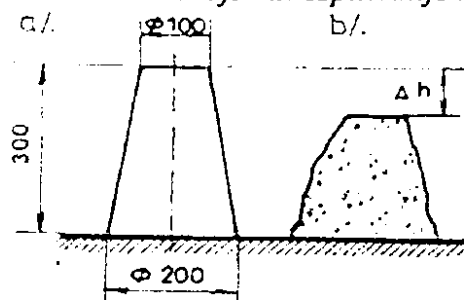
- U praksi se tehnološkičnost svežeg betona najčešće razmatra kao funkcija konzistencije svežeg betona.
- Pod pojmom konzistencije se podrazumeva skup svojstava svežeg betona koja utiču na postojanost, odnosno promenljivost njegovog oblika pod uticajem različitih mehaničkih dejstava.
- Ova definicija se praktično svodi na formulaciju po kojoj se pod konzistencijom podrazumeva skup svih svojstava koja se iskazuju pojmovima pokazatelja pokretljivosti i krutosti betonske mešavine.
- U vezi sa ovako shvaćenim pojmom konzistencije u praksi se najčešće govori o krutoj, slabo plastičnoj, plastičnoj i tečnoj betonskoj mešavini, odnosno o krutoj, slabo plastičnoj, plastičnoj i tečnoj konzistenciji svežeg betona.
- Konzistencijom, međutim, nije moguće obuhvatiti sve parametre koji opredeljuju svojstvo tehnološkičnosti, usled čega se, osim konzistencije, primenjuju i postupci opisivanja pojedinih tehnoloških svojstava svežeg betona, kao što je to navedeno na sledećem slajdu.
- Homogenost,
- Ugradljivost (kompaktibilnost),
- Poveznost (kohezivnost),
- Stabilnost (suprotstavljenost segregaciji i izdvajanju vode),
- Transportabilnost,
- Pumpabilnost,
- Završna obradljivost gornjih površina i dr.
- Tehnološko svojstvo ugradljivosti svežeg betona posebno je značajno sa stanovišta kvaliteta očvrslog betona.

- Od ovog svojstva bitno zavisi mogućnost zbijanja – kompaktiranja svežeg betona, a od stepena ostvarene zbijenosti i stepen kompaktnosti, odnosno ostvarena veličina zapreminske mase očvrslog betona, a sa njom i veličina ostvarene čvrstoće i trajnost betona

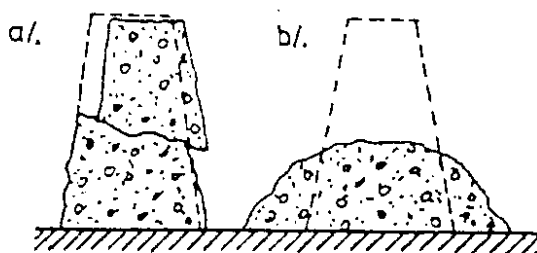


Slika 2.15 Zavisnost čvrstoće betona od ostvarene zbijenosti svežeg betona.

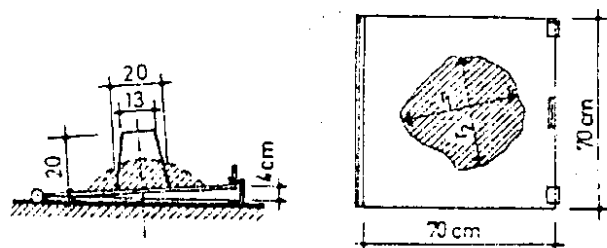
Tehnološka svojstva: Ispitivanje konzistencije



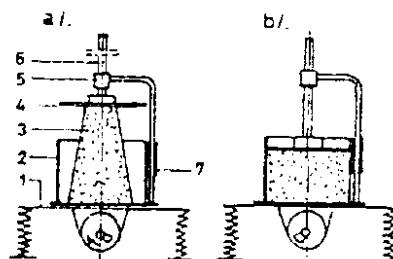
Sl. 6.12. Metoda sleganja



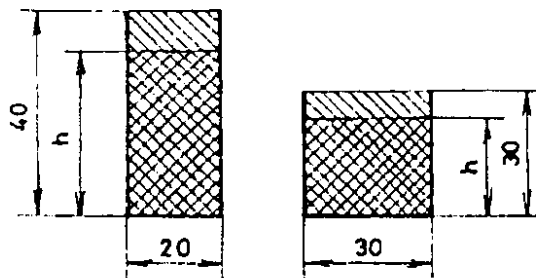
2.17 Smicanje i rušenje konusa kod tzv. "mršavih" betona.



Slika 2.19 Metoda rasprostiranja



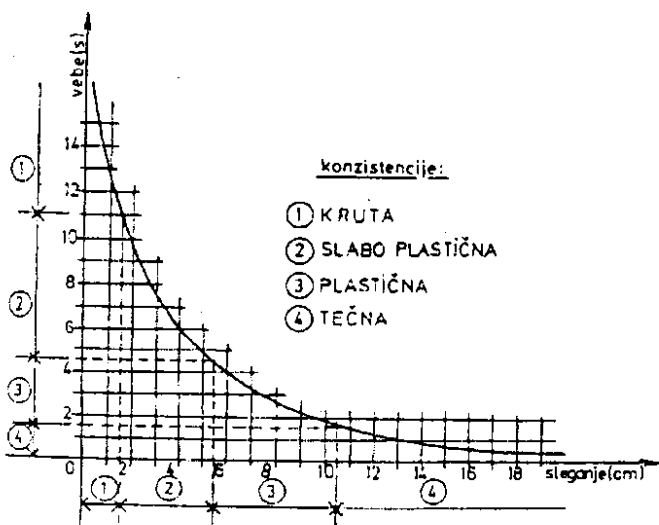
Sl. 6.13. VEDE-metoda



Sl. 6.15. Metoda sleganja vibriranjem

Tablica 6.2. Opisi i mere konzistencije

Opis (granice) konzistencije	Mere konzistencije			
	VEBE (s)	Sleganje (cm)	Rasprostiranje (cm)	Mera zbijanja
Kruta	≥ 11	0	-	$\geq 1,25$
Slabo plastična	5-10	2-5	40	1,11-1,24
Plastična	2-4	6-10	40 - 50	1,04-1,10
Tekuća	≤ 1	11 - 18	50 - 65	$\leq 1,03$



Slika 2.21 Zavisnost pokazatelja konzistencije po metodi sleganja i po VEDE - metodi.

Faktori uticaja na tehnoložnost svežeg betona

Tehnoložnost svežeg betona, pre svega ugradljivost i obradljivost, zavisi od niza uticajnih faktora, ali odlučujuću ulogu ima količina vode.

■ Za odabranu vrstu i granulometrijski sastav agregata, a pri određenoj temperaturi mešavine, nezavisno od primenjene količine cementa (u uobičajenim granicama 200 – 400 kg/m³), konzistencija betonske mešavine zavisice samo od primenjene količina vode. Ovaj stav je poznat kao pravilo konstantnog sadržaja vode.

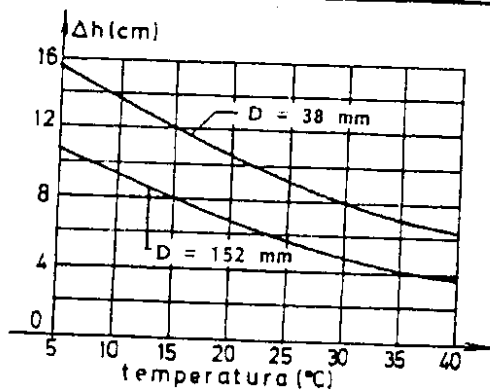
■ Napred navedeni stav drugim rečima znači da za utvrđenu konzistenciju svežeg betona i odabrani agregat količina vode će biti jednaka za sve primenjene količine cementa (200 – 400 kg/m³), tj. za sve vodocementne faktore, odnosno za sve "marke betona".

■ Na sledećem slajdu, ovaj stav je ilustrovan putem tablice potrebnih količina vode za različite mere sleganja Δh , za rečni, odnosno drobljeni agregat, sa tri različite veličine najkрупnijeg zrna D.

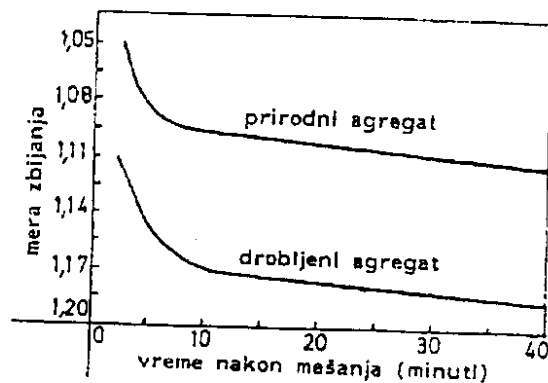
■ Na nekoliko slajdova koji potom slede dat je uticaj veličine D, temperature mešavine T i vremena t proteklog od početka mešanja betona.

Tablica 6.3 Zavisnost mere sleganja svežeg betona od količine vode i krajnje agregata

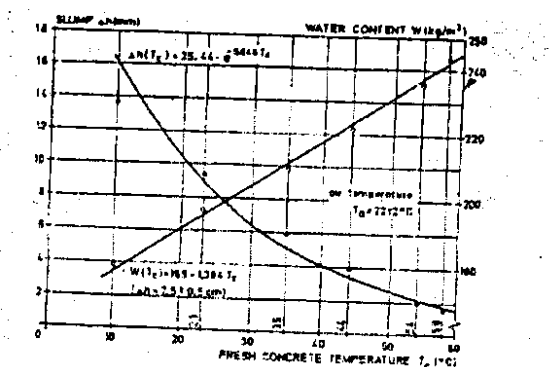
Mera sleganja po Abramsu Δh (cm)	Količina vode (kg/m ³) za slučaj agregata sa zrnima D (mm)					
	Služak			drobljen kamen		
	10	20	40	10	20	40
0	145	130	120	155	145	130
1	150	135	125	160	150	135
2	160	145	130	170	160	145
3	165	150	135	175	165	150
4	175	160	145	185	175	160
5	185	170	155	195	185	170
6	190	175	160	200	190	175
7	195	180	165	205	195	180
8	200	185	170	210	200	185
9	205	190	175	215	205	190
10	210	195	180	220	210	195
11	215	200	185	225	215	200



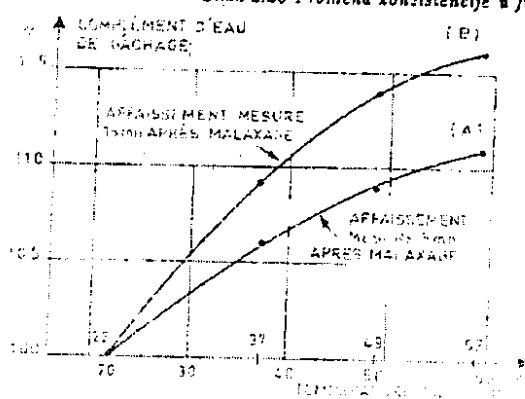
Slika 2.22 Zavisnost konzistencije svežeg betona od temperature i od nominalno najkрупnijeg zrna agregata u mešavini.

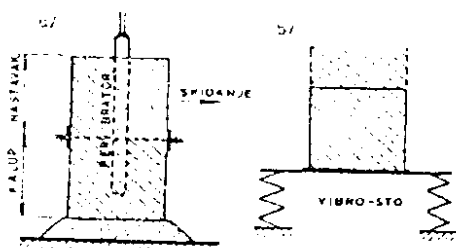


Slika 2.23 Promena konzistencije u funkciji vremena.

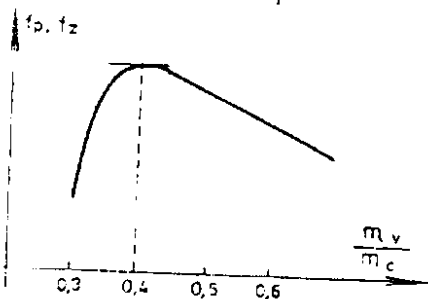


Slika 2.24 The effect of fresh concrete temperature on slump and water content.

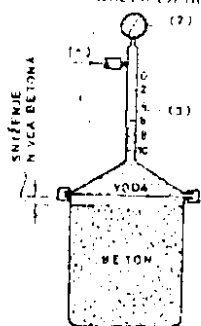




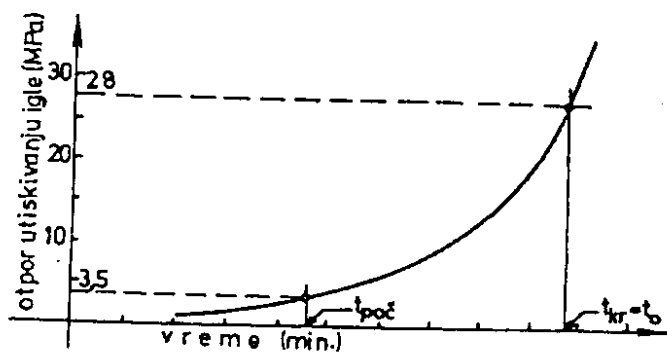
Sl. 6.17. Ugradivanje betona u kalupe



Sl. 6.18. Zavisnost čvrstoća 'mislidih' betona od vodno-cementnog faktora



Sl. 6.19. Merenje količine uvađenog vazduha u svežem betonu



Slika 2.29 Određivanje početka i kraja vezivanja betona.

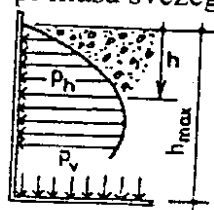
Ostala svojstva: Pritisak na oplatu

■ Vertikalni pritisak p_v i horizontalni pritisak p_h na oplatu, saglasno priloženoj skici, može se definisati izrazima:

$$p_v = 10 \cdot \gamma_b \cdot s_v \cdot h_{\max} \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$p_h = p_h(\gamma_b, s_v, \varphi, h, v) \quad (\text{kN/m}^2)$$

(γ_b, s_v – zapr masa svežeg betona; φ – ugao unutr. trenja svežeg betona; v – brzina betoniranja)



Slika 2.30 Opšti prikaz pritiska svežeg betona na oplatu.

A – Gornja površina betona

B – Dubina do koje se propagira uticaj vibratora

C – Gornja površ. vezanog betona (sa poč. čvrst.)

$$p_b = 10 \cdot \gamma_{b,sv} \cdot h_1 \quad (\text{kN/m}^2)$$

$$p_c = p_b + \Delta p_b = 10 \cdot \gamma_{b,sv} \cdot [h_1 - (h - h_1) \cdot d_p] \quad (\text{kN/m}^2)$$

Koeficijenti d_p u funkciji uglova φ i β

$\beta \text{ (godi) } [^\circ]$	$\varphi = 20^\circ$	$\varphi = 30^\circ$	$\varphi = 36^\circ$
25°	0,42	0,30	0,13
18°	0,43	0,30	0,13
16°	0,44	0,30	0,13

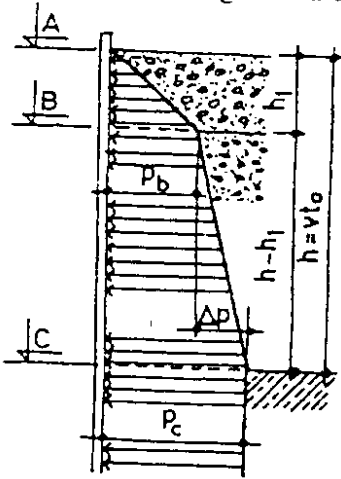
$\varphi=200$ – za beton liveni koji se više ne može zbijati

$\varphi=300$ – za plastičan beton

$\varphi=500$ – za beton koji se revibrira

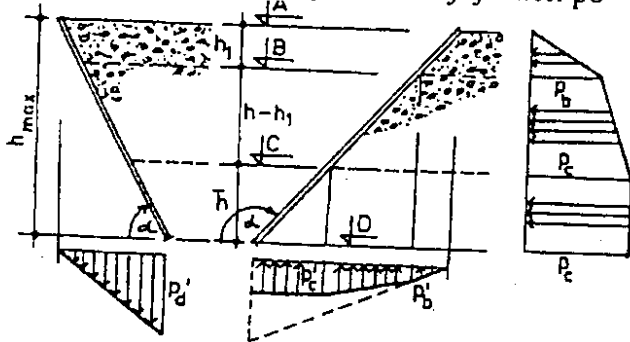
$\beta=250$ – za grubo rendisanu dasku

$\beta=16-180$ – za uglačanu dasku ili oplatu premazanu slojem sintetičke smole (za rendis. dasku: $\varphi=200$)



■ Kao što se sa priložene skice vidi, horizontalni pritisci svežeg betona na oplatu sa nagnutim stranama ($\alpha \neq 90^\circ$) dati su istim izrazima kao za pritiske na vertikalnu oplatu (preth. slajd)

■ Vertikalni pritisci, saglasno donjoj skici: $p_b' = p_b$; $p_c' = p_c$; $p_d' = 10 \cdot \gamma_{b,sv} \cdot h_{max}$



Slika 2.32 Pritisci svežeg betona kod oplata sa nagnutim stranama ($\alpha \neq 90^\circ$).

Ostala svojstva: Temperatura svežeg betona

Temperatura svežeg betona menja se tokom vremena i zavisi od većeg broja uticajnih parametara:

- Početne temperature mešavine (na izlasku iz mešalice),
- Temperature sredine,
- Toplote hidratacije cementa,
- Razmene toplote sa okolinom i dr.

Početna temperatura:

$$T_{b0} = \frac{S_a T_a m_a + S_c T_c m_c + S_v T_v m_v}{S_a m_a + S_c m_c + S_v m_v} \quad (^\circ\text{C})$$

Ovde su S_a , S_c i S_v – Specifični toplotni kapaciteti agregata, cementa i vode,

T_a , T_c i T_v – Početne temperature agregata, cementa i vode,

m_a , m_c i m_v – mase agregata, cementa i vode, respektivno (kg/m^3)

Kako je: $S_a \approx S_c \approx 0,84 \text{ J/g}^\circ\text{C}$, a $S_v = 4,2 \text{ J/g}^\circ\text{C}$, izraz (1) postaje:

$$T_{b0} = \frac{0,2 (T_a m_a + T_c m_c) + T_v m_v}{0,2 (m_a + m_c) + m_v} \quad (^\circ\text{C}) \quad (2)$$