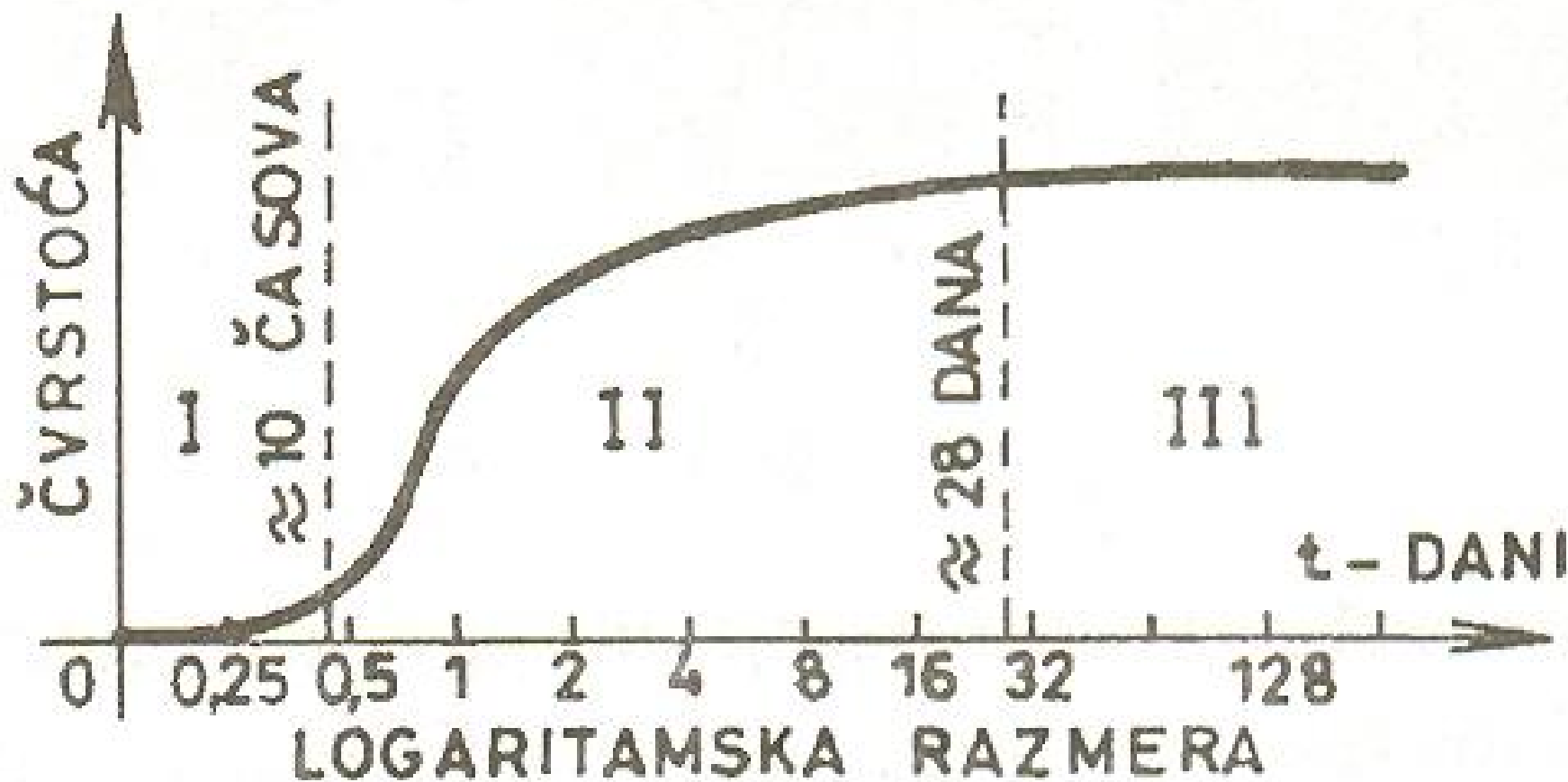


# STRUKTURA OČVRSLOG BETONA

## *Formiranje strukture*



*Sl. 6.21. Etape formiranja strukture betona*

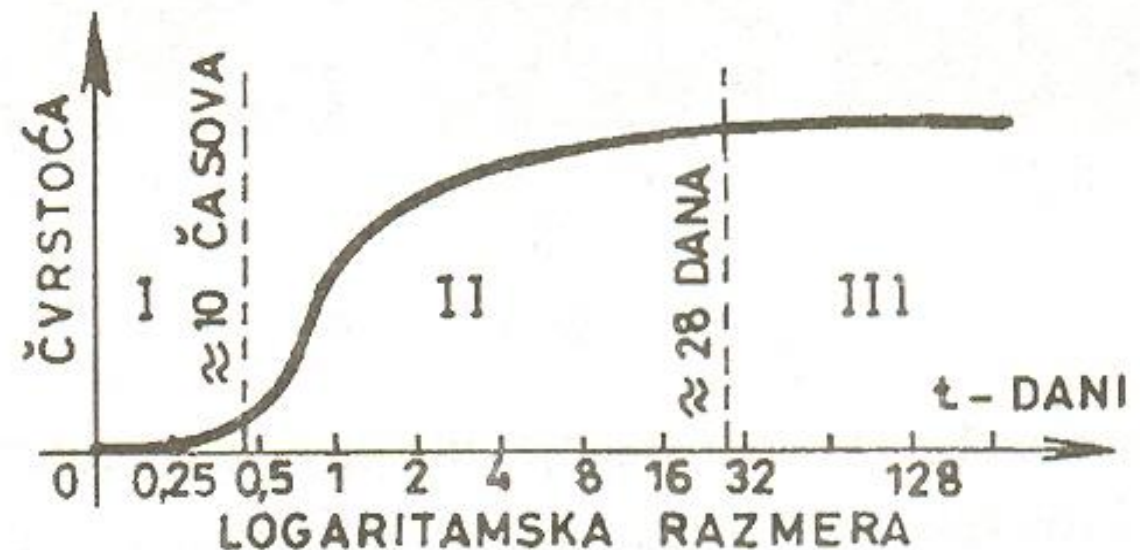
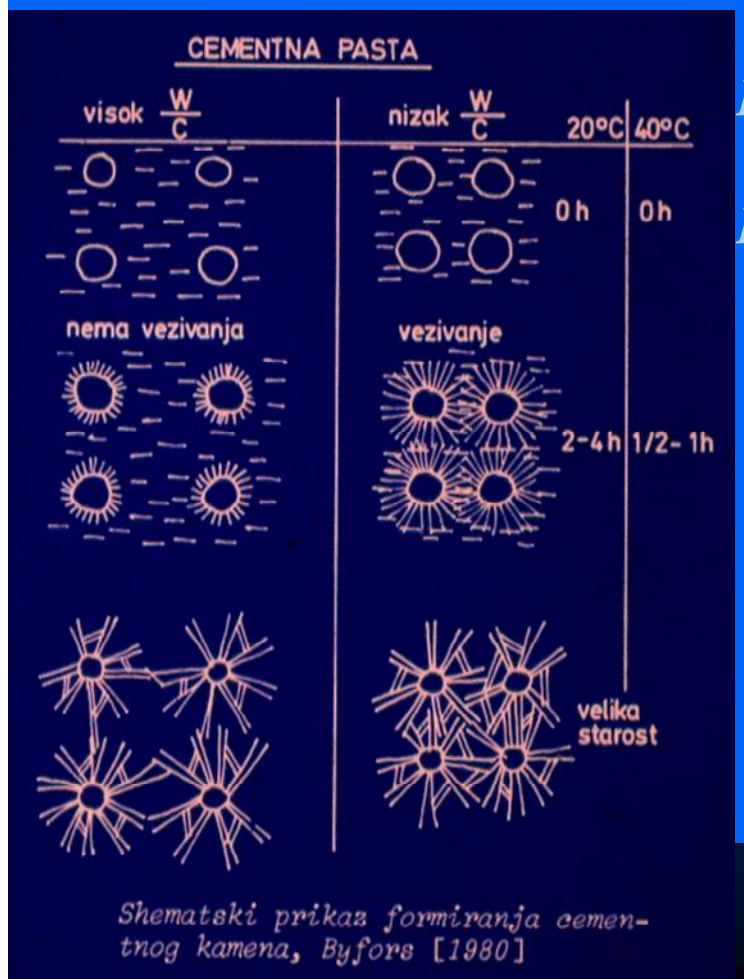
# МИНЕРАЛНА (НЕОРГАНИСКА) ВЕЗИВА

## Formiranje strukture

I – Početna etapa – etapa formiranja početne strukture, kada usled vezivanja cementa masa svežeg betona počinje da prelazi u čvrsto agregatno stanje

II – Etapa postepenog formiranja strukture očvrslog betona, koju prati povećanje čvrstoće betona

III – Etapa stabilizacije strukture, kada se dostignuta čvrstoća betona tokom vremena bitnije ne menja



Sl. 6.21. Etape formiranja strukture betona

# STRUKTURA OČVRSLOG BETONA

## *Makrostruktura*

- *Na nivou makrostrukture, u betonu se jasno izdvajaju dva osnovna strukturna elemenra:*

- *Agregat,*
- *Cementni kamen*

*S obzirom na to, može se reći da je struktura betona nehomogena, a po svom tipu – konglomeratična.*

- *U masi očvrslog betona moguće je sasvim precizno izdvojiti i kvantifikovati pojedine makrostrukturne elemente. U vezi s tim treba poći od poznate jednačine zapremine:*

$$v_{a,a} + v_{a,cp} + v_p = 1$$

*u kojoj je:*

*$v_{a,a}$  - apsolutna zapremina (zapremina zrna<sup>1)</sup>) agregata,*

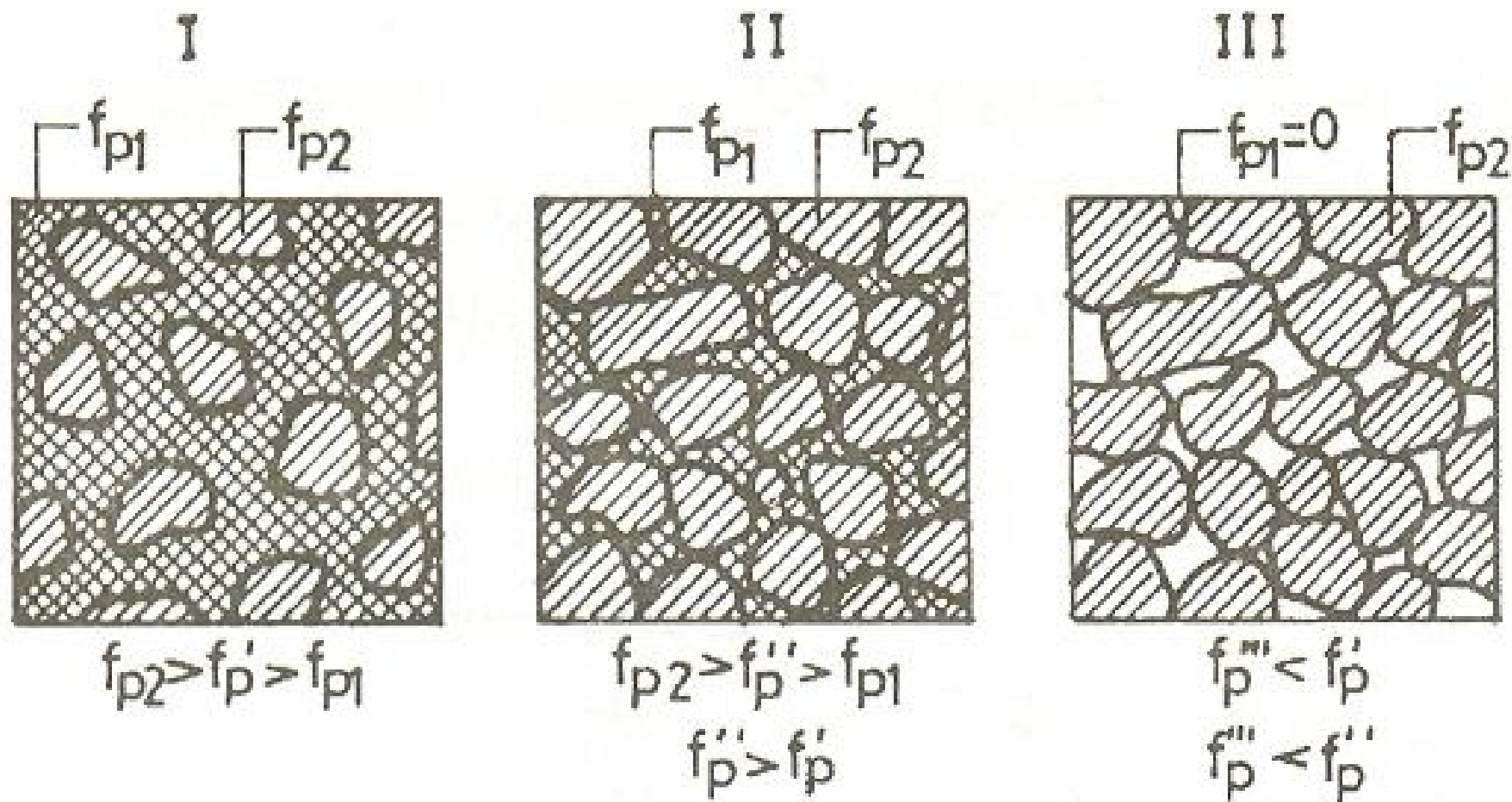
*$v_{a,cp}$  - apsolutna zapremina (zapremina zrnaca) cementa i*

*$v_p$  – zapremina zaostalih (ili namerno “uvučenih”) pora vazduha.*

*<sup>1)</sup> Prećutno se pretpostavlja da su zrna agregata 100% kompaktna ( $v_{za}=v_{a,a}$ )*

# STRUKTURA OČVRSLOG BETONA

## *Makrostruktura*



*Sl. 6.22. Tipovi makrostrukture betona*

# STRUKTURA OČVRSLOG BETONA

## *Mikrostruktura*

*Gelska, kapilarna i ukupna poroznost betona*

$$p_b = \frac{v_{pb}}{v_b} 100 = \frac{v_{p,cp}}{v_{cp}} 100 \quad (1), \quad p_{cp} = \frac{v_{p,cp}}{v_{cp}} 100 \quad (2)$$

$$(2) \Rightarrow v_{p,cp} = \frac{p_{cp} v_{cp}}{100} \quad (2'), \quad (2') \rightarrow (1) \Rightarrow p_b = p_{cp} v_{cp} \quad (3)$$

$$v_{cp} = \frac{m_c}{3100} + \frac{\omega \cdot m_c}{1000} = \left( \frac{1}{3,1} + \omega \right) m_c \cdot 10^{-3} = (0,32 + \omega) m_c \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

$$p_{g,cp} = \frac{0,22\alpha_h}{0,32 + \omega} 100 \quad p_{k,cp} = \frac{\omega - 0,40\alpha_h}{0,32 + \omega} 100 \quad (5)$$

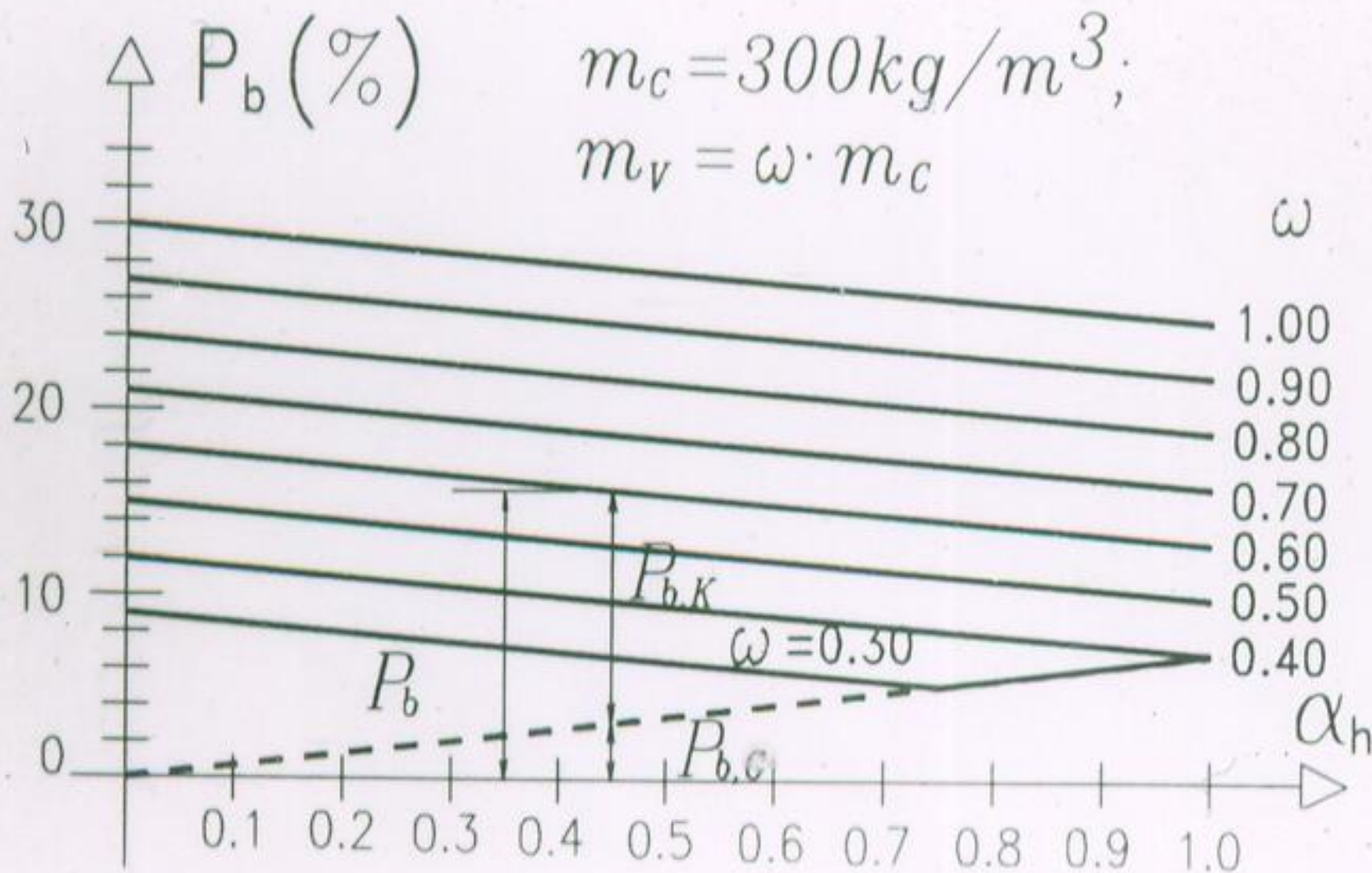
$$(4), (5) \rightarrow (3) \Rightarrow p_{g,b} = 0,022\alpha_h m_c; \quad p_{k,b} = 0,01m_c(\omega - 0,40\alpha_h)$$

$$p_{uk,b} = p_{g,b} + p_{k,b} + \Delta p_b \quad [\Delta p_b = (1 - m_c/\gamma_{sc} - m_a/\gamma_{sa} - m_v/\gamma_{sv}) \cdot 100]$$



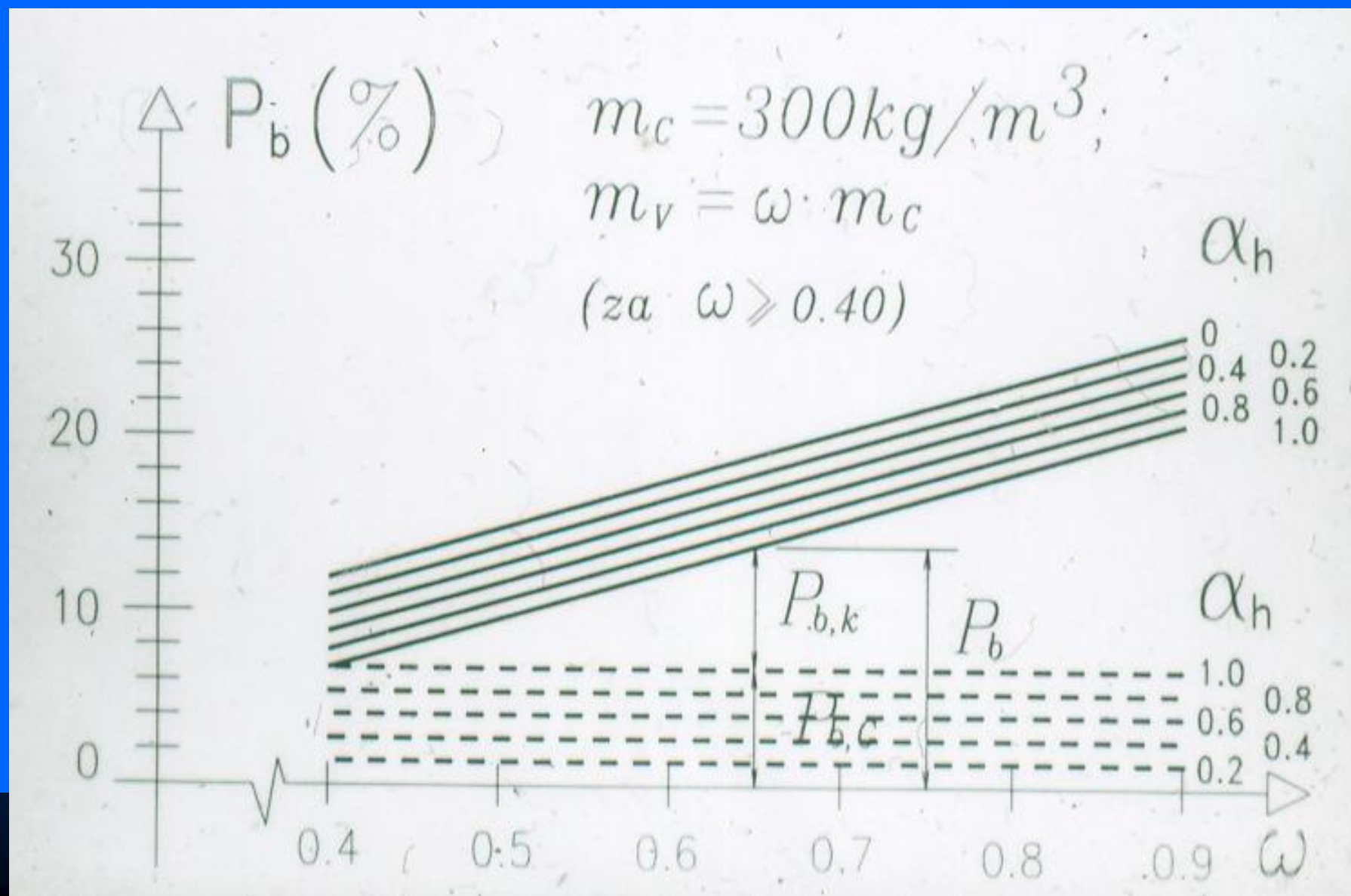
# STRUKTURA OČVRSLOG BETONA

## *Mikrostruktura – Gelska i kapilarna poroznost*



# STRUKTURA OČVRSLOG BETONA

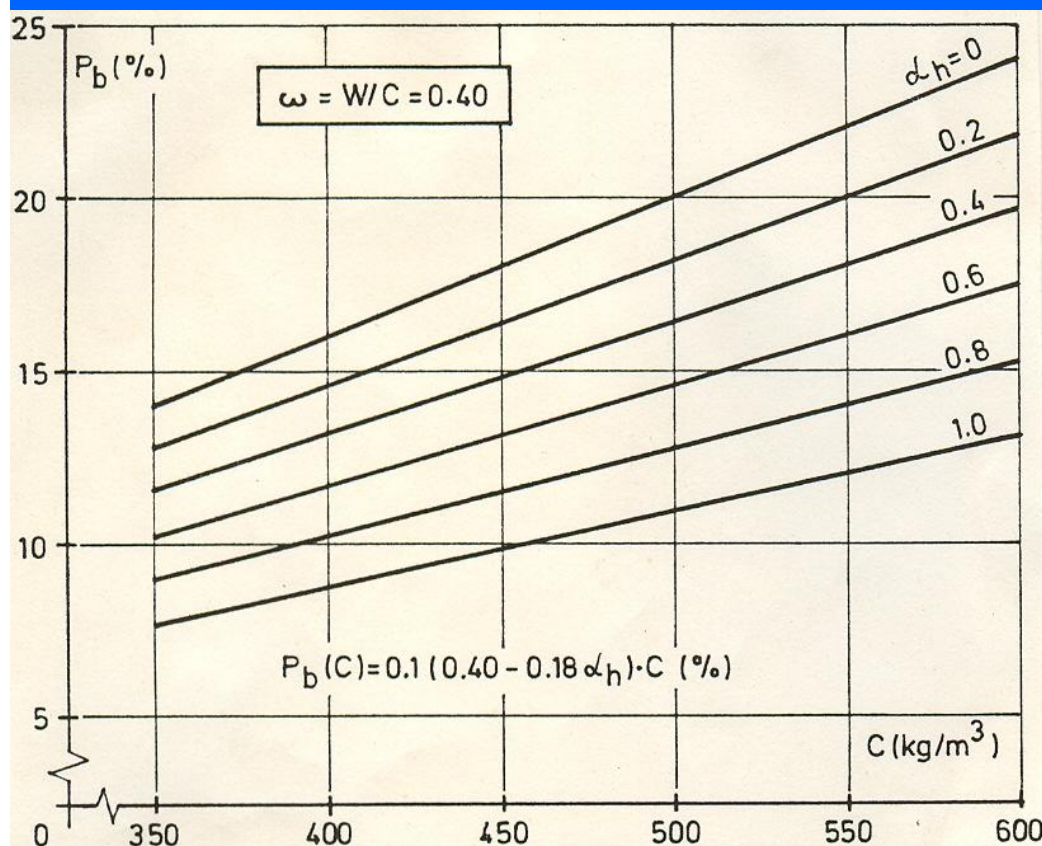
## *Mikrostruktura – Gelska i kapilarna poroznost*



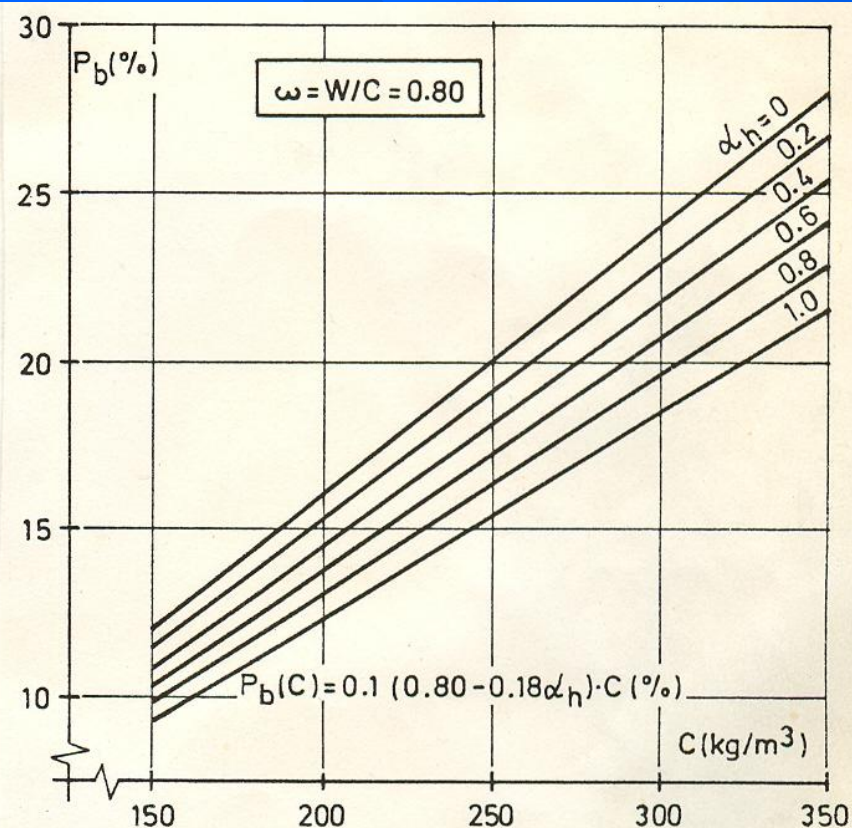


# STRUKTURA OČVRSLOG BETONA

## *Mikrostruktura – Gelska i kapilarna poroznost*



Sl.2a Ukupna poroznost betona kao funkcija količine cementa pri  $W/C = 0.40$



Sl.2b Ukupna poroznost betona kao funkcija količine cementa, pri  $W/C = 0,80$



# STRUKTURA OČVRSLOG BETONA

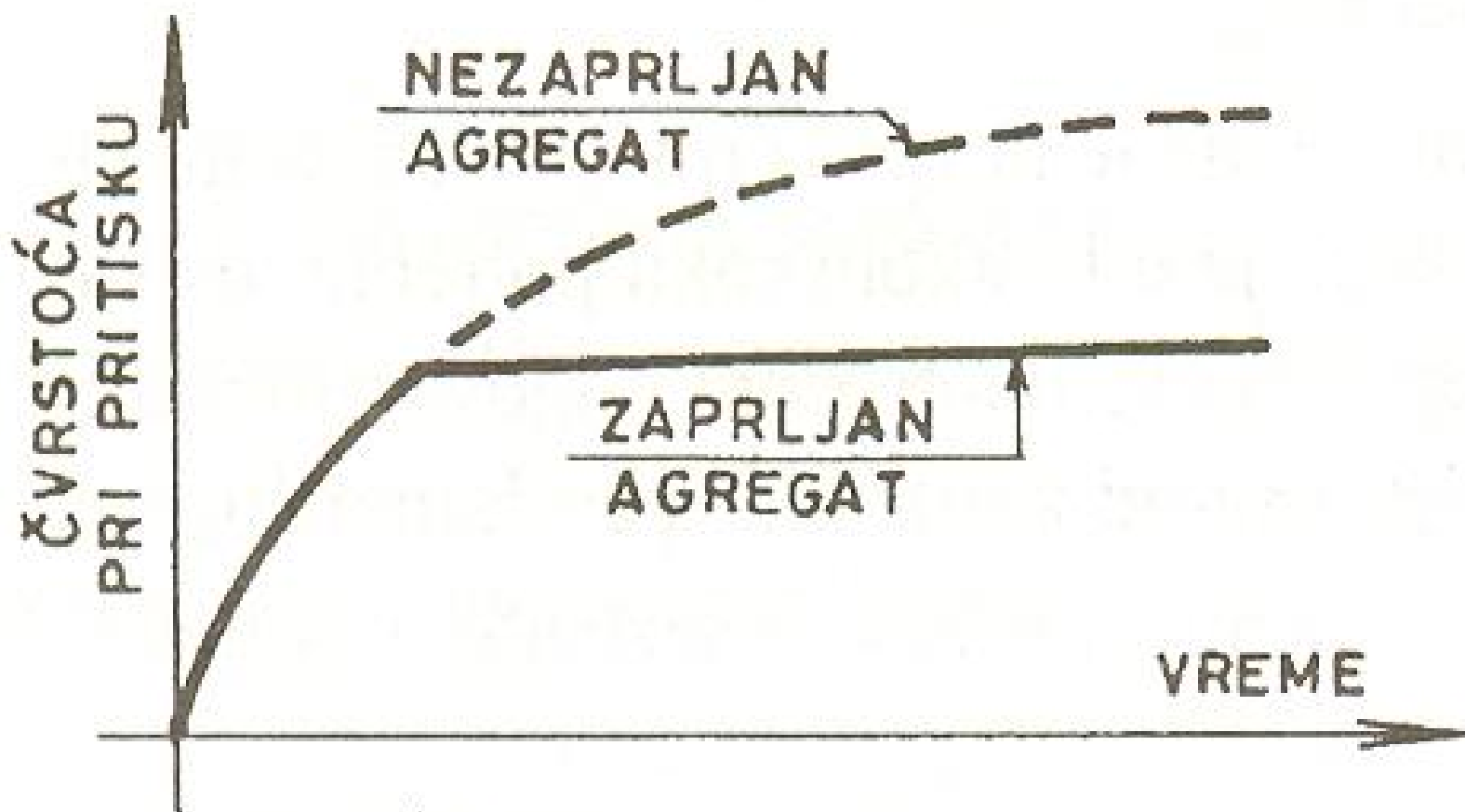
## *Mikrostruktura*

### *Kontaktни sloj zrno agregata – cementni kamen*

- *Širina kontaktnog sloja: cca 0,06 mm (2-3 prečnika zrna)*
- *Povezivanje zrna agregata sa cementnim kamenom tesno je povezano sa migracijom kalcijumhidroksida  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , kao jednog od produkata hidratacije portland cementa*
- *Kalcijumhidroksid se u vrlo velikom obimu deponuje na površinama zrna – delom kristališe, a delom prelazi u  $\text{CaCO}_3$*
- *Ovi produkti uslovljavaju pojavu Vadervalsovih sila – osnovnog faktora athezije između cem. kamena i zrna agregata*
- *Ovaj kontaktni sloj ima nešto veću poroznost od ostale mase cementnog kamena, što uslovljava veću vodopropustljivost u odnosu na cementni kamen i agregat, zbog čega se često naziva “tranzitnom zonom”!*

# STRUKTURA OČVRSLOG BETONA

## *Mikrostruktura – Kontaktna zona*



*Sl. 6.24. Uticaj zaprljanosti zrna agregata na čvrstoću pri pritisku*

# STRUKTURA OČVRSLOG BETONA

## *Formiranje strukture*

### *Razvoj hidratacione toplote u masi betona*

- *Tokom procesa hidratacije dolazi do promene temperature betona u okviru betonskih elemenata, u odnosu na temperaturu betona pri ugrađivanju*
- *Ova promena temperature bitno zavisi od dimenzija konstrukcijskih elemenata*
- *Ako je  $Q_{cn}$  (J/kg) toplota hidratacije cementa pri starosti betona od  $n$  dana,  $S_c=0,84$  J/g,  $S_v=4,2$  J/g (spec. topl. kapaciteti cementa i vode), porast temperature u masi betona posle  $n$  dana biće:*

$$\Delta T_b = \frac{m_c Q_{nc}}{(m_a + m_c) S_c + m_v S_v}$$

## Slide 11

---

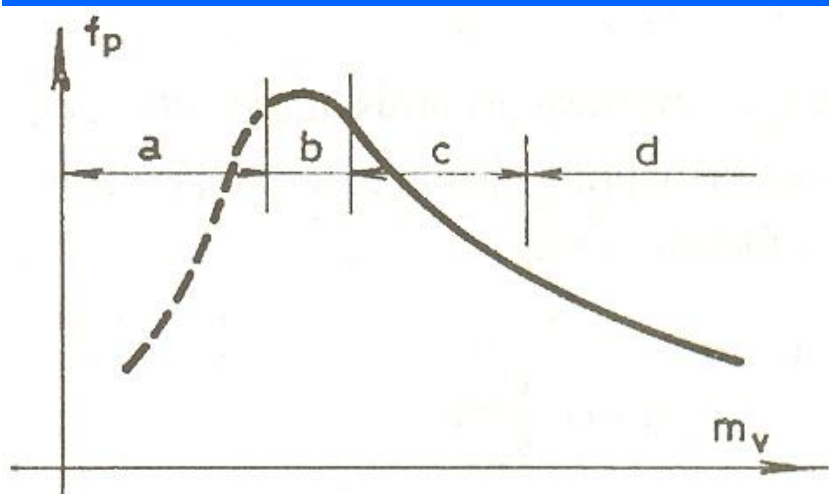
**D1**

Dusan, 3/22/2007

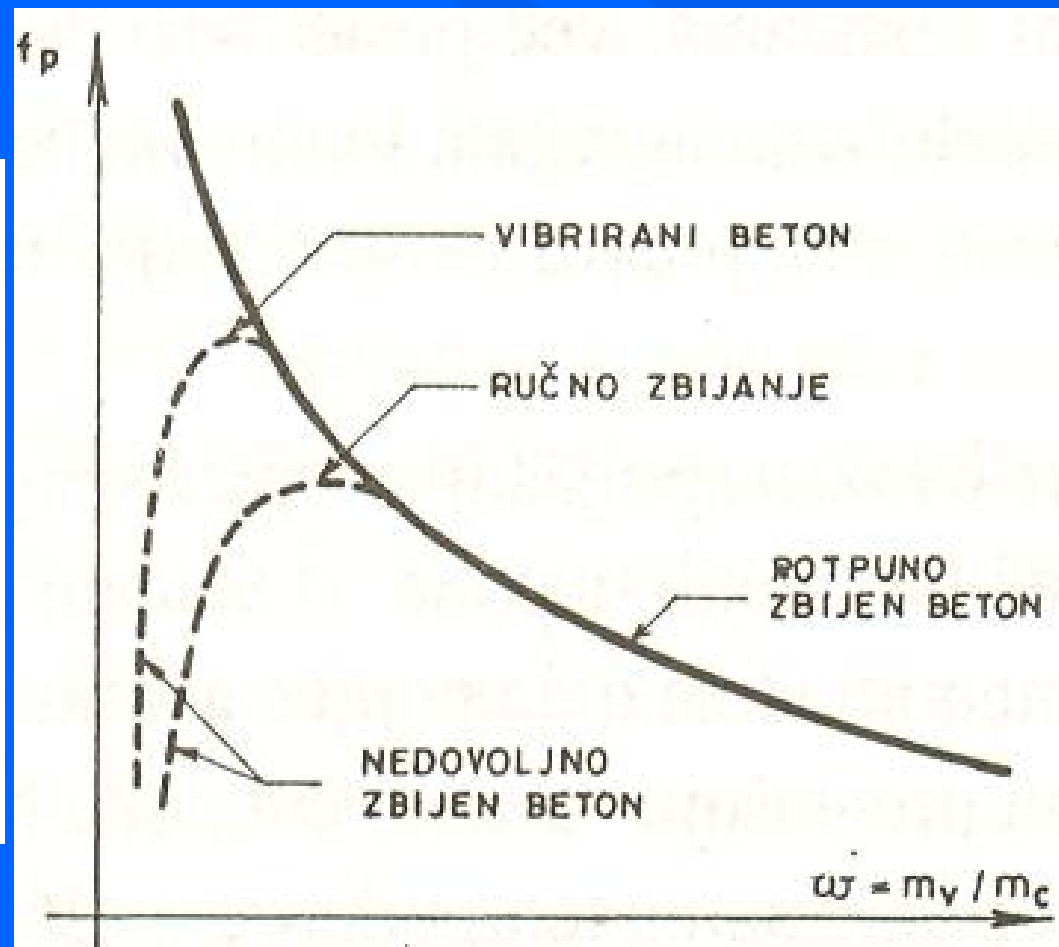


# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## *Osnovni zakoni čvrstoće betona*



Sl. 6.25. Čvrstoća betona u funkciji količine vode



Sl. 6.26. Zavisnost  $m_v / m_c - f_p$

# PROJEKAT BETONSKE MESA VINE

## Određivanje potrebnog vodocementnog faktora

– formula Beljajeva:

$$f_{k,28} = \frac{f_{pc}}{k \cdot (\omega)^{1,5}},$$

– formula Ferea:

$$f_{k28} = \frac{k}{\left(1 + \omega \cdot \frac{\gamma_{sc}}{\gamma_{sv}}\right)^2},$$

U formuli Beljajeva:



- $f_{pc}$  – klasa primenjenog cementa
- $k$  – parametar zavisian od vrste agregata, kako sledi:

- Rečni:  $k=4,0$
- Drobljeni:  $k=3,5$

U formuli Ferea za vrednost parametra  $k$  treba uzeti:

- $k = 250$ , za cement PC 32,5
- $k = 320$ , za cement PC 42,5
- $k = 390$ , za cement PC 52,5

# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## Osnovni zakoni čvrstoće betona

### ■ Formula Bolomej - a:

$f_{pc}$  – klasa cementa,

$A = 0,55 - 0,65$  (u zavisnosti od MB i granulom. sastava agregata).

$$f_{k,28} = A \cdot f_{pc} \frac{1 - 0,5\omega}{\omega} = A \cdot f_{pc} \left( \frac{1}{\omega} - 0,5 \right)$$

### ■ Formula Skramtajev-a:

Za  $\frac{1}{\omega} \leq 2,5$ , tj.:  $\omega \geq 0,40$  :

$$f_{k,28} = A_1 \cdot f_{pc} \left( \frac{1}{\omega} - 0,5 \right)$$

Za  $\frac{1}{\omega} \geq 2,5$ , tj.:  $\omega \leq 0,40$  :

$$f_{k,28} = A_2 \cdot f_{pc} \left( \frac{1}{\omega} + 0,5 \right)$$

Tabela koeficijenata u formuli Skramtajev-a

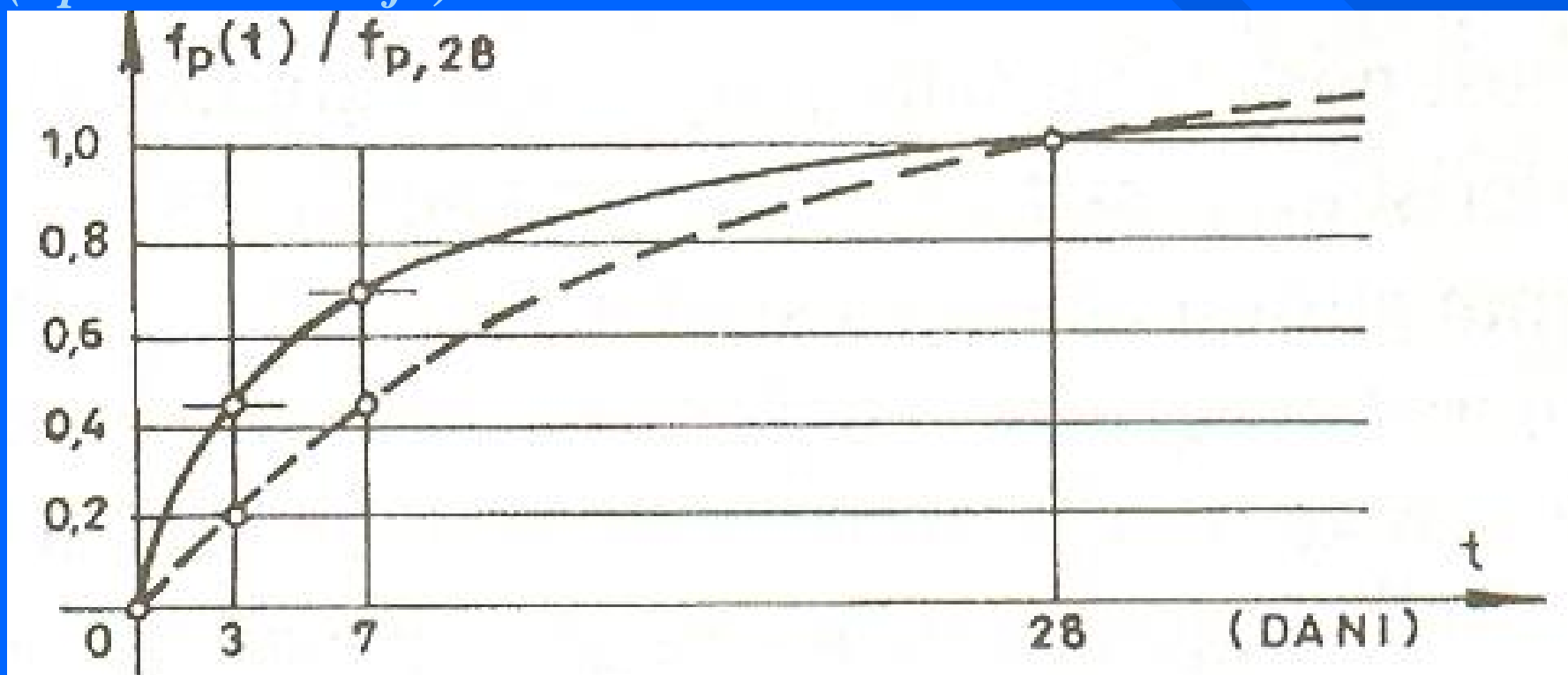
Kvalitet cementa i agregata	$A_1$	$A_2$
Visok	0,65	0,43
Normalan	0,60	0,40
Nizak	0,55	0,37

- Nije teško uočiti da je formula Skramtajev-a za slučaj  $\omega \geq 0,40$  isto što i formula Bolomej-a; drugim rečima, Skramtajev je proširio formulu Bolomej-a i za slučaj kada je  $\omega \leq 0,40$ .

# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## Čvrstoća betona u funkciji vremena

- Za beton sa čistim portland cementom – CEM I (puna linija),
- Za beton sa kompozitnim portland kompozitnim cementom – CEM II (isprekidana linija)

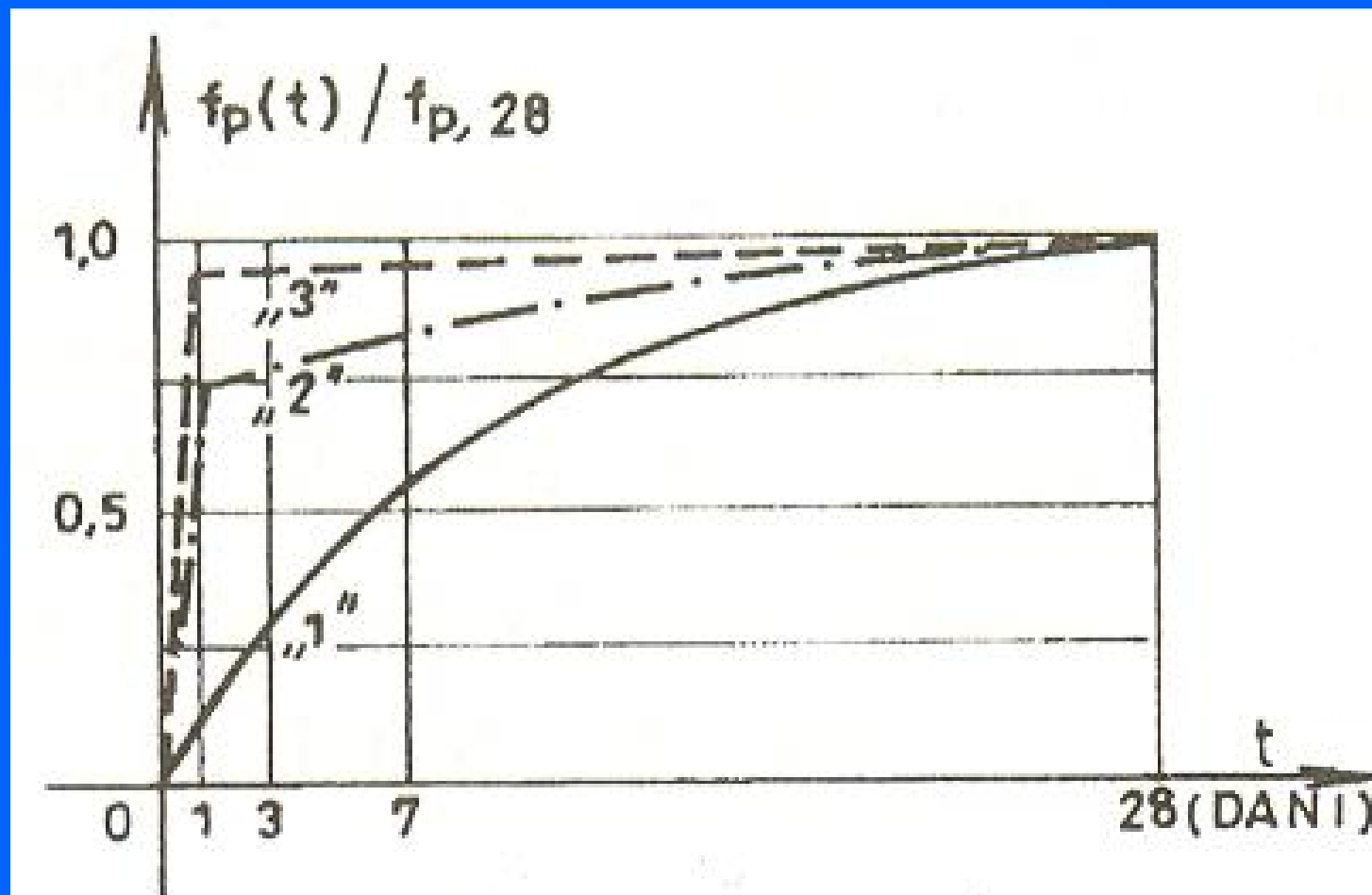


Sl. 6.27. Promena čvrstoće betona u funkciji vremena



# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

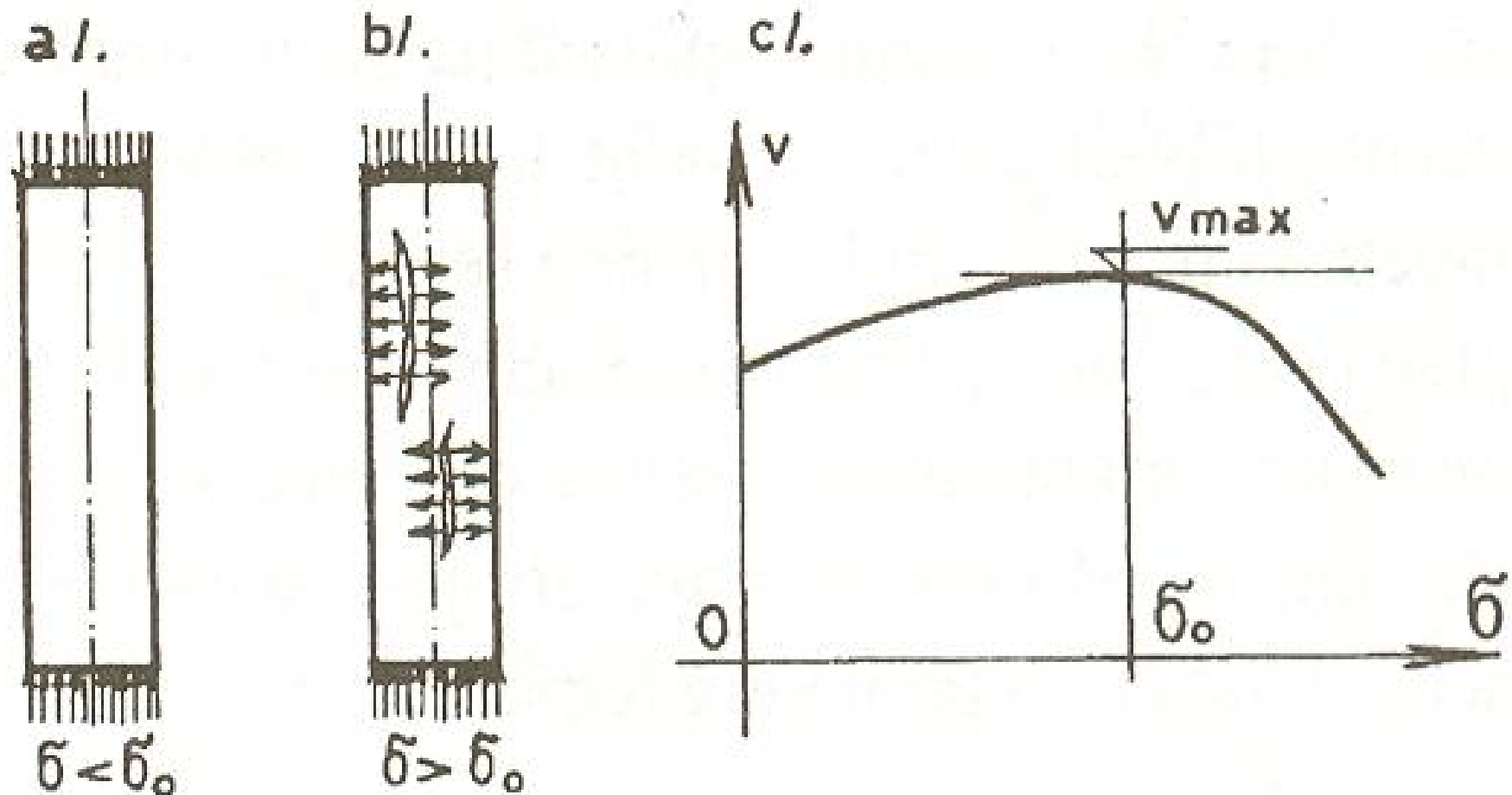
*Uticaj režima očvršćavanja na rast čvrstoće vremenom*



*Sl. 6.28. Čvrstoće betona u funkciji režima očvršćavanja*

# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

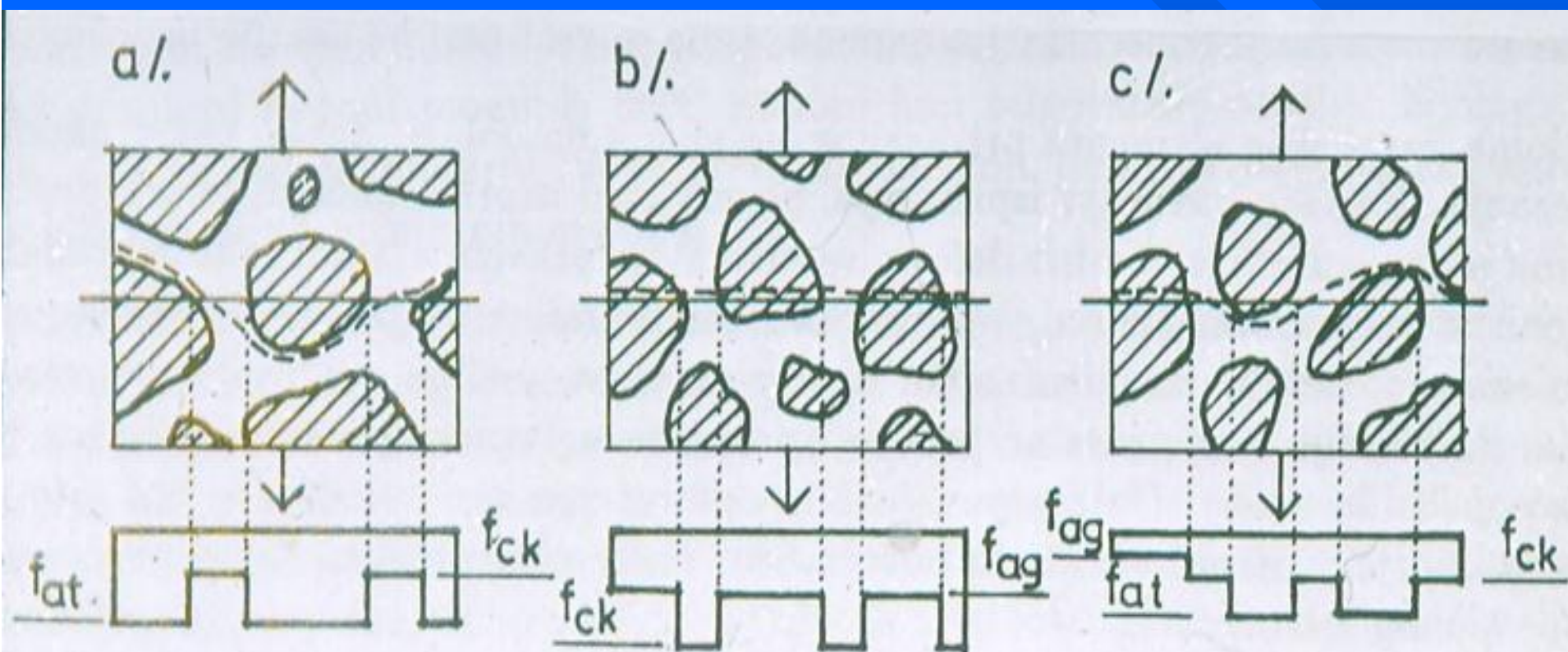
## *Mehanizam loma betona*



Sl. 6.29. Ponašanje betonskog elementa izloženog naponima pritiska

# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

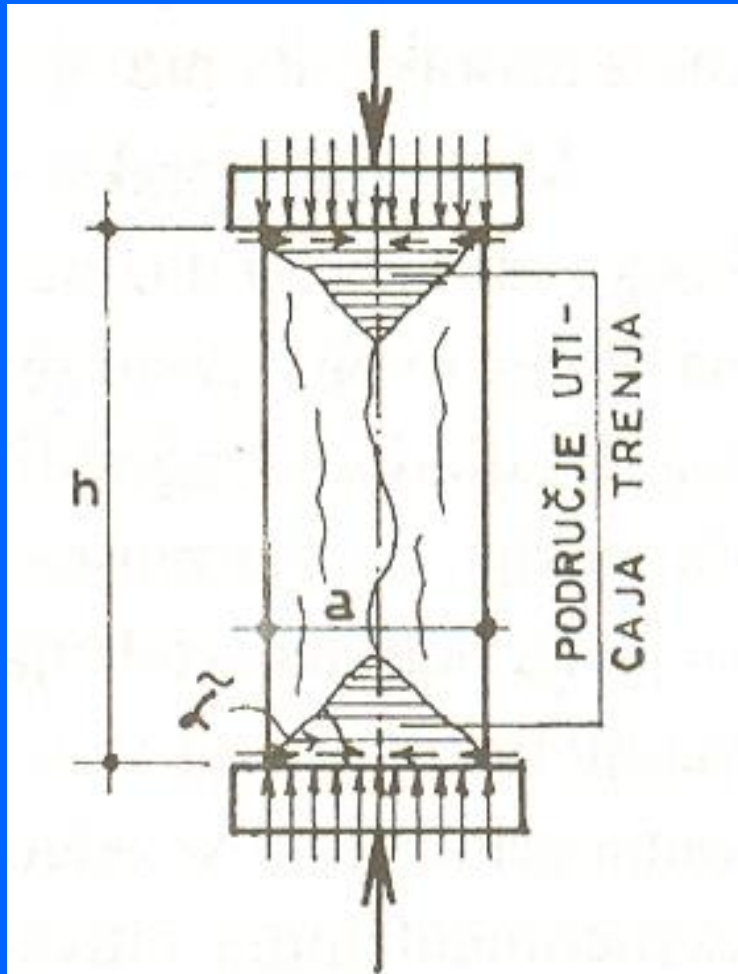
## *Mehanizam loma betona*



Slika 4.7 Osnovni tipovi loma betona.

# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## *Mehanizam loma betona*



Sl. 6.31. Lom uzorka oblika prizme pri ispitivanju na pritisak

- *Kod kocke izložene silama pritiska uticaj trenja je izražen celom njenom visinom, čime su poprečne deformacije u velikoj meri sprečene (“utegnuta” je po celoj svojoj visini)*
- *Kod prizme se, kao što se sa ove skice vidi, taj uticaj oseća samo u delovima prizme u blizini ploča kojima je opterećena, poprečne deformacije u srednjem delu se slobodno odvijaju*
- *Rezultat: Ispitivanjem betonske prizme dobija se osetno niža čvrstoća nego kod kocke od istog betona istih dimenzija u osnovi !*



# FIZICKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

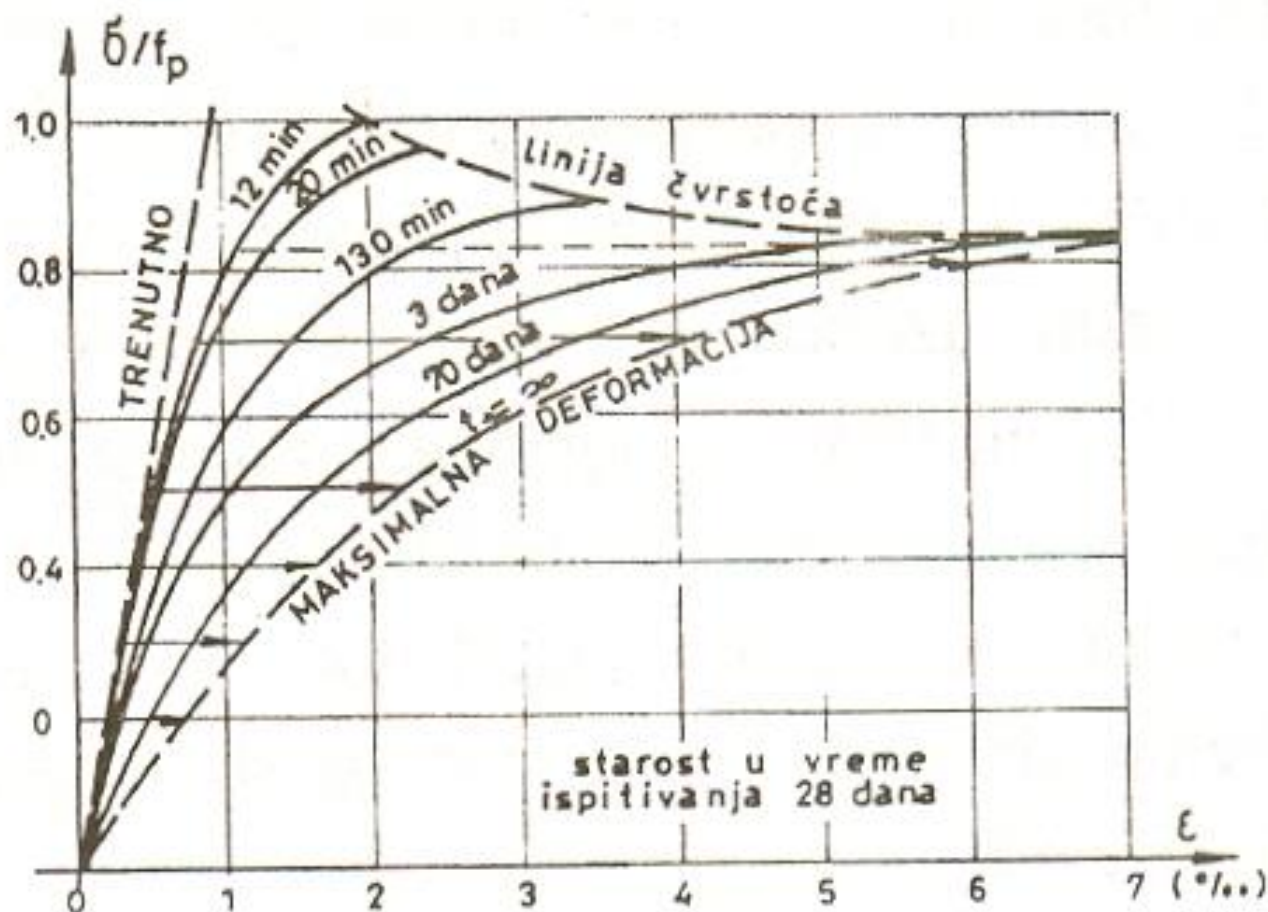
## Čvrstoća pri pritisku – Uticaj oblika i veličine uzorka

Tablica 6.5. Koeficijenti konverzije

Oblik i veličina ispitivanog tela	Odnos čvrstoća pri pritisku kocke ivice od 20 cm i odnosnog tela
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

# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

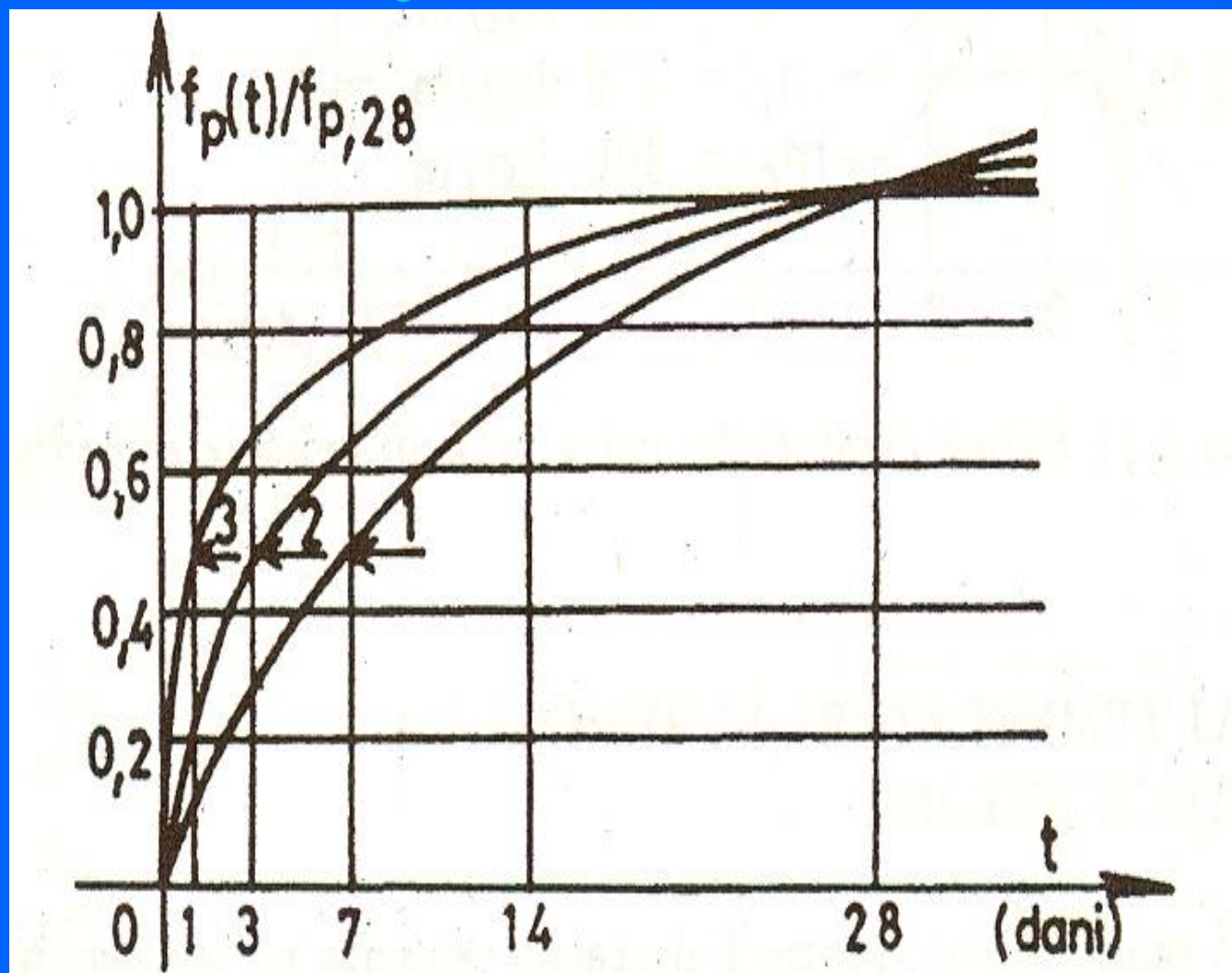
## Čvrstoća – Uticaj brzine nanošenja opterećenja



Sl. 6.32. Zavisnost čvrstoće betona od brzine nanošenja opterećenja

# FIZIČKO-MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## *Uticaj klase cementa na rast čvrstoće*



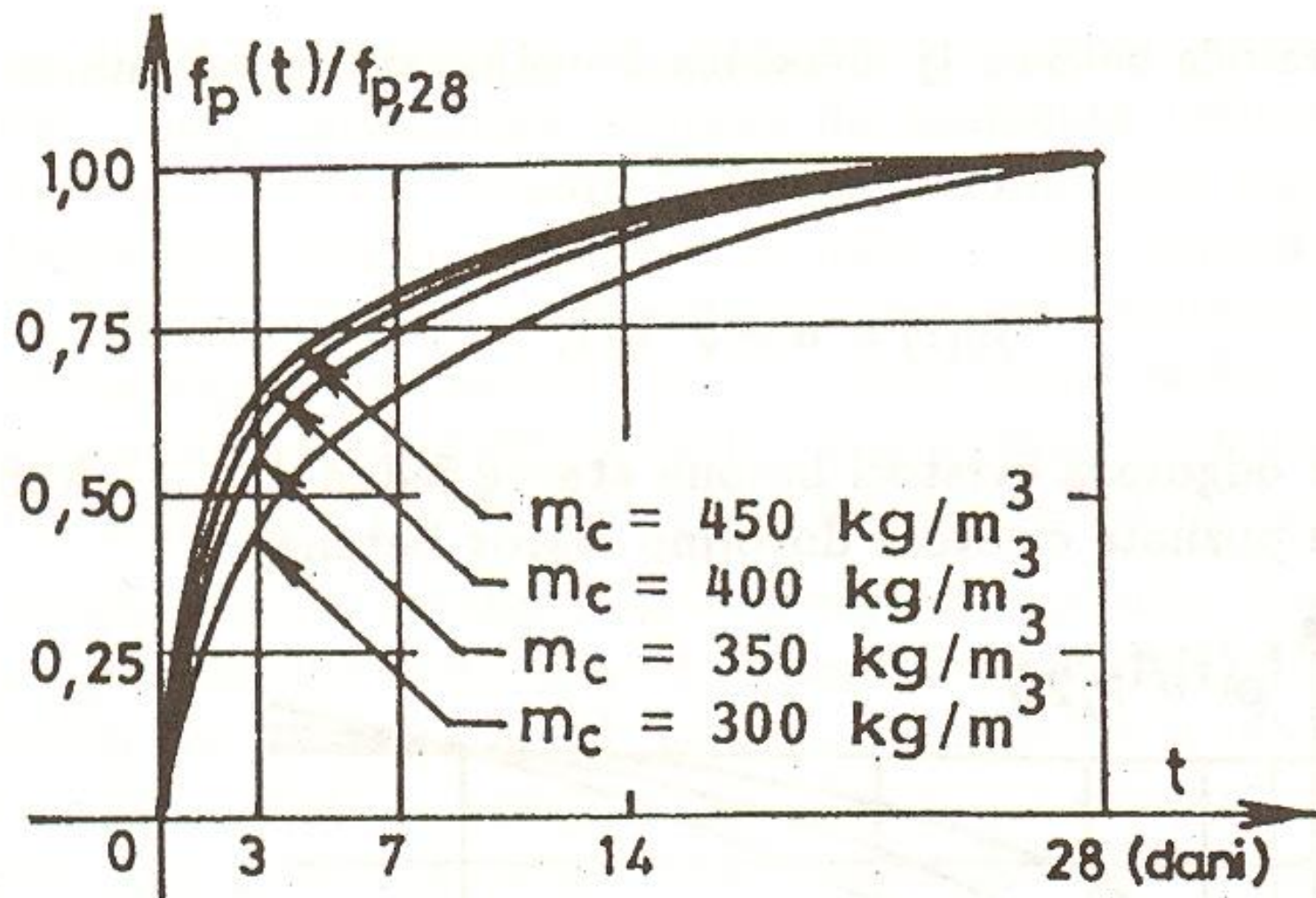
1 – PC 32,5  
2 – PC 42,5  
3 – PC 52,5

*Zavisnost čvrstoće betona od klase cementa.*



# FIZIČKO-MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## *Uticaj količine cementa na rast čvrstoće*

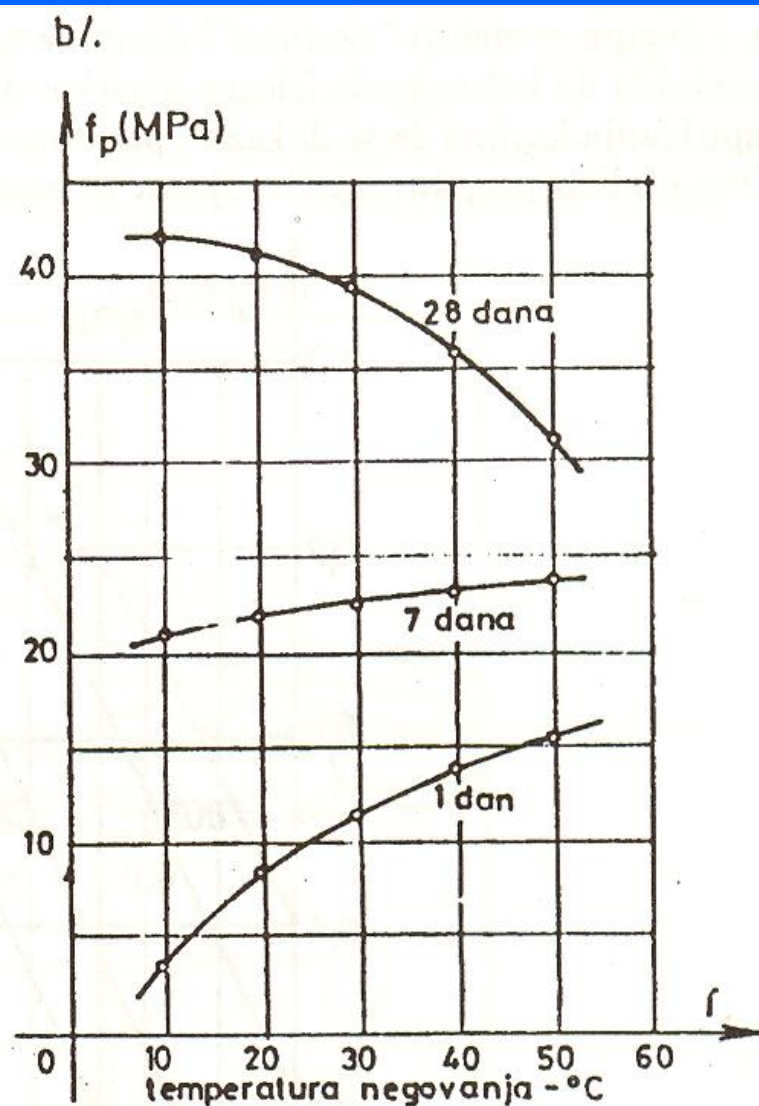
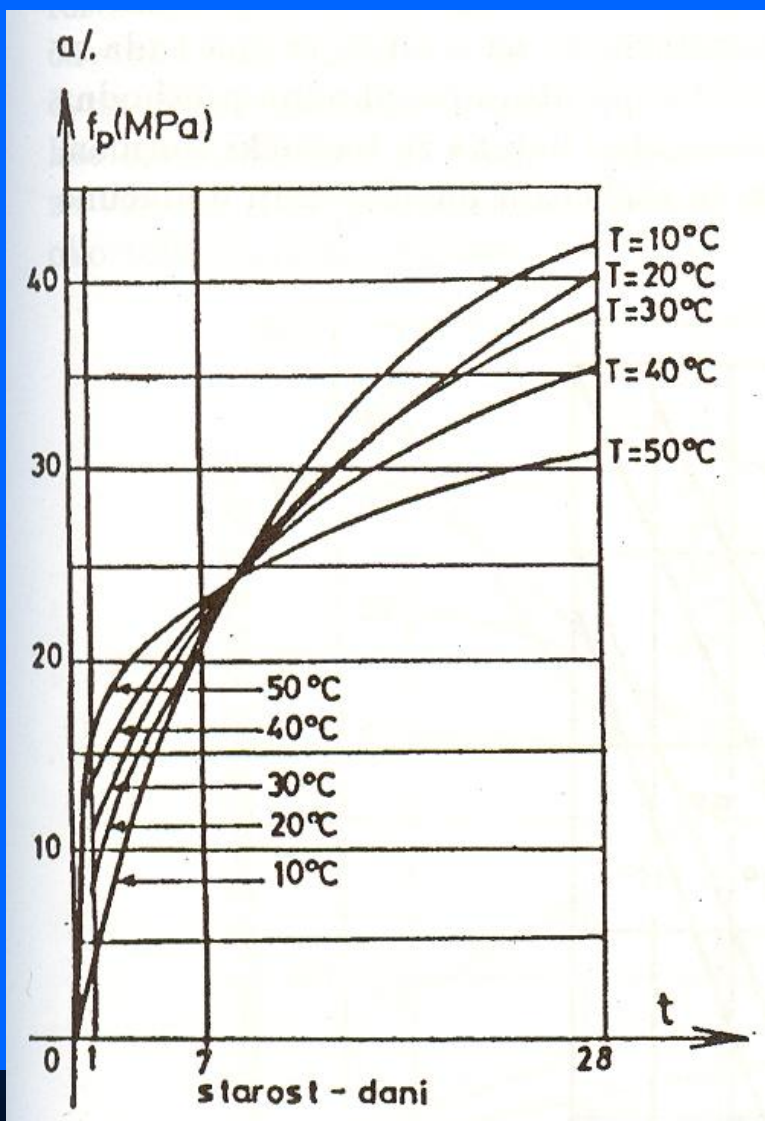


Slika 4.11 Porast čvrstoće betona u funkciji količine cementa.



# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

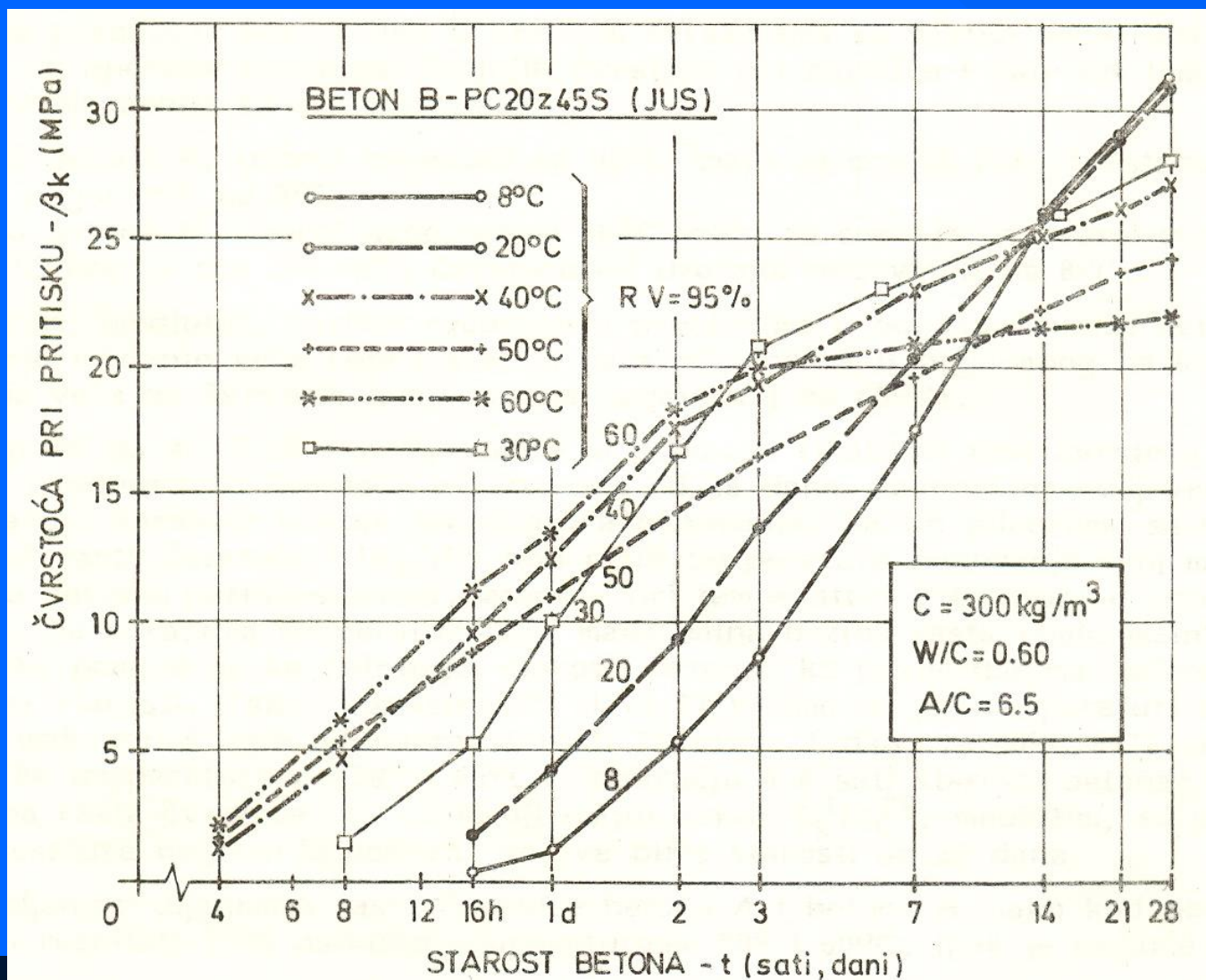
## *Uticaj temperature na rast i konačnu čvrstoću betona*



Slika 4.12 Čvrstoća betona posle 1, 7 i 28 dana u funkciji temperature negovanja.

# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

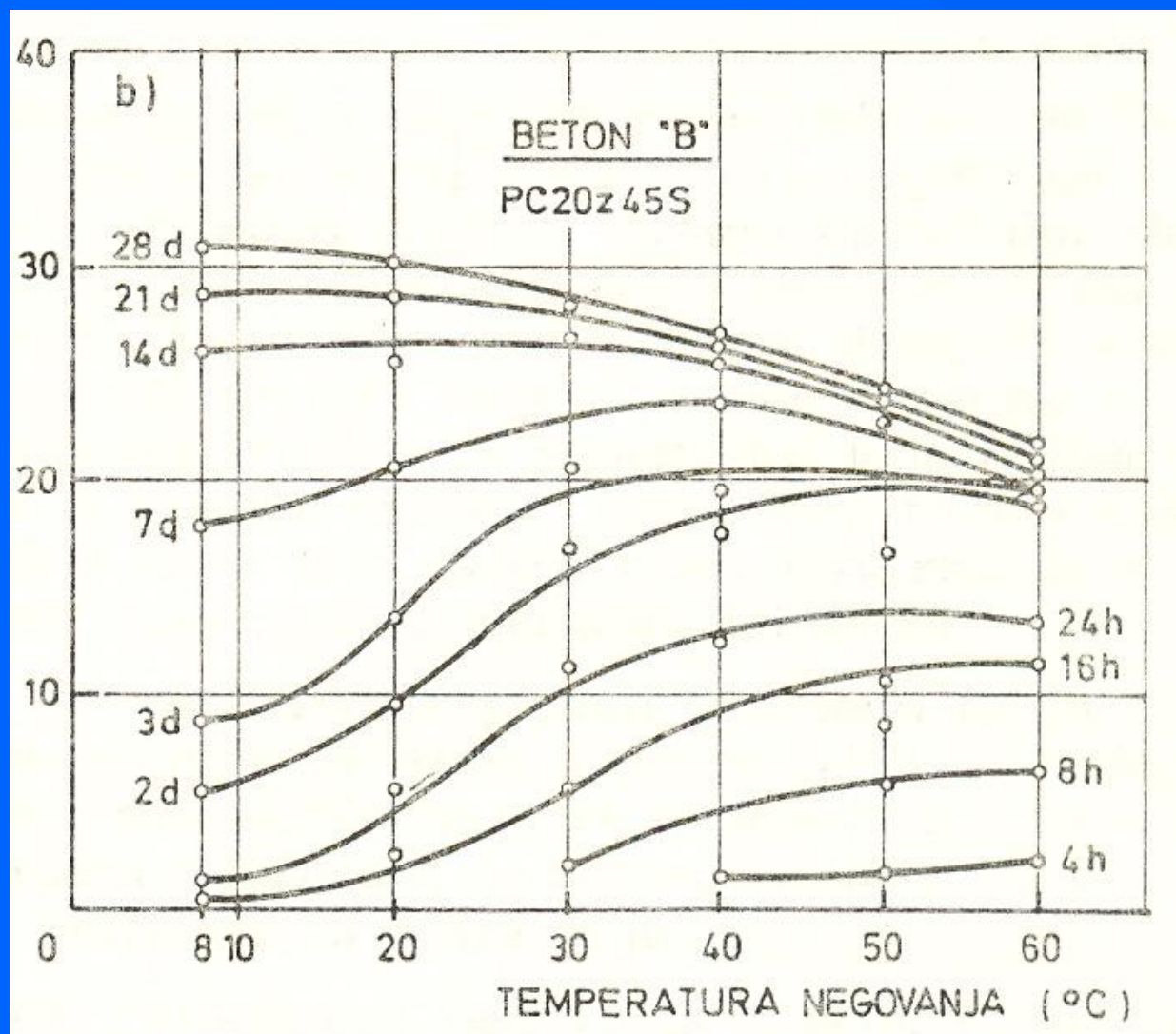
## *Uticaj temperature na rast čvrstoće betona*



*Na slici su dati rezultati ispitivanja vršenih na GF – 1988 godine*

# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## *Uticaj temperature na rast i konačnu čvrstoću betona*



*Rezultati sa prethodnog slajda dati kao rast čvrstoće u funkciji temperature, a pri raznim starostima betona u vreme ispitivanja*



# FIZIČKO MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## *Marka betona prema –BAB '87*

- *Marka betona MB je nominalna (uslovna) čvrstoća betona pri pritisku izražena u MPa, koja se dobija ispitivanjem betonskih kocki ivica 20 cm na 28 dana, a koja se zasniva na karakterističnoj čvrstoći pri fraktilu  $p=10\%$ .*
- *Za konstrukcije i elemente u oblasti betonskih i armiranobetonskih konstrukcija koriste se marke betona MB 10, MB 15, MB 20, MB 25, MB 30, MB 35, MB 40, MB 45, MB 50, MB 55 i MB 60. Najniža marka betona za izradu armiranobetonskih elemenata i konstrukcija je MB 15.*

# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## *Klasa, vrsta i partija betona prema BAB '87*

- *Pojam klasa betona, koja se označava slovним simbolima ili brojevima, obuhvata ili samo marku betona MB (što je i najčešći slučaj), ili marku betona i neka druga svojstva – vodonepropustljivost, otpornost na dejstvo mraza i dr. Pod pojmom vrsta betona podrazumeva se beton jedne klase, ali različitog sastava*
- *Partija betona je količina iste klase i iste vrste betona, koja se priprema i ugrađuje pod jednakim uslovima, a odnosi se ili na beton ugrađen u iste konstrukcijske elemente, ili u više različitih konstrukcijskih elemenata na jednom objektu, ili, pak, na količinu betona ugrađenu u elemente nekog objekta u određenom vremenskom periodu. Definisana je količinom betona i brojem uzoraka za dokazivanje marke betona. Količina betona u jednoj partiji ne treba da bude veća od količine koja se može ugraditi za mesec dana. Broj uzoraka koji se odnosi na jednu partiju betona ne može biti manji od 3, niti veći od 30.*

# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## *DOKAZIVANJE MARKE BETONA MB prema BAB '87*

### *Kriterijum 1*

*Partije betona od po 3, 6, 9, 12 ili 15 uzoraka*

*Svaki skup od po 3 rezultata (uzorka) mora  
da ispuni sledeća dva uslova:*

$$m_3 \geq MB + k_1$$

$$x_1 \geq MB - 4 \text{ (MPa)}$$

*Za uhodanu proizvodnju:  $k_1=k_2=3 \text{ MPa}$ ,*

*Za neuhodanu proizvodnju:  $k_1=4 \text{ MPa}$ ,*

*$k_2=2 \text{ MPa}$ .*



# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## *DOKAZIVANJE MARKE BETONA MB prema BAB '87*

### *Kriterijum 2*

*Partije betona od  $10 \leq n \leq 30$  uzoraka*

*Standardna devijacija  $S_n = S_{n0}$  poznata, na osnovu  $n_0$  rezultata iz prethodnog perioda*

*( $n_0 \geq 30$ )*

*n rezultata ispitivanja mora da ispuni sledeća dva uslova:*

$$m_n \geq MB + 1,2 \cdot S_{n0} \quad (\text{MPa})$$

$$x_1 \geq MB - 4 \quad (\text{MPa})$$

# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## *DOKAZIVANJE MARKE BETONA MB prema BAB '87*

### *Kriterijum 3*

*Partije betona od  $15 \leq n \leq 30$  uzoraka;  
Standardna devijacija  $S_n = S_{n0}$  nije poznata*

*n rezultata mora da ispuni sledeća dva uslova:*

$$m_n \geq MB + 1,3 \cdot S_{n0} \quad (\text{MPa})$$

$$x_1 \geq MB - 4 \quad (\text{MPa})$$

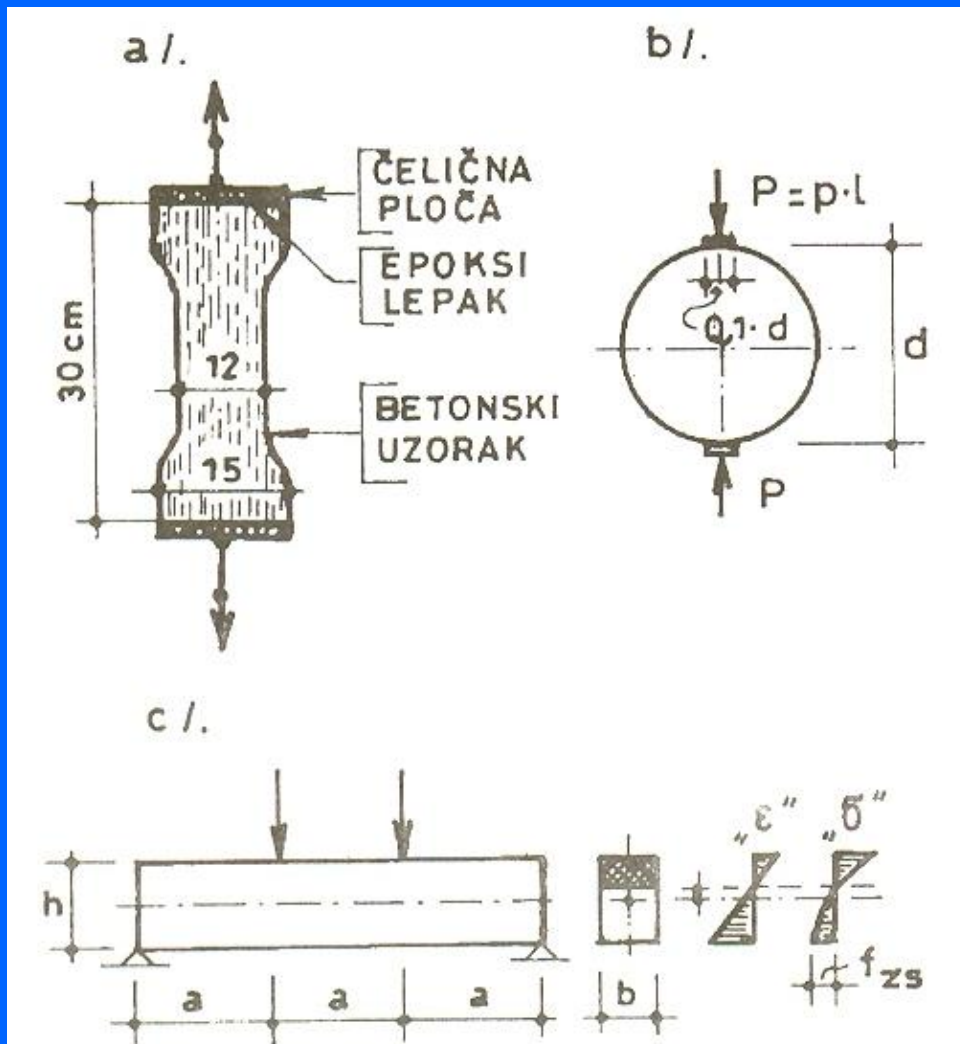
# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

*Tabela konverzije marke betona MB u klasu betona C i obratno*

<b>MB</b>	$f_{c,15/30}$ (MPa)	$f_{k,15}$ (MPa)	<b>C</b>	$0,95 \cdot f_{k,15}$ (MPa)	$1,20 \cdot f_{c,15/30}$ (MPa)	<b>MB</b>
<b>10</b>	8,3	10,5	<b>8/10</b>	9,5	9,6	<b>10</b>
<b>15</b>	12,5	15,8	<b>12/15</b>	14,25	14,4	<b>15</b>
<b>20</b>	16,7	21,0	<b>16/20</b>	19	19,2	<b>20</b>
<b>25</b>	20,8	26,3	<b>20/25</b>	23,75	24	<b>25</b>
<b>30</b>	25	31,6	<b>25/30</b>	28,5	30	<b>30</b>
<b>35</b>	29,2	36,8	<b>30/37</b>	35,15	36	<b>35</b>
<b>40</b>	33,3	42,1	<b>35/45</b>	42,75	42	<b>40</b>
<b>45</b>	37,7	47,4	<b>35/45</b>	42,75	42	<b>45</b>
<b>50</b>	41,7	52,6	<b>40/50</b>	47,5	48	<b>50</b>
<b>55</b>	45,8	57,9	<b>45/55</b>	52,25	54	<b>55</b>
<b>60</b>	50	63,2	<b>50/60</b>	57	60	<b>60</b>

# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## Čvrstoća pri zatezanju



Sl. 6.33. Ispitivanje čvrstoće betona pri zatezanju

■ Ispitivanje čvrstoće betona pri zatezanju znatno je složenije nego ispitivanje čvrstoće pri pritisku

■ Generalno, postoje 3 postupka ispitivanja ove čvrstoće:

- Putem direktnog zatezanja – a/,
- Putem zatezanja pritiskom po izvodnici (zatezanje cepanjem) – b/,
- Putem savijanja (zatezanje savijanjem) – c/.

■ Čvrstoća betona pri zatezanju višestruko je niža od čvrstoće pri pritisku:  $k = f_{bz} / f_{bp}$

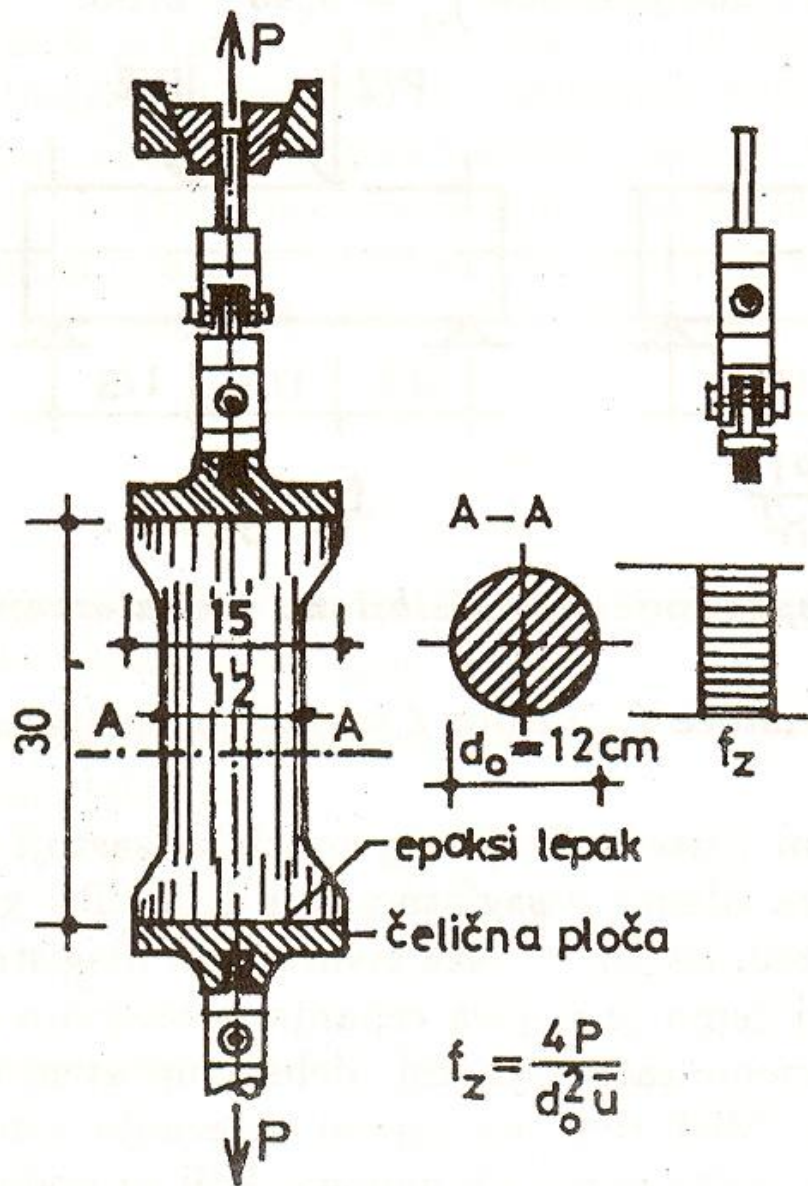
$\kappa = 0,12$  za  $f_p = 20$  MPa,

$\kappa = 0,10$  za  $f_p = 30$  MPa,

$\kappa = 0,07$  za  $f_p = 50$  MPa.

# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## Čvrstoća pri zatezanju



*Ispitivanje čvrstoće betona pri zatezanju putem opita direktnog zatezanja*

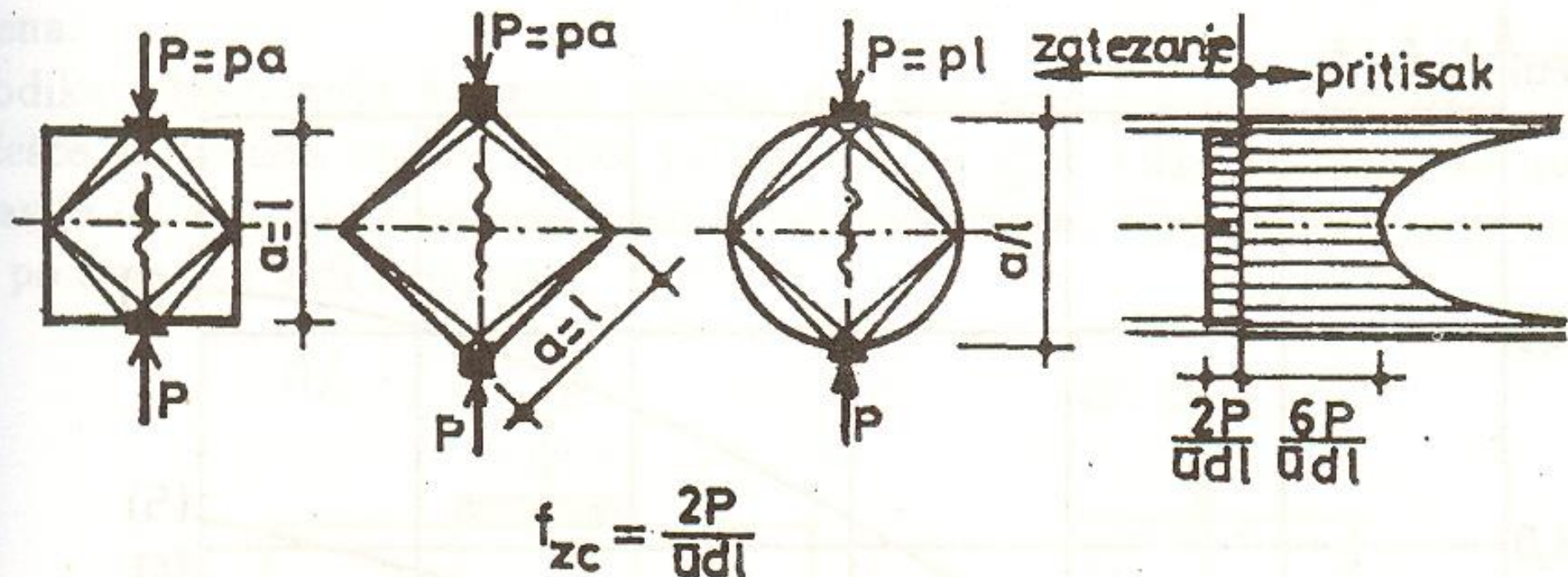
*Na priloženoj skici prikazana je praktična realizacija opita direktnog zatezanja*



# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## Čvrstoća pri zatezanju

Čvrstoća betona pri zatezanju putem linijskog pritiska po izvodnici cilindra (čvrstoća pri zatezanju cepanjem) veća je za 15-20% u odnosu na čvrstoću dobijenu direktnim zatezanjem, tj. može se kao dovoljno tačno napisati da je:  $f_z/f_{zc} \approx 0,85$

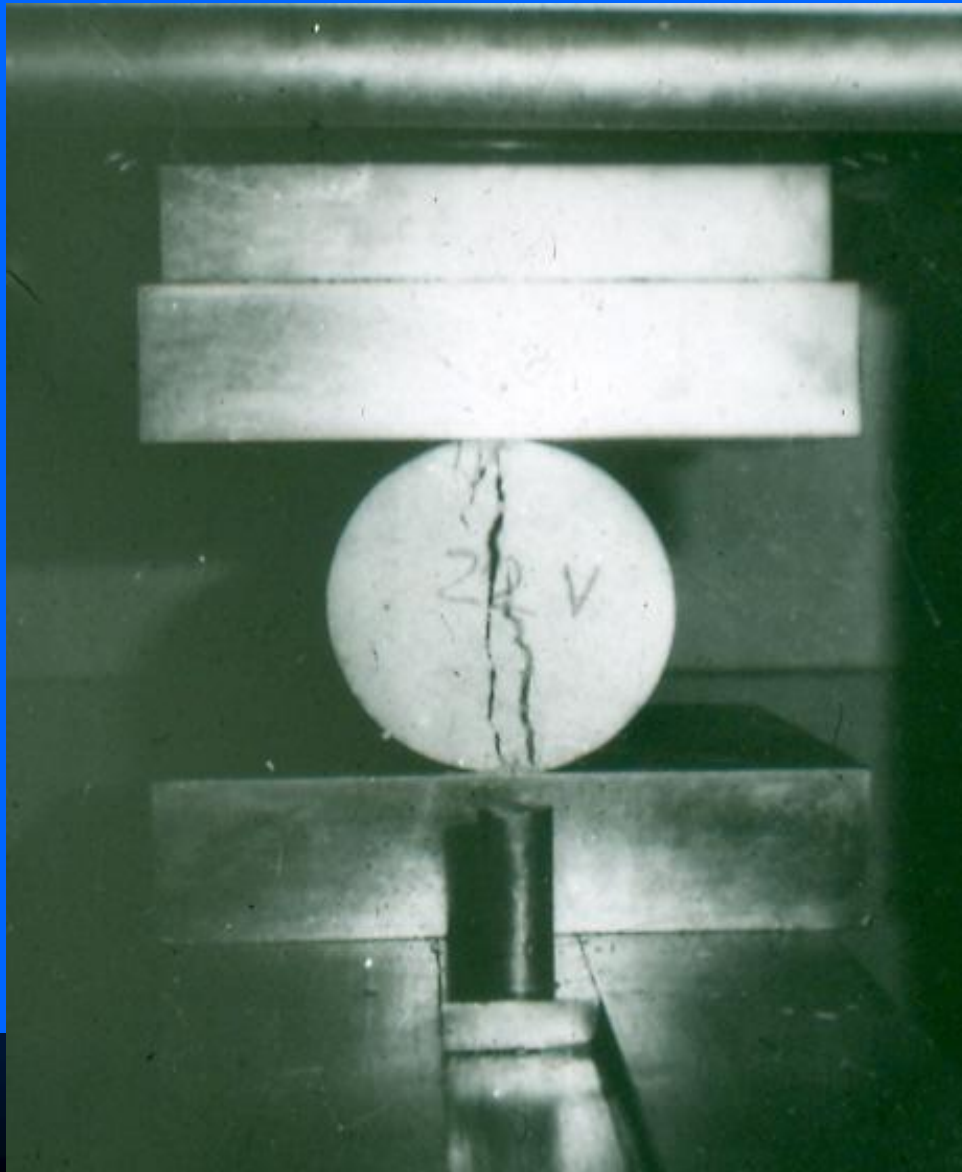


Slika 4.19 Ispitivanje čvrstoće betona pri zatezanju "cepanjem".



# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## *Čvrstoća pri zatezanju*



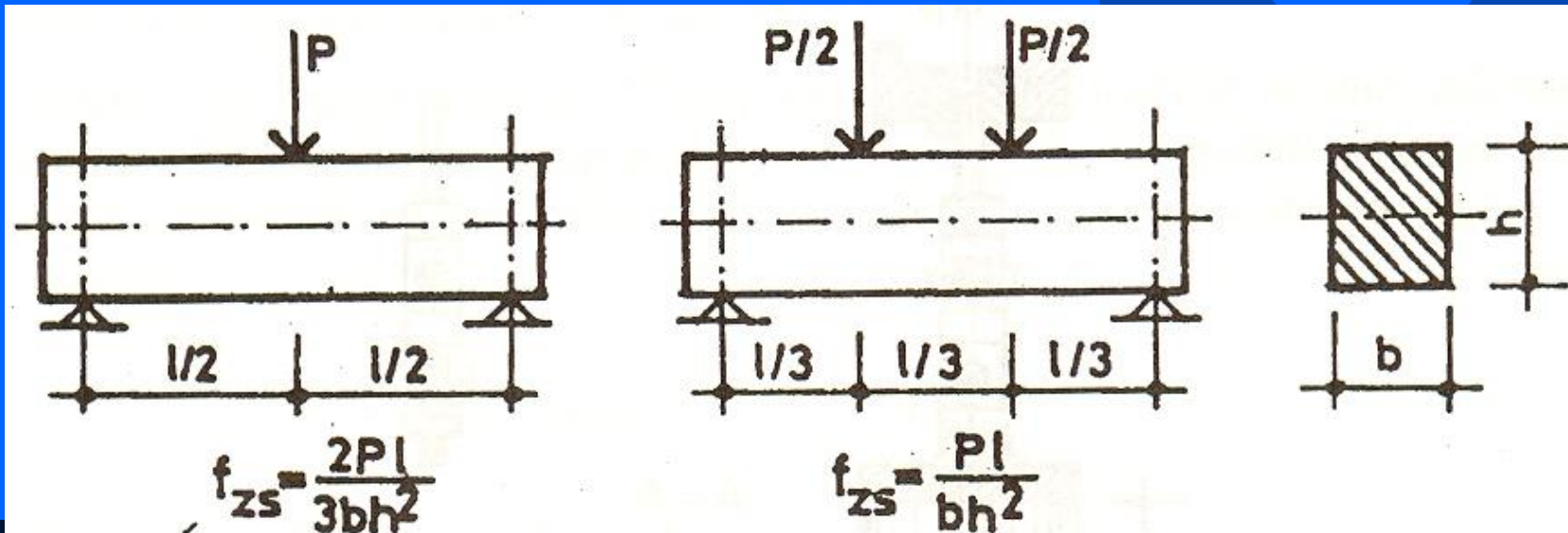
*Praktična realizacija  
ispitivanja čvrstoće betona  
pri zatezanju putem  
linijskog pritiska po  
izvodnici cilindra  
(zatezanje cepanjem)*

# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## Čvrstoća pri zatezanju

- Ispitivanje čvrstoće betona pri zatezanju putem savijanja vrši se:
  - Savijanjem silom u sredini raspona
  - Savijanjem sa dve sile u trećinama raspona
- U oba slučaja dobijaju se znatno veće čvrstoće nego direktnim zatezanjem

$$f_{zs} = \frac{6M}{b \cdot h^2} \quad f_{zs} = (1,67 - 2,22) f_z$$



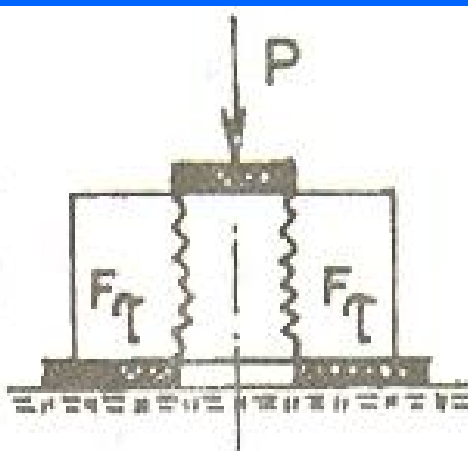
Slika 4.18 Ispitivanje čvrstoće betona pri zatezanju savijanjem.

# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

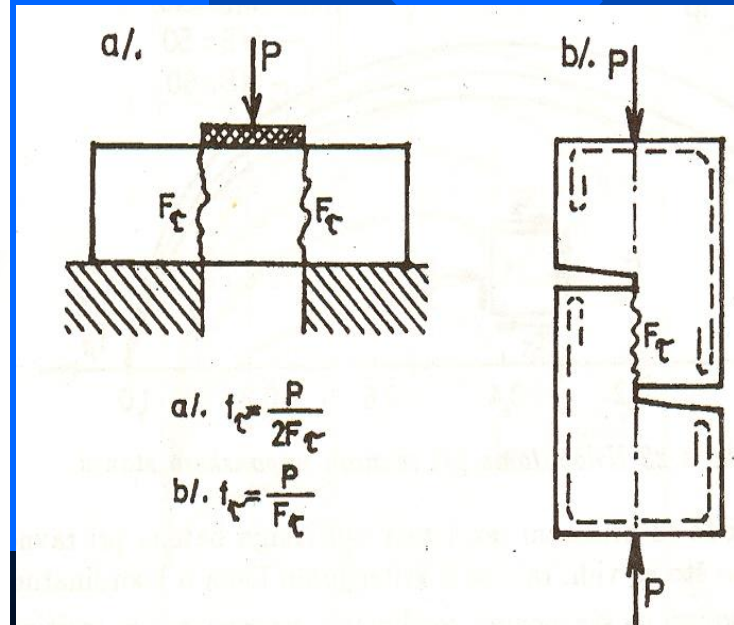
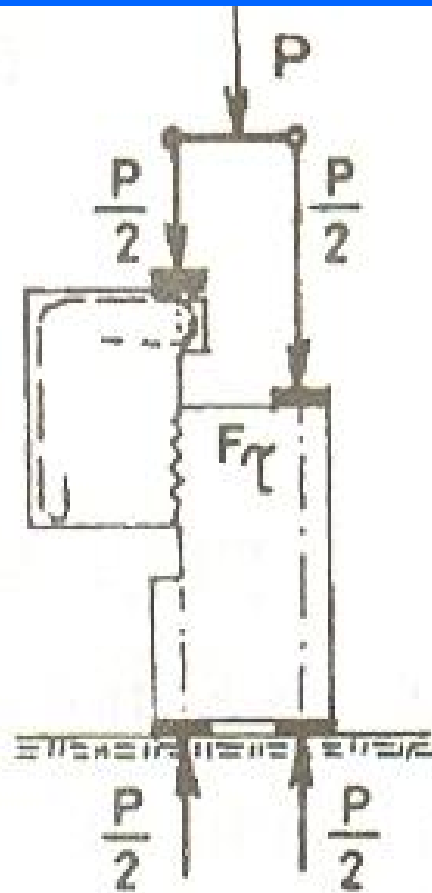
## Čvrstoća pri čistom smicanju

- Kao veza između čvrstoće pri smicanju i drugih čvrstoća betona mogu se koristiti sledeći izrazi:  $\rightarrow \rightarrow$

$$f_{\tau s} = (0,7 - 0,8) \sqrt{f_p \cdot f_z} \text{ ili } f_{\tau s} \cong 2f_z$$

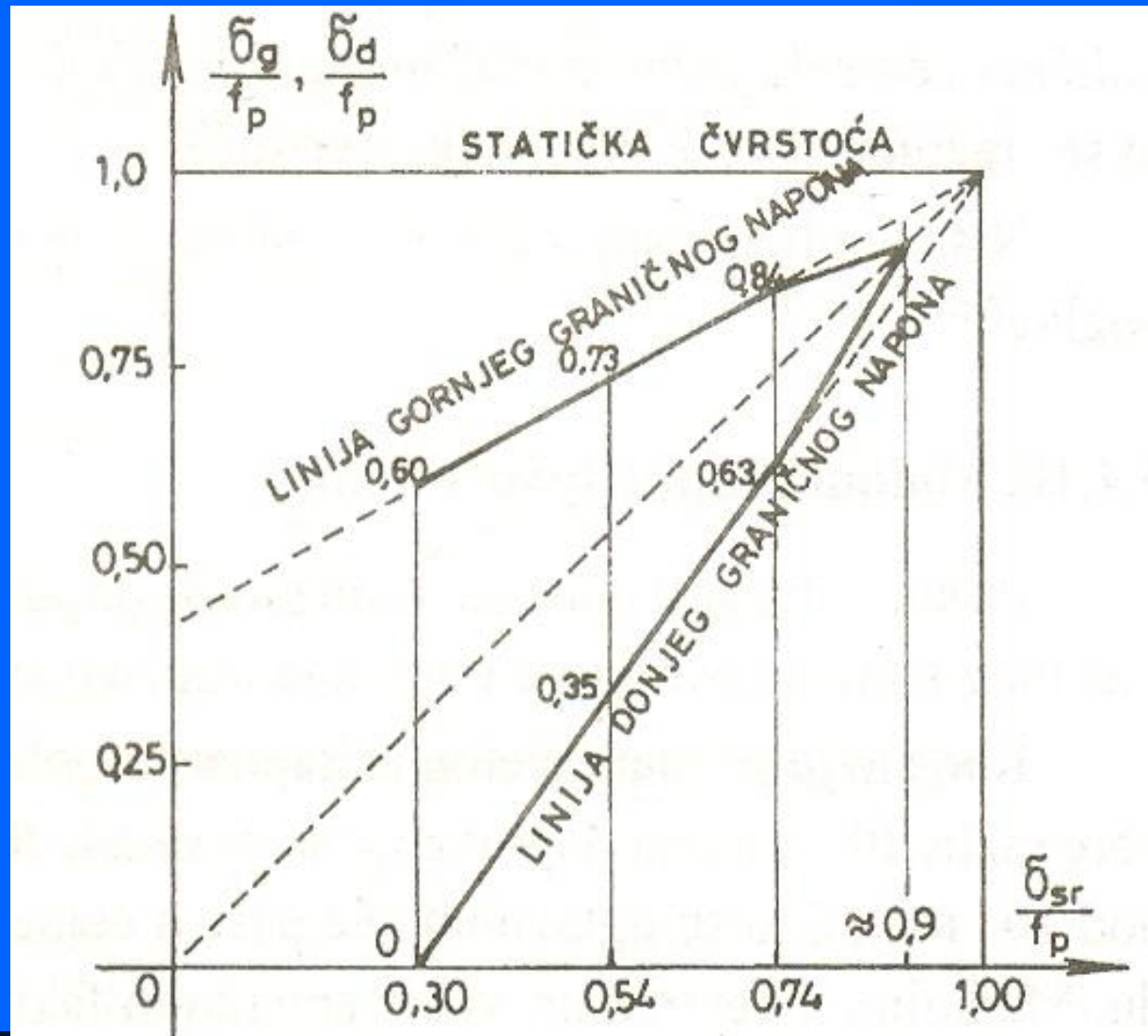


$$f_{\tau s} = \frac{P_{gr}}{2F_{\tau}}$$



# FIZIČKO – MEHANIČKA SVOJSTVA BETONA

## Čvrstoća betona pri dinamičkom opterećenju



Sl. 6.37. Smitov dijagram za beton

# VODONEPROPUSTLJIVOST BETONA – VDP

## *Osnovni faktori uticaja*

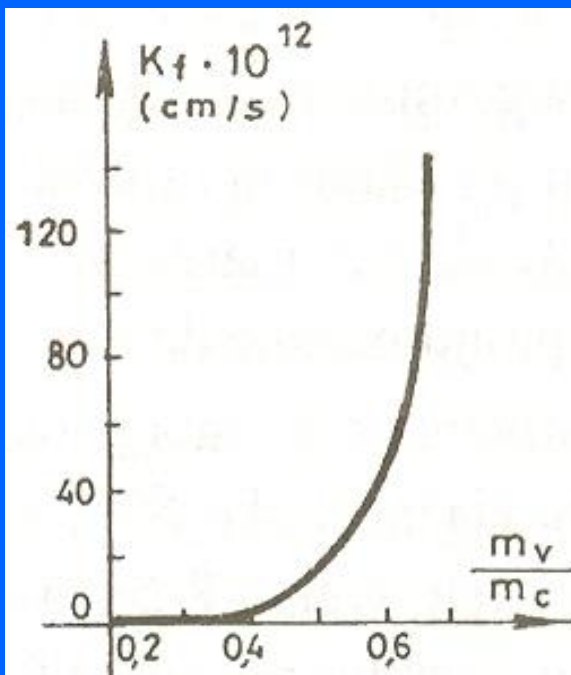
- *Propustljivost betona za vodu zavisi od:*
  - *Stepena hidratacije cementa,*
  - *Poroznosti cementnog kamena,*
  - *Strukture pora,*
  - *Svojstava cementa i agregata, pojedinačno.*
- *Mikrokapilari – veličine ispod  $10^{-7}$  mm, a to su gelske pore, praktično su nepropustljive za vodu.*
- *Makrokapilari – veličine preko  $10^{-7}$  mm, koje nastaju u cem. kame - nu pri  $m_v/m_c > 0,40$ , imaju moć upijanja i propuštanja vode, usled pritiska, kapilarnog penjanja, osmotskog efekta i dr.*
- *S obzirom na ovo, proizilazi da vodonepropustljivost betona u opš - tem slučaju zavisi od ukupne zapremine kapilarnih pora, njihovog rasporeda, kao i od karaktera poroznosti (otvorena ili zazvorena).*
- *Prema tome, na vodonepropustljivost betona može se uticati smanjivanjem vodocementnog faktora, stepenom hidratacije, efikasnošću ugrađivanja, primenom aditiva zaptivača.*
- *Veliki značaj za VDP imaju i mikroprslina (skupljanje, temperaturne promene)*



# VODONEPROPUSTLJIVOST BETONA

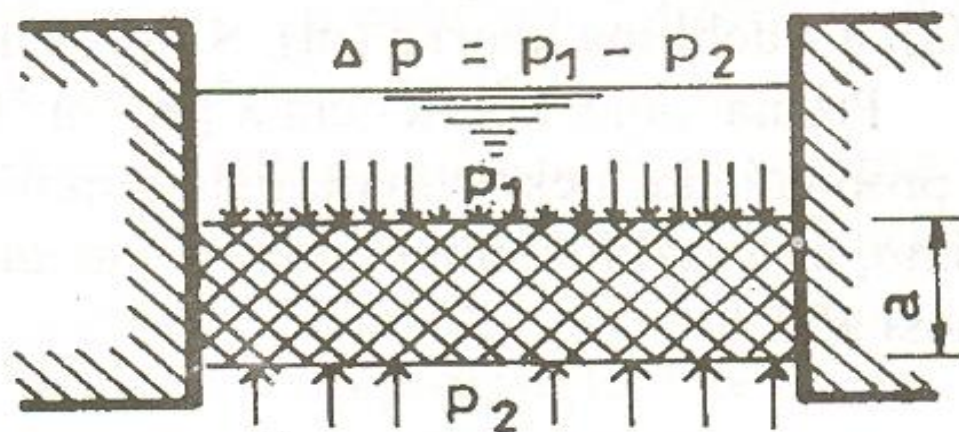
## Koeficijent filtracije

- *Vodonepropustljivost betona često se ceni na osnovu veličine koeficijenta filtracije (videti skicu i izraz dole – desno). Na skici dole levo: zavisnost koef. filtracije i vodocementnog faktora.*



Sl. 6.38. Zavisnost između koeficijenta filtracije i odnosa  $m_v / m_c$

$$\text{Koeficijent filtracije: } k_f = \frac{V_v \cdot a}{S \cdot \Delta p \cdot t} \text{ (m/h)}$$



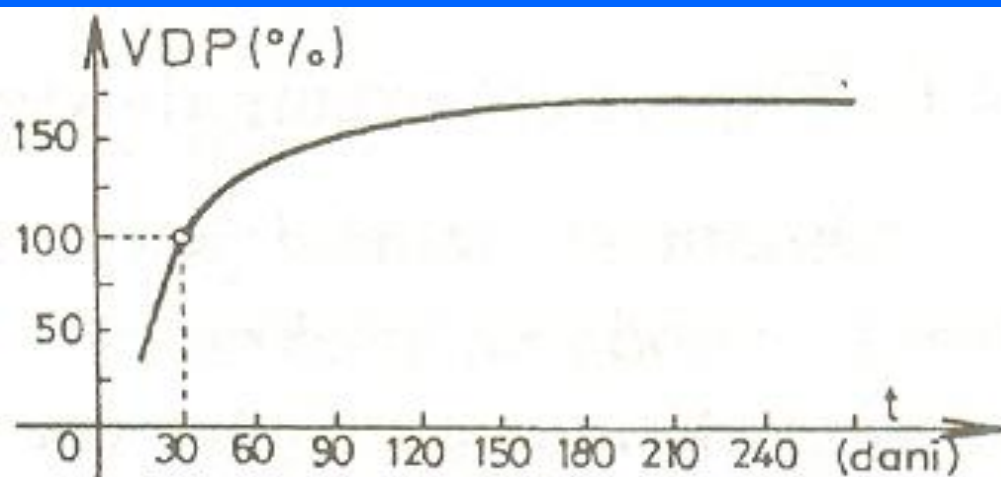
Sl. 7.5. Šematski prikaz ispitivanja vodonepropustljivosti



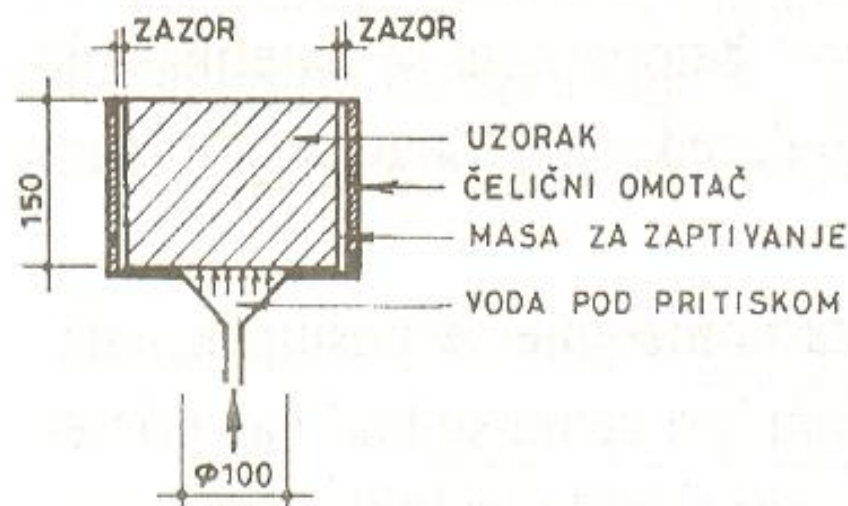
# VODONEPROPUSTLJIVOST BETONA

*Promena vodoneprostljivosti betona u funkciji starosti (levo)  
i šema jednog od mogućih postupaka ispitivanja (desno)*

- Prema važećem domaćem standardu JUS U.M1.015 za ispitivanje se koriste kocke ivica 15 ili 20 cm, odnosno cilindri 15x15 cm (izvađeni iz konstrukcije)
- Uzorci se izlažu pritiscima vode (kao na skici) i to: 48 h – 1 bar, zatim 24 h – 3 bar-a i još 24 h – 8 bar-i. Kao kriterijum služi projektom propisana visina penjanja vode (videti i sledeći slajd):



Sl. 6.39. Zavisnost vreme – VDP

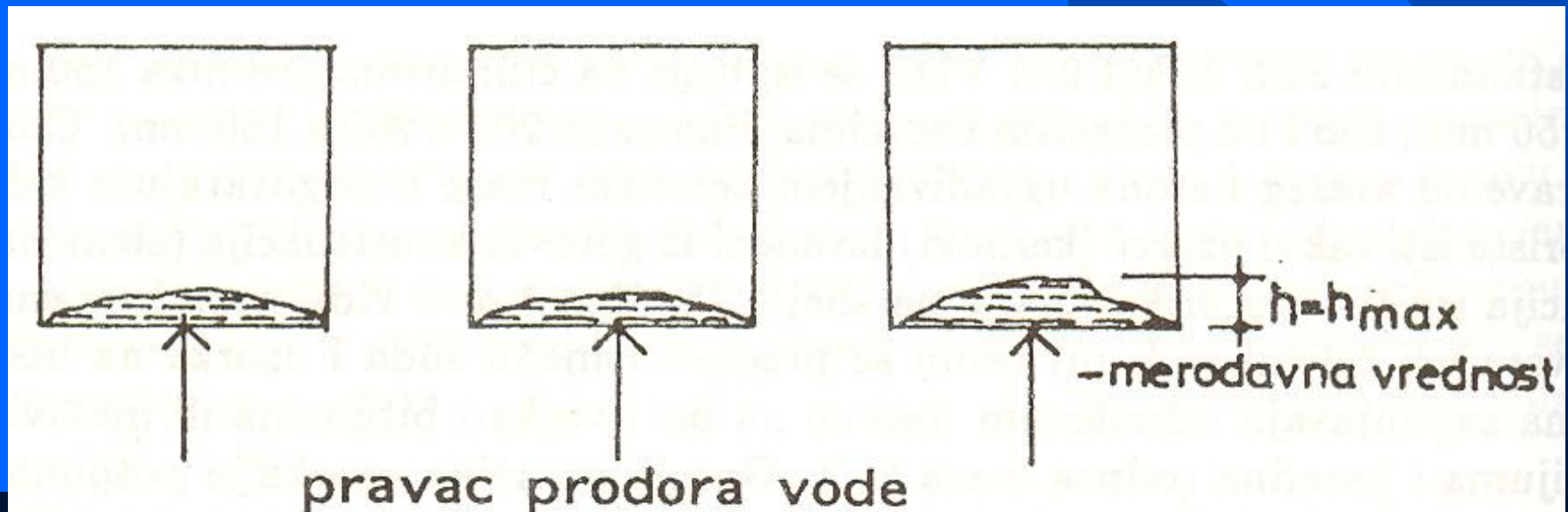


Sl. 6.40. Postupak ispitivanja vodonepropustljivosti

# VODONEPROPUSTLJIVOST BETONA

## *Merenje visine penjanja vode nakon završenog opita*

- *Prema napred navedenom domaćem standardu uzorci se nakon izlaganja vodenim pritiscima (u ukupnom trajanju od 4 dana) cepaju po sredini i na obe polovine meri se visina penjanja vode – rezultat se zaokružuje na bližih 5 mm.*
- *Starost uzoraka na početku ispitivanja treba da iznosi najmanje 28 dana.*



*Slika 4.29 Šeme prodora vode u uzorke.*

# OTPORNOST BETONA NA DEJSTVO MRAZA

## *Definicija otpornosti i osnovni faktori uticaja*

- *Podrazumeva sposobnost betona da u stanju zasićenosti vodom podnese višekratno smrzavanje i odmrzavanje*
- *Razlog destrukcije betona su unutrašnji naponi u kapilarama usled širenja leda, čija je zapremina za 9% veća od zapremine vode od koje nastaje*
- *U mikrokapilarama ispod  $10^{-7}$  (gelske pore) voda se ne mrzne ni do  $-70^{\circ}\text{C}$ , pa osnov neotpornosti betona na mraz, kao i vodopropustljivosti, čine kapilarne pore u betonu, kao posledica vodocementnog faktora  $> 0,40$ !*
- *Prema tome, dovoljno visoka otpornost betona na mraz i u ovom slučaju postiže se primenom dovoljno niskih vodocementnih faktora (primenom superplastifikatora), kao i dodavanjem aeranata betonu*
- *Nekompatibilnost koeficijenata termičke dilatacije agregata i cementnog kamena drugi je osnovni faktor neotpornosti betona na dejstvo mraza*

# OTPORNOST BETONA NA DEJSTVO MRAZA

## *Klase otpornosti na dejstvo mraza i ispitivanje*

- *Prema JUS-u, postoje sledeće klase otpornosti betona na dejstvo mraza: M-50, M-100, M-150, M-200, M-250 i M-300.*
- *Destruktivni postupak (ispitivanjem čvrstoće pri pritisku) i Nedestruktivni postupak (ispitivanjem dinamičkog modula elastičnosti putem rezonantne frekvencije). Opis prvog postupka dat je niže, a opis drugog postupka ispitivanja na sledećem slajdu!*
- *Destruktivni postupak: Uzorci: Kocke ivica 15 ili 20 cm, ili cilindri (kernovi)  $\Phi 15$  i visine 15 cm, izvađeni iz konstrukcije. Osim za klasu M-50, kada je potrebno 9 uzoraka (6 etalonskih i 3 koja se izlažu mržnjenju i kravljinju), za sve ostale klase-15 uzoraka (9 etalonskih i 6 koji se izlažu mržnjenju i kravljinju)*
  - *Ispitivanje uzoraka koji se izlažu mržnjenju i kravljinju: Prva 3 – po isteku 50 ciklusa manje od predviđenog broja ciklusa, a druga 3 – nakon isteka celog broja ciklusa za ispitivanu klasu*
  - *Ispitivanje etalonskih uzoraka: Prva 3 – na početku ispitivanja, druga 3 – nakon 50 ciklusa manje od predviđenog broja ciklusa i poslednja 3 – po isteku celog broja ciklusa za ispitivanu klasu*

# OTPORNOST BETONA NA DEJSTVO MRAZA

## *Ispitivanje*

### ■ Nedestruktivni postupak:

3 prizme dimenzija 10/10/40 ili 12/12/36 cm, izlažu se mržnjenju i kravljenju, pri čemu se pre početka ispitivanja, kao i posle svakih 50 ciklusa mržnjenja i kravljenja, ispituje dinamički modul elastičnosti  $E_D$  (određivanjem rezonantne frekvencije  $f$ )

### ■ *Kriterijumi za ocenu otpornosti betona na dejstvo mraza:*

- Kod destruktivnog postupka: Čvrstoća uzoraka izlaganih opitu mržnjenje – kravljenje, nakon broja ciklusa mržnjenja i kravljenja za datu klasu, treba da iznosi najmanje 75% čvrstoće etalonskih uzoraka
- Kod nedestruktivnog postupka: Dinamički modul elastičnosti  $E_D$  uzoraka izlaganih opitu mržnjenje – kravljenje nakon broja ciklusa mržnjenja i kravljenja za datu klasu, treba da iznosi najmanje 75% dinamičkog modula elastičnosti istih uzoraka na početku ispitivanja



# OTPORNOST BETONA NA DEJSTVO MRAZA

## *Ispitivanje*

- *Sve uzorke, u oba postupka ispitivanja, treba 4 dana pre početka ispitivanja staviti u vodu, tako da budu u potpunosti potopljeni (postupak zasićenja vodom)*
- *Ispitivanje otpornosti betona na dejstvo mraza, na uzorcima uzetim od svežeg betona tokom izvođenja radova, po pravilu započinje pri starosti betona od najmanje 28 dana*
- *Uzorci (kernovi) uzeti iz gotove konstrukcije ispituju se pri starosti koja odgovara vremenu vađenja, ali, u slučaju vađenja iz elemenata (konstrukcija) u izgradnji, takođe ne pri starosti manjoj od 28 dana*
- *Jedan ciklus smrzavanje – odmrzavanje traje 4+4 časa (tri ciklusa dnevno) ili 6+6 časova (2 ciklusa dnevno)*

# OTPORNOST BETONA NA DEJSTVO MRAZA

## *Ispitivanje*

- *Prilikom ovog ispitivanja treba voditi računa o usporenom prirastu čvrstoće betona tokom smrzavanja, tj. o tome da čvrstoća etalonskih uzoraka, koji celo vreme očvršćavaju u vodi temperature cca 20°C, raste brže nego čvrstoća uzoraka koji se naizmenično izlažu mržnjenju na -20°C i kravljenju u vodi, na cca 20°C*

- *Iz tih razloga se mora odrediti tzv. “ekvivalentna starost” etalonskih uzoraka. Domaći standard nudi izraz za sračunavanje ekvivalentne starosti  $t_e$  etalonskih uzoraka:*

$$t_e = t_a + c \cdot n$$

*i odgovarajuću tablicu u kojoj se daje vrednost koeficijenta  $c$  u zavisnosti od broja ciklusa smrzavanja i odmrzavanja  $n$  u toku 24 časa (na sledećem slajdu)*

- *Veličina  $t_a$  u izrazu predstavlja starost uzoraka na početku ispitivanja*

# OTPORNOST BETONA NA DEJSTVO MRAZA

## *Ispitivanje – ekvivalentna starost etalonskih uzoraka*

$$t_e = t_a + c \cdot n$$

<i>Tri ciklusa dnevno</i>	<i>Dva ciklusa dnevno</i>	<i>Jedan ciklus dnevno</i>
<i>0,20</i>	<i>0,35</i>	<i>0,80</i>

■ *Numerički primer: Klasa M 150;  $t_a = 28$  dana;  $n = 2$ .*

● *Prvo ispitivanje - posle 150-50 =100 ciklusa:*

- *Prava starost uzoraka:  $t=28+100/2=28+50=78$  dana*

- *Ekvivalentna starost:  $t_e=28+0,35 \cdot 100=28+35=63$  dana*

● *Drugo ispitivanje - posle svih 150 ciklusa:*

- *Prava starost uzoraka:  $t=28+150/2=28+75=103$  dana*

- *Ekvivalentna starost:  $t_e=28+0,35 \cdot 150=28+52,5=63$*

*dana*

# OTPORNOST BETONA NA DEJSTVO MRAZA I SOLI

- *Vrlo često se nameće potreba ispitivanja betona na dejstvo mraza izloženog istovremeno i uticaju soli (NaCl) za odmrzavanje. Postupak se sastoji u procesu smrzavanja i odmrzavanja uzoraka čija je gornja površina podvrgnuta delovanju troprocentnog rastvora NaCl*
- *Propisani uzorci se na način definisan standardom JUS U.M1.055 podvrgavaju delovanju ovakvog rastvora, pa se nakon toga izlažu u 25 ciklusa naizmeničnom mržnjenju u trajanju 16-18 h na temperaturi cca  $-20^{\circ}\text{C}$  i kravljenju na sobnoj temperaturi 6-8 h*
- *Na kraju ovakvog ispitivanja registruje se gubitak mase i dubina ljušćenja površine betona koja je bila pod uticajem rastvora soli*
- *Kriterijumi degradacije dati su u tablici na sledećem slajdu*

# OTPORNOST BETONA NA DEJSTVO MRAZA I SOLI

*Tablica 6.7. Kriterijmi degradacije betona izloženog istovremenom delovanju mraza i soli za odmrzavanje*

Stepen oštećenja	Gubitak mase (mg/mm <sup>2</sup> )	Dubina oštećenja najviše(mm)	Vizuelni opis	Kriterijum za ocenu
0 – bez ljuštenja	0	0	Nema promena na površini	Otporan
1 – slabo ljuštenje	0,2	1	Oštećenje finog maltera	Otporan
2 – srednje ljuštenje	0,5	4	Oštećenje površine, vidljiva pojedina zrna agregata	Otporan
3 – jako ljuštenje	1	10	Vidljiva zrna agregata po celoj površini	Neotporan



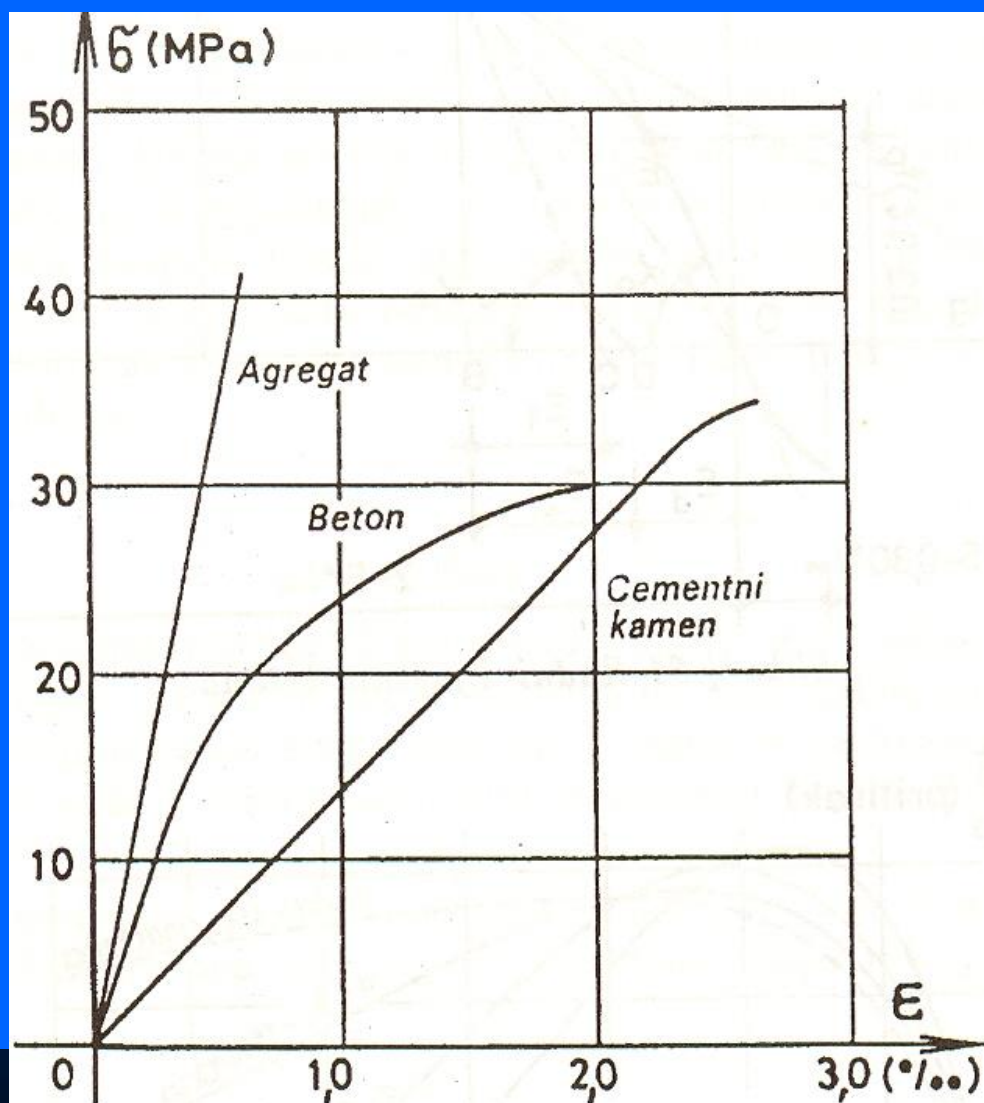
# OTPORNOST BETONA NA HABANJE

- *Kod ove vrste otpornosti osnovno je da beton ima dovoljnu čvrstoću i tvrdoću u površinskom sloju, koji je neposredno izložen delovanju habanja*
- *Pored agregata, koji sam po sebi mora da bude dovoljno otporan na ovaj uticaj, potrebno je primeniti cemente visokih klasa i niske vodo-cementne faktore. Preimućstvo ima drobljeni agregat, pri čemu treba težiti optimalnom učešću krupnih frakcija, uz minimalno potrebno učešće sitnih*
- *Mogu se primenjivati plastifikatori i superplastifikatori, radi smanjenja količine vode, pošto se ni u kom slučaju ne sme dozvoliti izdvajanje cementne paste na površini*
- *Uzorci za ispitivanje su kocke ivica 7,07 cm, izrezani iz nekog većeg komada betona, ili kocke ivica 10 cm uzete od svežeg betona*
- *U našoj regulativi za sada ne postoje kriterijumi za ovu vrstu otpornosti – koriste se analogije sa prirodnim kamenom*

# OTPORNOST BETONA NA HEMIJSKE UTICAJE

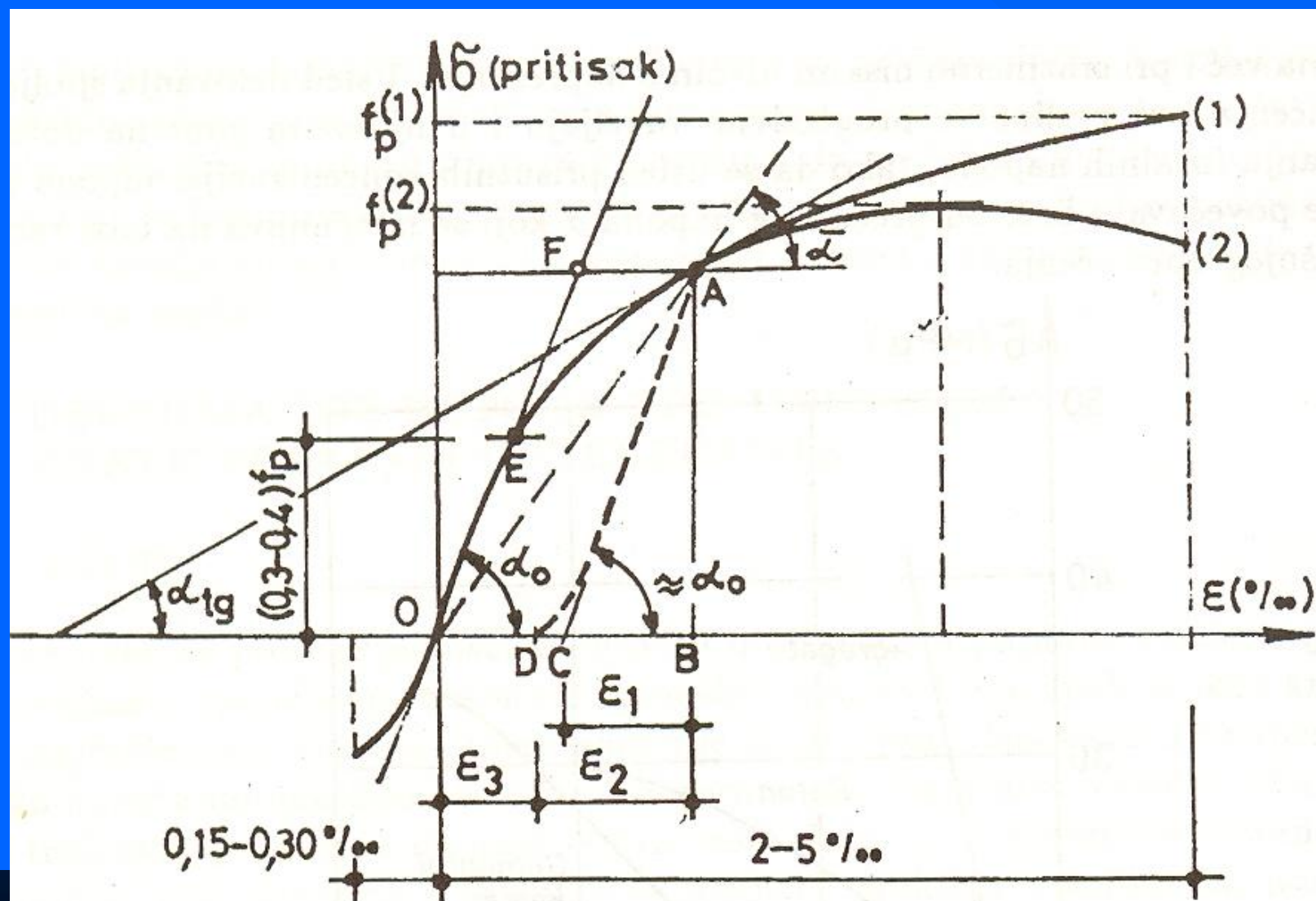
- *U najvećoj meri zavisi od hemijske otpornosti upotrebljenog cementa i ostvarene kompaktnosti betona*
- *To znači da treba dobiti cementni kamen sa mini-malnom poroznošću, a to se može postići primenom dovoljno niskih vodementnih faktora*
- *Što niži vodocemntni faktori, uz uslov da agregat i voda ne sadrže više od maksimalno dozvoljenih procenata hlorida (agregat: 0,10% za armirane, odnosno 0,02% za prethodno napregnute konstrukcije; voda: 0,03% za armirane, odnosno 0,01% za prethodno napregnute konstrukcije), istovremeno garantuje i dobru otpornost konstrukcija na hemijske uticaje*
- *Pri istovremenom delovanju sulfata i hlorida (morska voda), umesto sulfatno otpornih PC ( $C_3A \leq 3,5\%$ ), prednost treba dati cementima sa umerenim sadržajem  $C_3A$  (8-10%), pošto višak ovog veštačkog minerala, koji nije reagovao sa  $SO_3$ , ima sposobnost vezivanja slobodnih hlorida (CIRIA, 1984.)*

# DEFORMACIJE BETONA POD UTICAJEM KRATKOTRAJNIH OPTEREĆENJA



Odnosi napon-deformacija za agregat, cementni kamen i beton

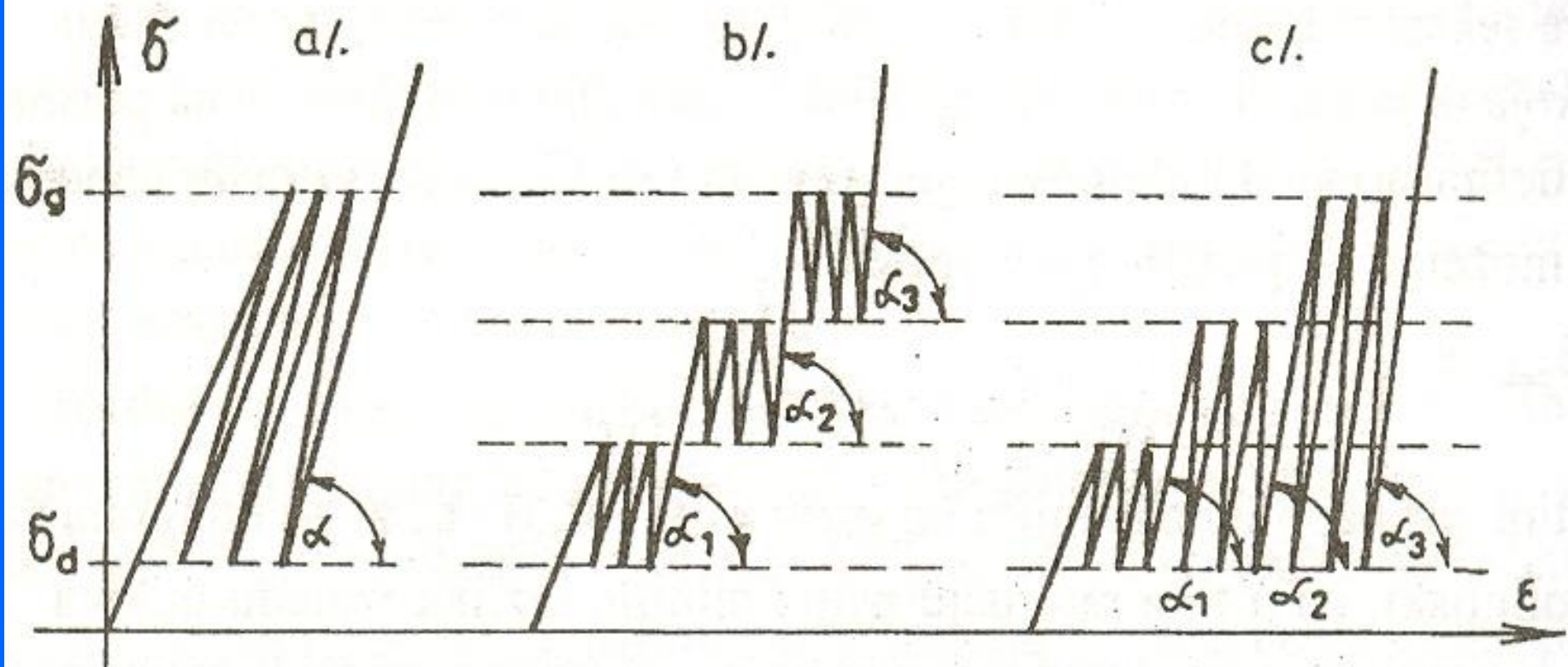
# DEFORMACIJE BETONA POD UTICAJEM KRATKOTRAJNIH OPTEREĆENJA



Slika 4.31 Radni dijagram betona.



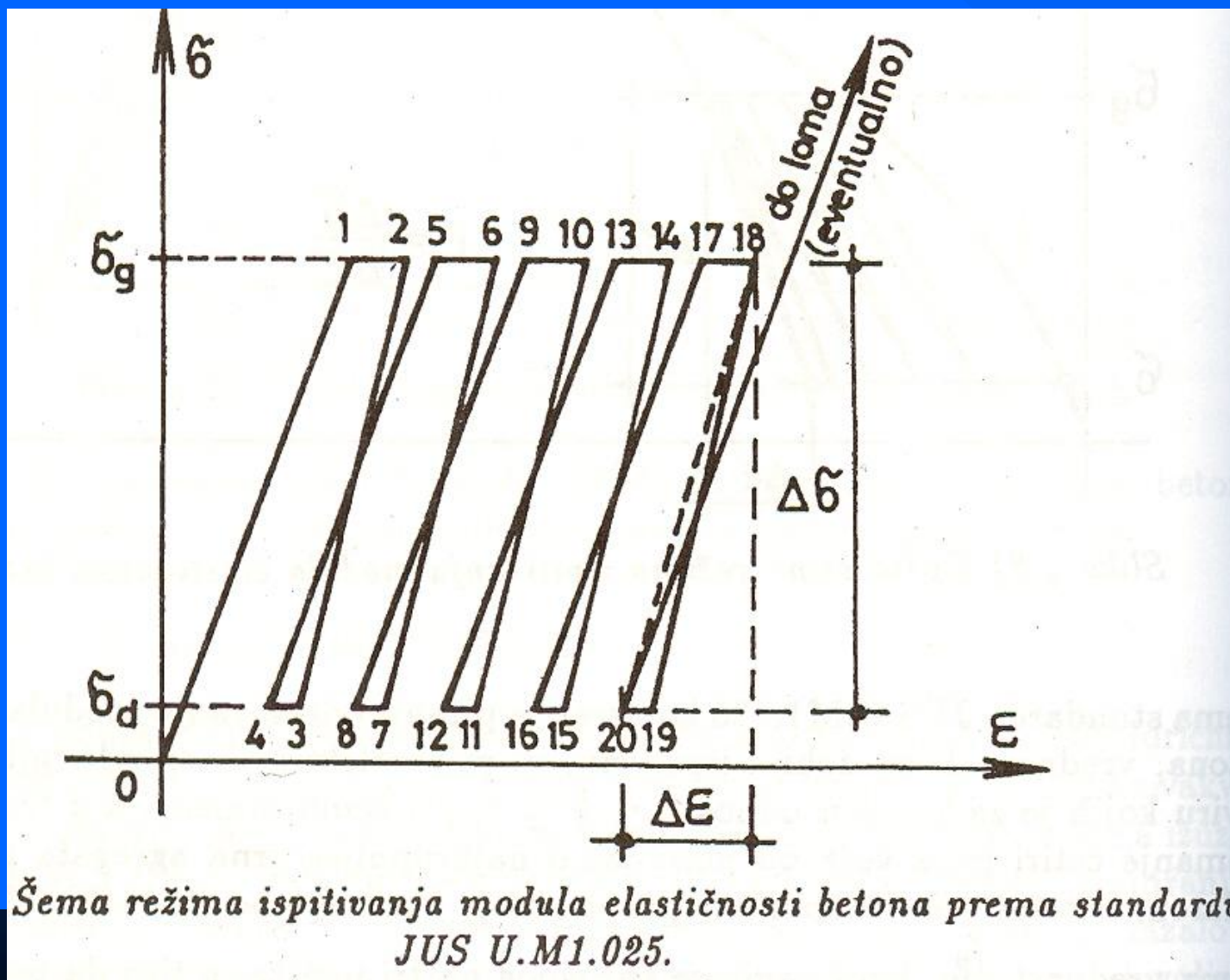
# DEFORMACIJE BETONA POD UTICAJEM KRATKOTRAJNIH OPTEREĆENJA



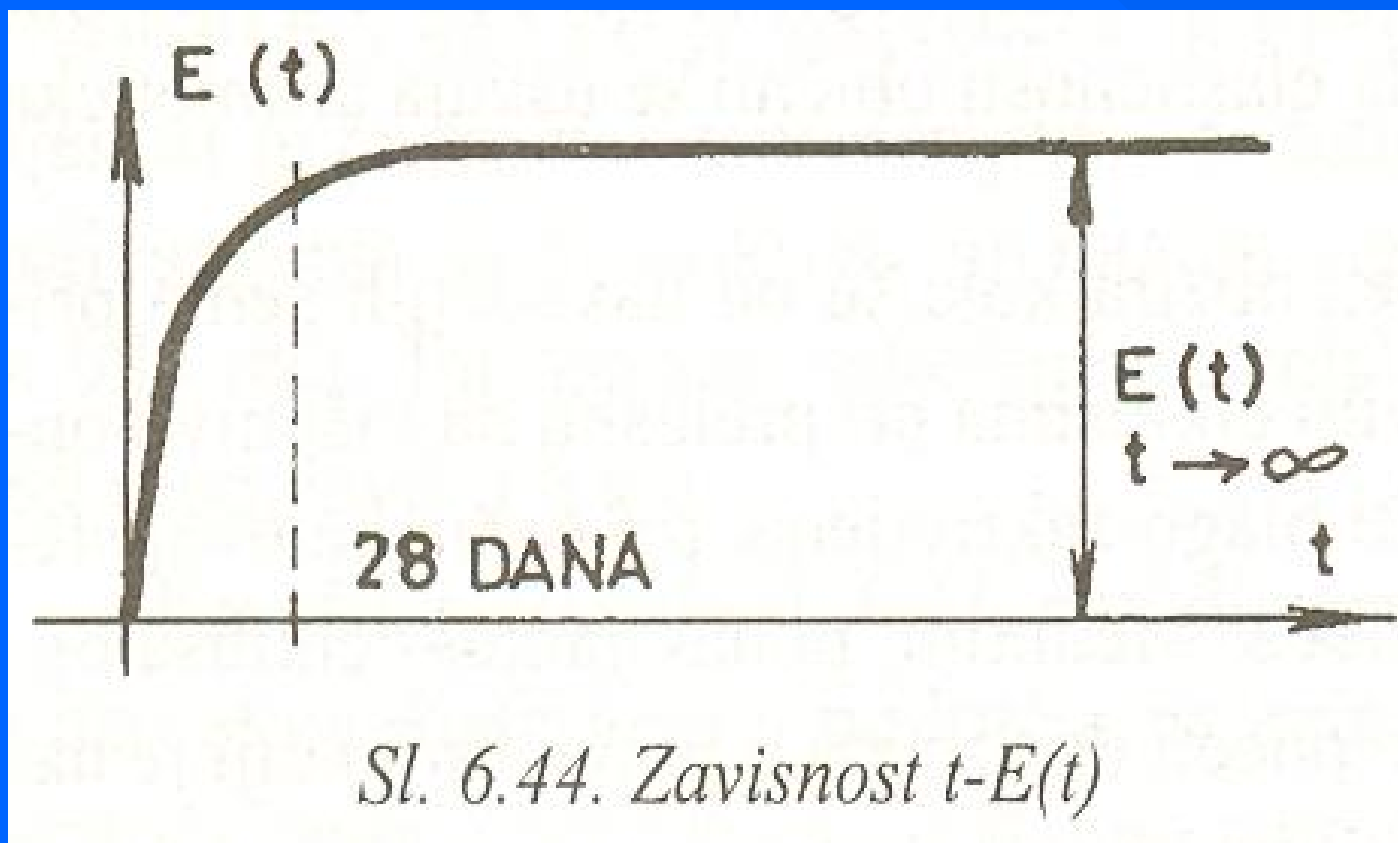
Sl. 6.42. Opšte šeme režima ispitivanja modula elastičnosti betona



# DEFORMACIJE BETONA POD UTICAJEM KRATKOTRAJNIH OPTEREĆENJA



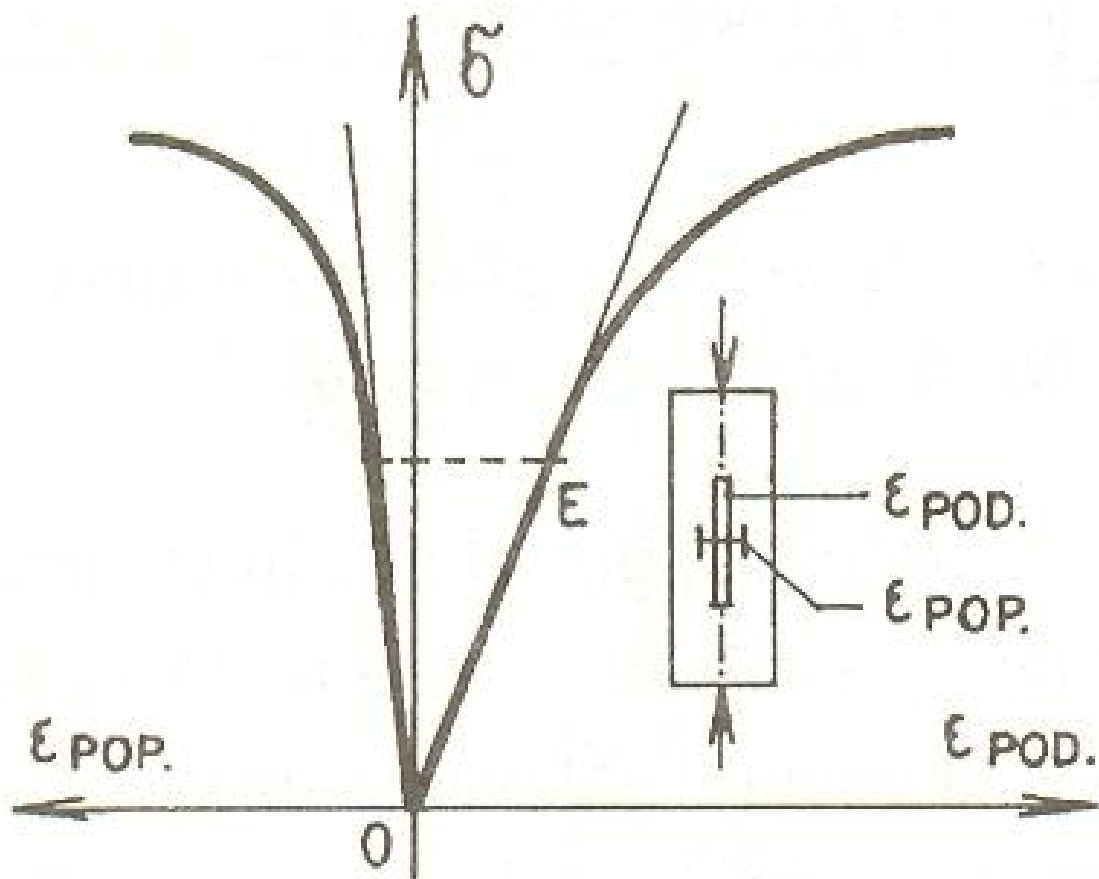
# DEFORMACIJE BETONA POD UTICAJEM KRATKOTRAJNIH OPTEREĆENJA



*Kod rešavanja praktičnih problema, za određivanje modula elastičnosti može se koristiti i empirijska zavisnost data prema Pravilniku BAB '87*

$$E = 9,25 \cdot \sqrt[3]{f_k + 10} \text{ (GPa - za } f_k \text{ u MPa)}$$

# DEFORMACIJE BETONA POD UTICAJEM KRATKOTRAJNIH OPTEREĆENJA



Sl. 6.45. Merenje podužnih i  
poprečnih deformacija

■ Iz priložnog dijagrama je lako uočiti da je u području linearne zavisnosti napona i dilatacija odnos poprečnih i podužnih dilatacija konstantan, tj.

$$\mu = \epsilon_{pop} / \epsilon_{pod} = const$$

( $\mu$  – Poasonov koeficijent)

■ Vrednost Poasonovog koeficijenta u tom području iznosi  $\mu = 0,15 - 0,25$

■ Vrednost ovog koeficijenta neposredno pred lom iznosi

$$\mu_l \approx 0,50$$

# REOLOŠKA SVOJSTVA OČVRSLOG BETONA

## ■ SKUPLJANJE BETONA

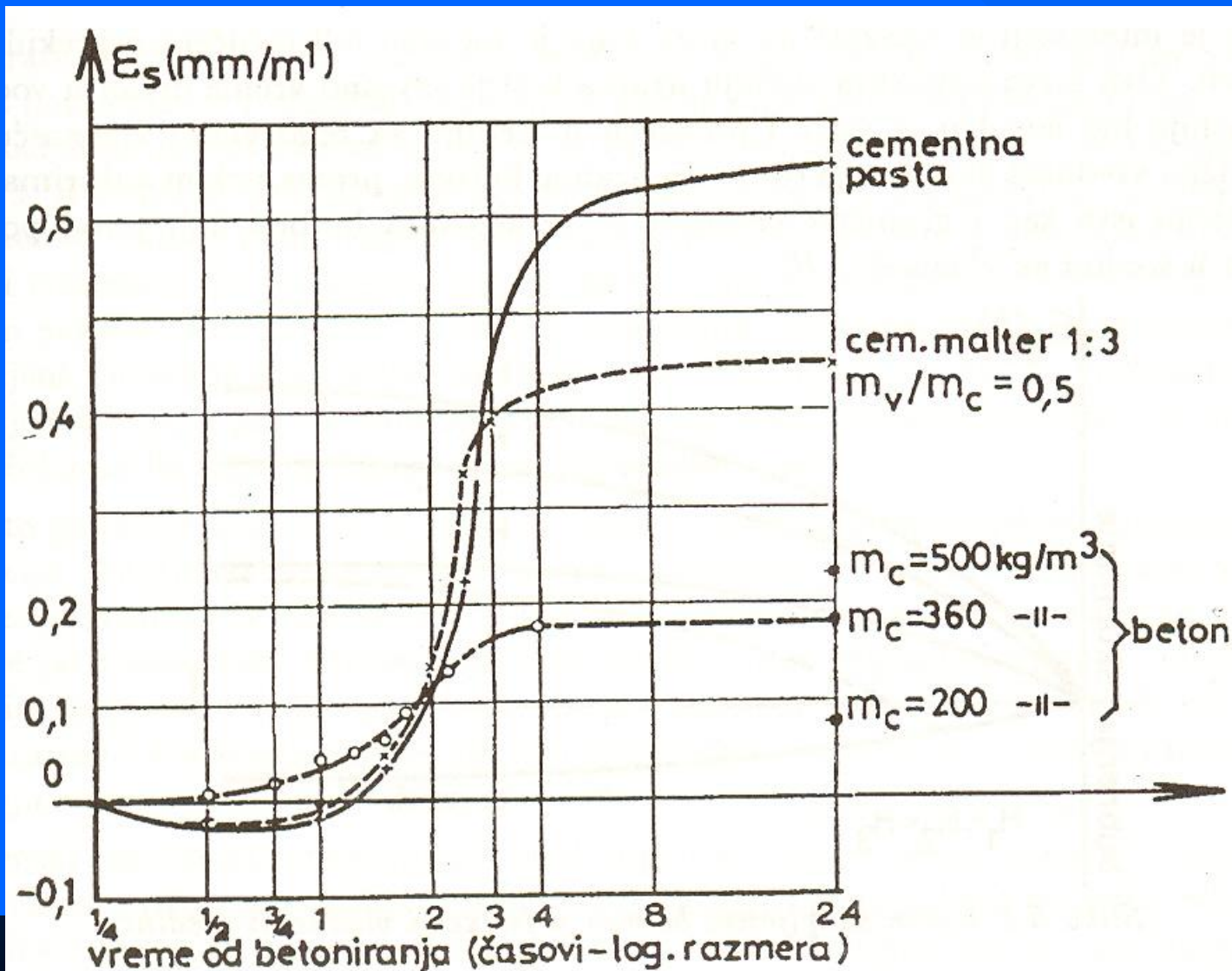
- Skupljanje usled isparavanja vode tokom perioda vezivanja cementa – plastično skupljanje,
- Skupljanje usled kontrakcije produkata hidratacije – hidrataciono skupljanje,
- Skupljanje nakon završetka procesa vezivanja cementa (skupljanje usled sušenja ili hidraulično skupljanje).

## ■ TEČENJE BETONA

## ■ RELAKSACIJA BETONA

# REOLOŠKA SVOJSTVA OČVRSLOG BETONA

## *Skupljanje betona: Plastično skupljanje*

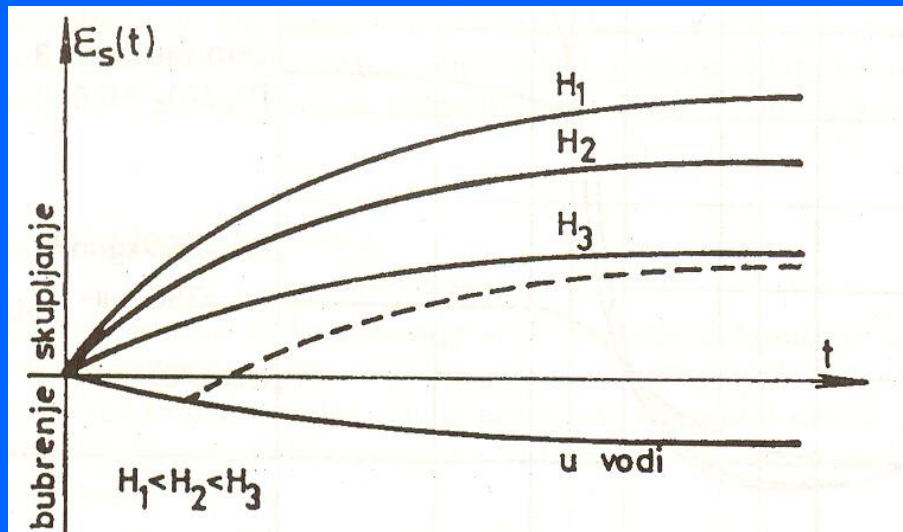


Slika 5.1 Plastično skupljanje u funkciji količine cementa.

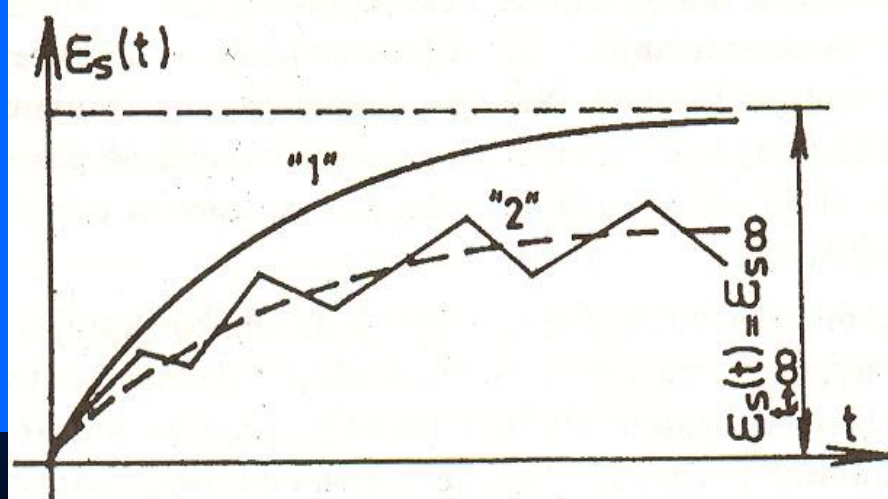


# REOLOŠKA SVOJSTVA OČVRSLOG BETONA

## Skupljanje betona: Hidrataciono i hidraulično skupljanje



Slika 5.2 Krive skupljanja betona u funkciji vlažnosti sredine.

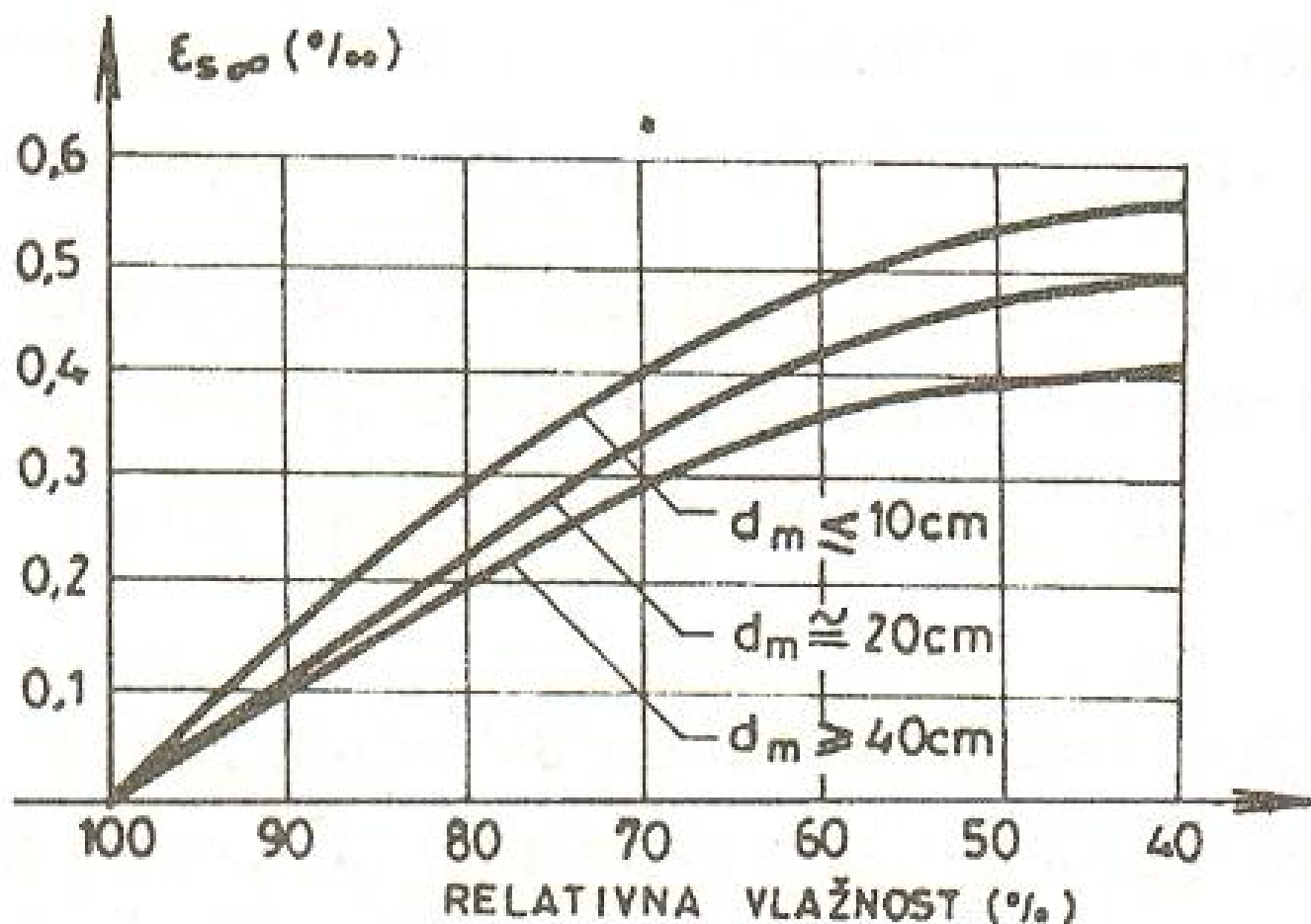


Slika 5.3 Deformacije skupljanja betona.

- *Od tri komponente skupljanja, samo dve - hidrataciono i hidraulično skupljanje - obuhvataju se (registruju) tokom postupka ispitivanja skupljanja*
- *Plastično skupljanje, koje se u potpunosti obavi tokom procesa vezivanja cementa u betonuu, ne može biti obuhvaćeno ovim standardnim postupkom ispitivanja – videti u nastavku “Ispitivanje skupljanja”*

# REOLOŠKA SVOJSTVA OČVRSLOG BETONA

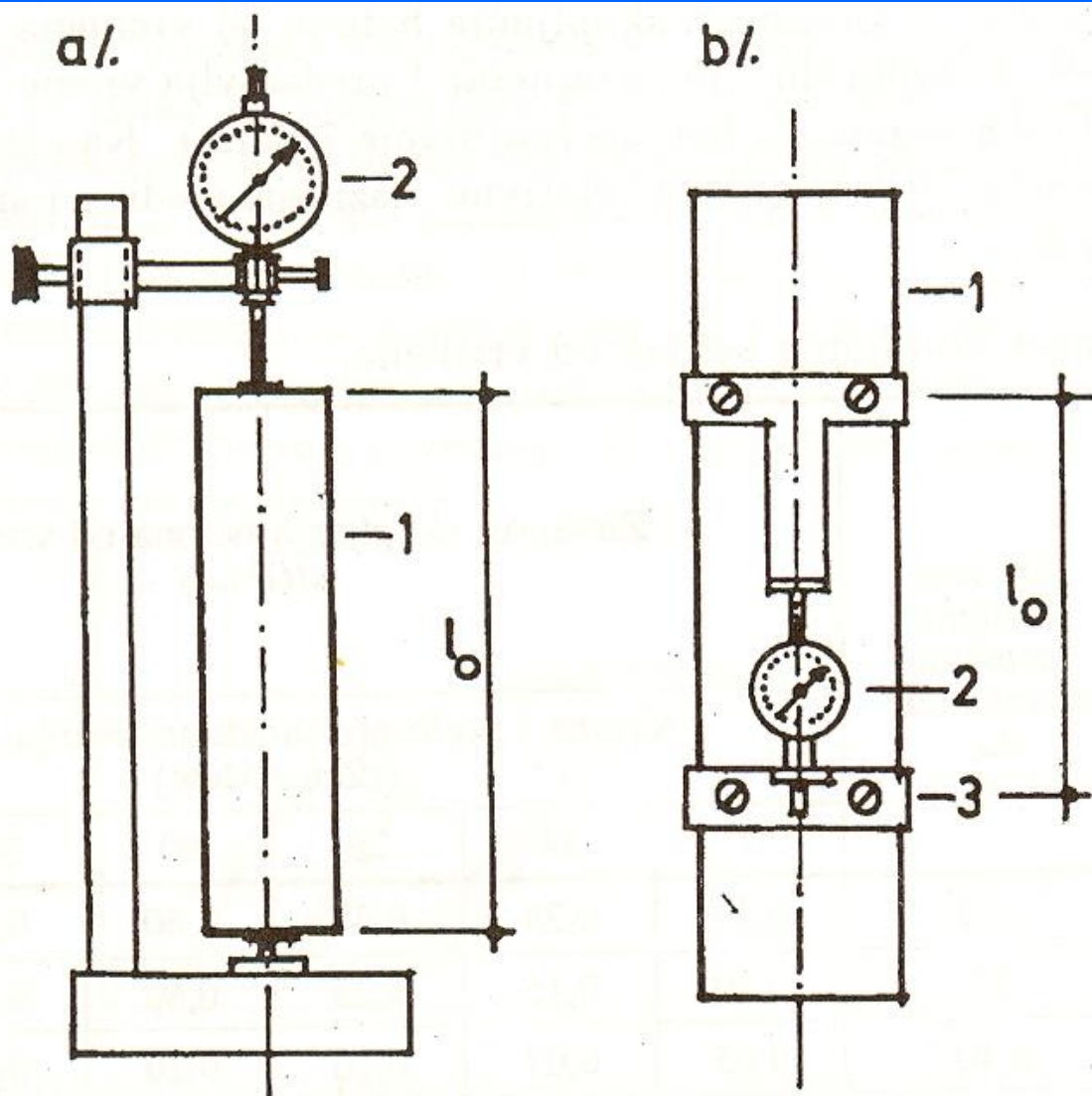
## *Skupljanje betona*



*Sl. 6.47. Zavisnost skupljanja betona od dimenzija elemenata*

# REOLOŠKA SVOJSTVA OČVRSLOG BETONA

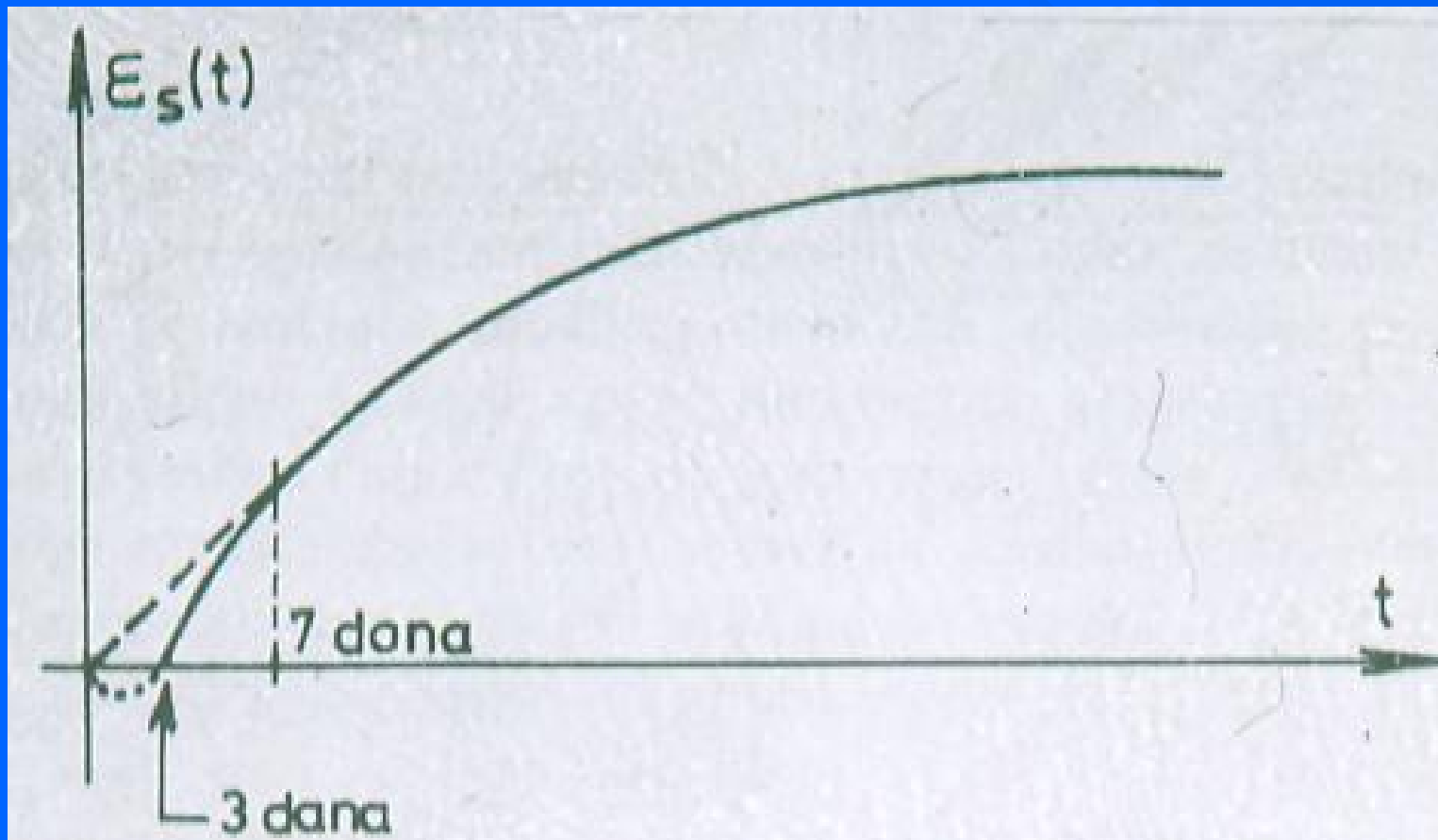
## *Skupljanje betona: Ispitivanje*



Slika 5.5 Merenje skupljanja betona.

- Ispitivanje skupljanja vrši se na prizmatičnim ili cilindričnim uzorcima, kod kojih je  $h/d = 2 - 4$  (min 3 uzorka).
- Nakon izrade i vađenja iz kalupa (24 h nakon izrade) uzorci se stavjaju u pijaću vodu, gde stoje 48 h.
- Posle vađenja iz vode (72 h nakon izrade) uzorci se dalje drže u kondicioniranim uslovima:  $T=20^{\circ}\text{C}$ ,  $H=40, 70$  ili  $90\%$ .
- Prvo očitavanje, prema tome, vrši se na 72 h, zatim na 4 dana, na 7, 14, 21 i 28 dana i dalje jednom mesečno (najmanje 3 meseca).

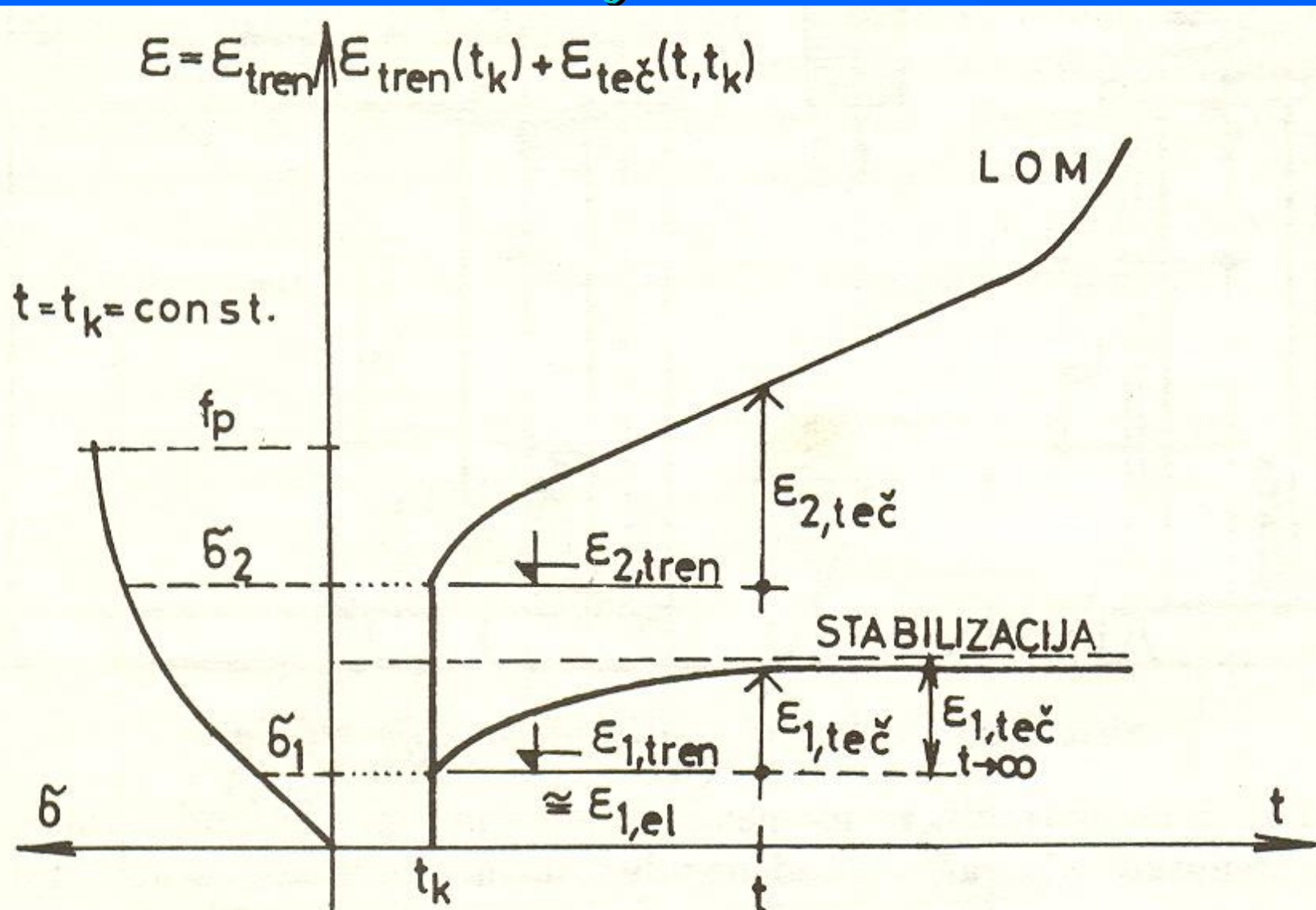
# REOLOŠKA SVOJSTVA OČVRSLOG BETONA *Skupljanje betona: Ispitivanje*



*Prva 3 dana, dok uzorci stoje u vodi, beton ima izvesno bubrenje  
(koje ostaje neregistrovano)*

# REOLOŠKA SVOJSTVA OČVRSLOG BETONA

## *Tečenje betona*

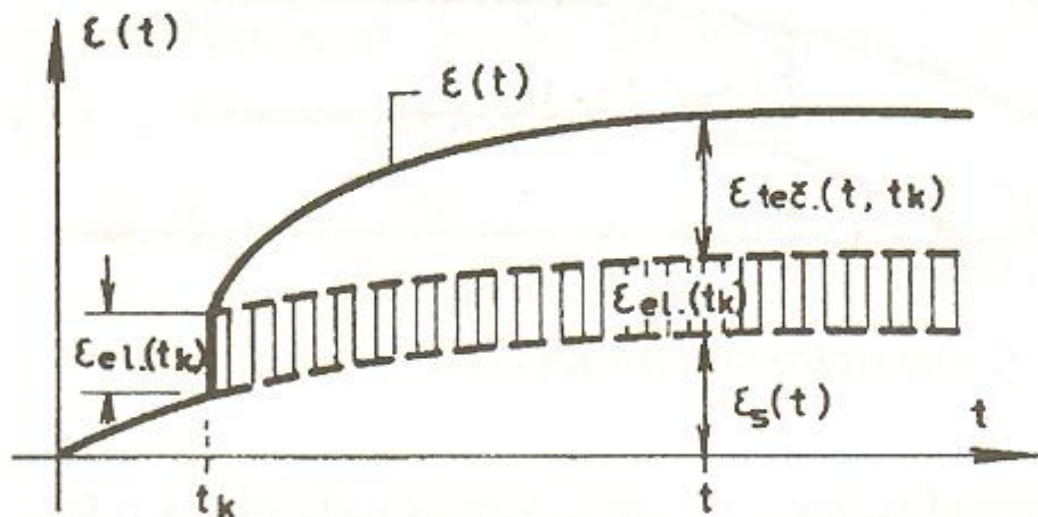


Slika 5.11 Krive tečenja za različite vrednosti napona.

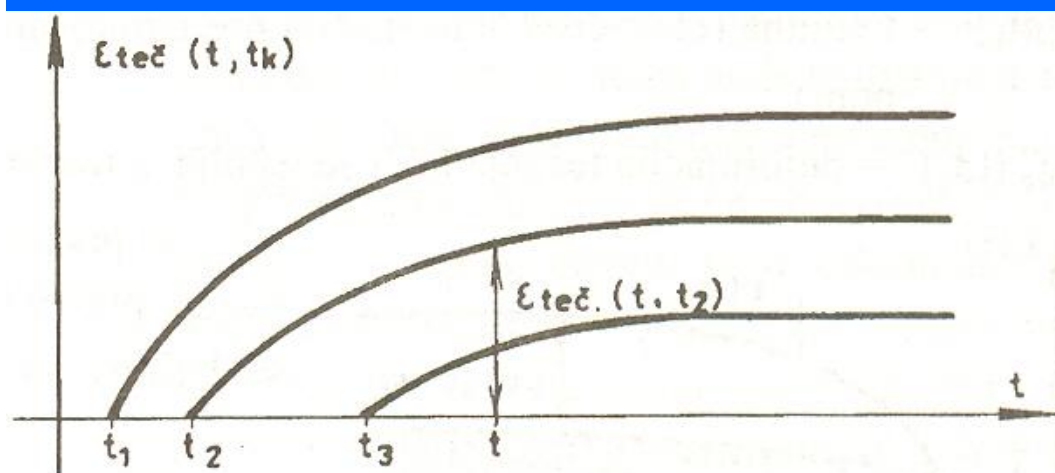


# REOLOŠKA SVOJSTVA OČVRSLOG BETONA

## *Tečenje betona*



Sl. 6.49. Vremenske deformacije betona



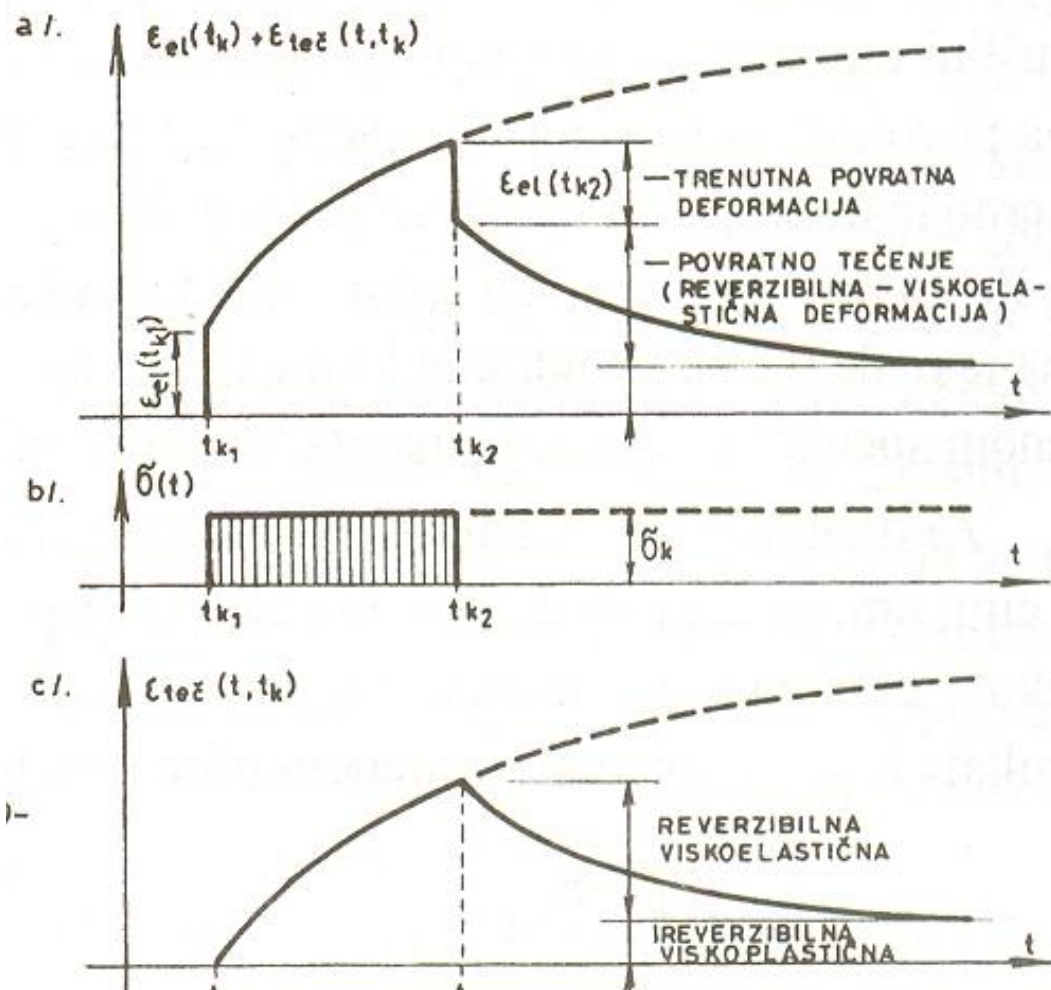
Sl. 6.51. Krive deformacija tečenja betona

$$\varepsilon_{teč}(t, t_k) = \varepsilon(t) - \varepsilon_s(t) - \varepsilon_{el}(t_k),$$

$$\varphi(t, t_k) = \frac{\varepsilon_{teč}(t, t_k)}{\varepsilon_{el}(t_k)}$$

# REOLOŠKA SVOJSTVA OČVRSLOG BETONA

## *Tečenje betona*

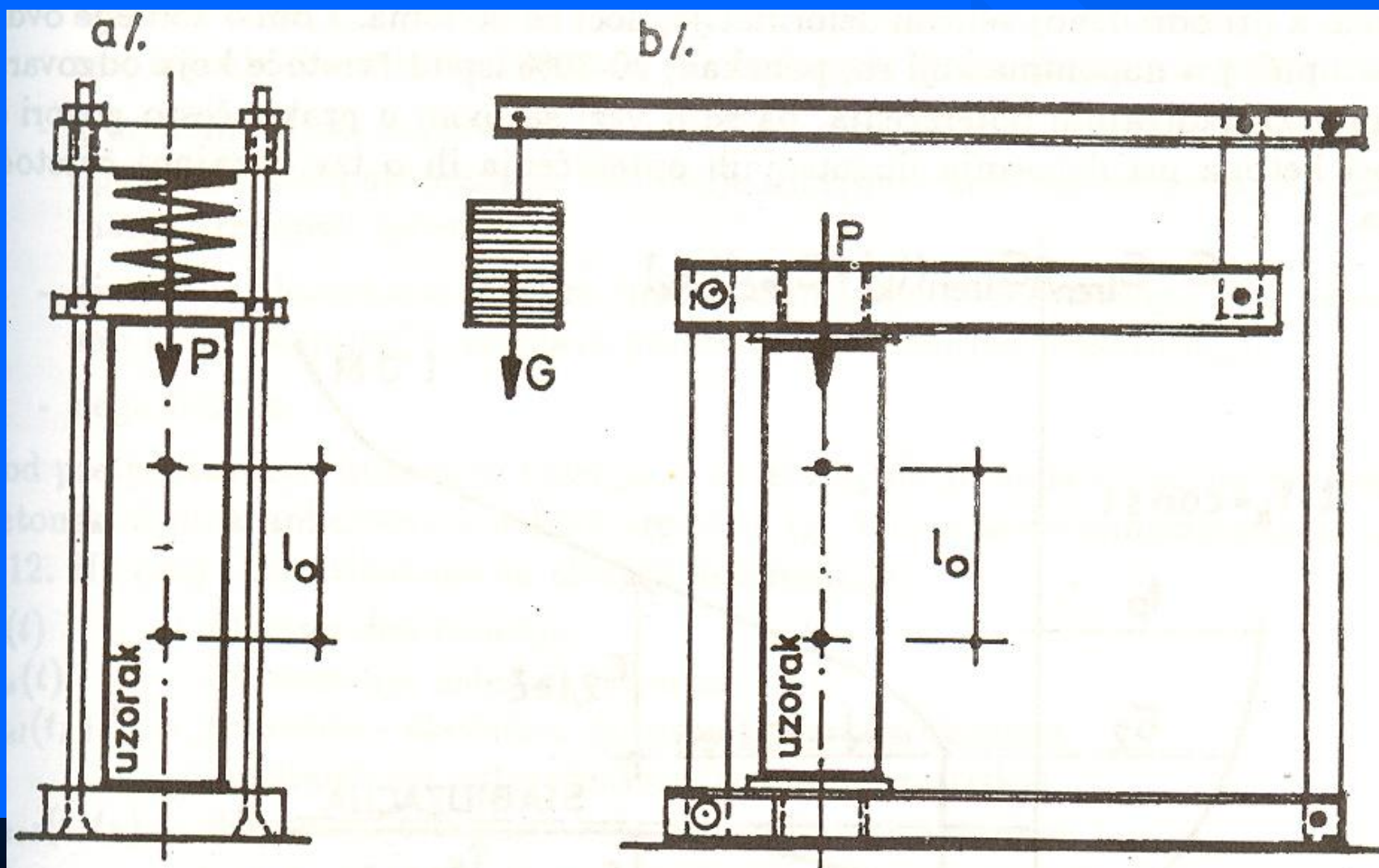


*Elastične i vremenske deformacije betona pri rasterećenju*

$$\varepsilon_{el}(t_{k1}) = \frac{\sigma_k}{E(t_{k1})}, \quad \text{a} \quad \varepsilon_{el}(t_{k2}) = \frac{\sigma_k}{E(t_{k2})}$$

# REOLOŠKA SVOJSTVA OČVRSLOG BETONA

## *Tečenje betona*



Slika 5.10 Uredaji za ispitivanje tečenja betona.

# ISPITIVANJE BETONA BEZ RAZARANJA

## *Uvodne napomene*

- *Kao što je naglašeno u opštem delu (G. Materijali 1), za primenu ovih metoda od najvećeg je značaja definisanje pouzdanih zavisnosti između merenih fizičkih veličina odabranom metodom i svojstva materijala koje se želi ispitati*
- *Ove zavisnosti dobijaju se paralelnim ispitivanjem bez razaranja (najčešće na gotovim konstrukcijama) i laboratoriskim ispitivanjem željenog svojstva betona sa razaranjem, na posebnim uzorcima*
- *Uzorci (“etalonski uzorci”) ili se posebno za tu svrhu izrađuju od svežeg betona, ili se, što je češći slučaj, vade iz ispitivane konstrukcije po okončanju nedestruktivnog ispitivanja i odgovarajuće statističke obrade dobijenih rezultata*

# ISPITIVANJE BETONA BEZ RAZARANJA

## *Uvodne napomene*

- *Matematičko definisanje funkcionalnih zavisnosti najčešće se sprovodi primenom metode najmanjih kvadrata, pri čemu kao merilo ostvarene tačnosti aproksimacije sračunava koeficijent korelacije  $r^2$  ili “relativna srednja devijacija”  $S_{no}$ :*

$$S_{no} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n_0} \left( \frac{S_{fi} - S_i}{S_{fi}} \right)^2}{n_0}} \cdot 100 \quad (\%)$$

- *Za dobijanje pouzdanih zavisnosti, razume se, potreban je veći broj ovakvih uzoraka, u zavisnosti od veličine ispitivanog elementa ili konstrukcije i značaja samog ispitivanja*



# ISPITIVANJE BETONA BEZ RAZARANJA

## *Metoda ultrazvuka*

- *Ova metoda, zajedno sa metodom sklerometra, spada u dve najviše primenjivane metode za definisanje čvrstoće pri pritisku betona (“naknadno dokazivanje marke betona”)*
- *Osim za ispitivanje čvrstoće, metoda ultrazvuka se vrlo uspešno primenjuje za definisanje dinamičkog modula elastičnosti i u defektoskopiji betona*
- *Za ispitivanje čvrstoće najčešće se koriste predajnici ultrazvučnih impulsa frekvencije 50-150 kHz. Kako je brzina ultrazvuka u funkcija zapreminske mase, odnosno ostvarene kompaktnosti betona, to se ona kod betona kreće u dosta širokim granicama, 2000-5000 m/s. Smatra se da je brzina  $v=3500$  m/s donja granica brzine za kvalitetne betone*
- *Čvrstoća betona će po pravilu biti veća kod betona veće kompaktnosti (manje poroznosti). Ovo pravilo, međutim, važi samo ako postoji zadovoljavajuća adhezija između cementnog kamena i zrna agregata. Ukoliko ovaj uslov nije ispunjen, mogu se dobiti i vrlo niske čvrstoće betona i pri relativno visokim brzinama ultrazvuka*

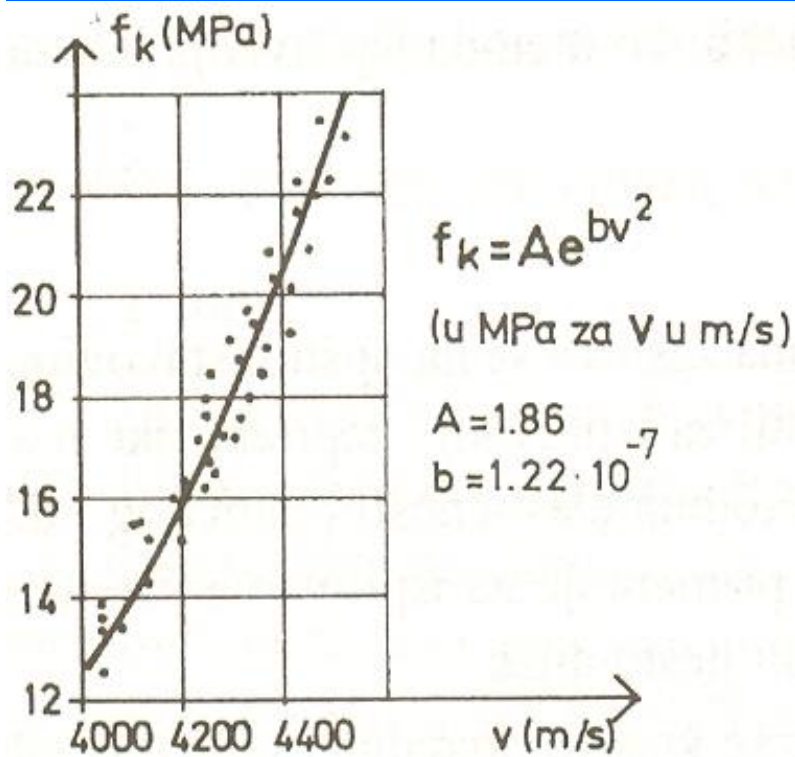
# ISPITIVANJE BETONA BEZ RAZARANJA

## Metoda ultrazvuka

- *Osim slabe athezije između cementnog kamena i zrna agregata, koja na brzinu ultrazvuka nema uticaja, brzina ultrazvuka takođe ne može da registruje veće čvrstoće u slučaju primene cementa viših klasa*
- *Iz tog razloga, za definisanje zavisnosti brzina-čvrstoća:  $f_p = f_p(v)$ , u slučaju kada se ne zna pouzdano koji je cement primenjen u konkretnom slučaju, bolje je uzorke uzimati vađenjem iz konstrukcije (kernovi), nego primenjivati unapred utvrđene tzv. “kalibracione krive”, dobijene od posebno izrađenih uzoraka*
- *Oblici funkcije  $f_p = f_p(v)$  mogu da budu različiti, kao:*
  - $f_p(v) = a_1 \cdot v^2 + a_2 \cdot v + a_3$  (1),
  - $f_p(v) = a \cdot v^b$  (2),
  - $f_p(v) = a \cdot e^{b \cdot v}$  (3) i drugi
- *U najvećem broju slučajeva ispitivanja u praksi, eksponencijalna funkcija oblik (3), čini se, daje najbolje rezultate (v. i sled,. slajd)*

# ISPITIVANJE BETONA BEZ RAZARANJA

## *Metoda ultrazvuka*



Slika 7.3 Ultrazvučna aparatura PUNDIT.

*Kod zavisnosti  $f_k$ - $v$   
eksponencijalna funkcija  
obično daje najbolje rezultate*

*Danas svakako najšire primenjivana  
ultrazvučna aparatura je upravo  
engleska aparatura "PUNDIT"*

# ISPITIVANJE BETONA BEZ RAZARANJA

## *Metoda rezonantne frekvencije*

- *Ova metoda najviše se primenjuje za određivanje dinamičkog modula elastičnosti  $E_D$ , ali se isto tako može primeniti i za određivanje čvrstoće  $f_p$ , zapreminske mase  $\gamma$  i dr.*
- *U slučaju određivanja dinamičkog modula elastičnosti betona  $E_D$ , meri se najčešće frekvencija longitudinalnih oscilacija prizmatičnih i cilindričnih uzoraka, kada se vrednost  $E_D$  sračunava iz izraza:*

$$E_D = 4f^2 l^2 \gamma \cdot 10^{-6} \quad (\text{u MPa, za } f \text{ u 1/s, } l \text{ u m i } \gamma \text{ u kg/m}^3)$$

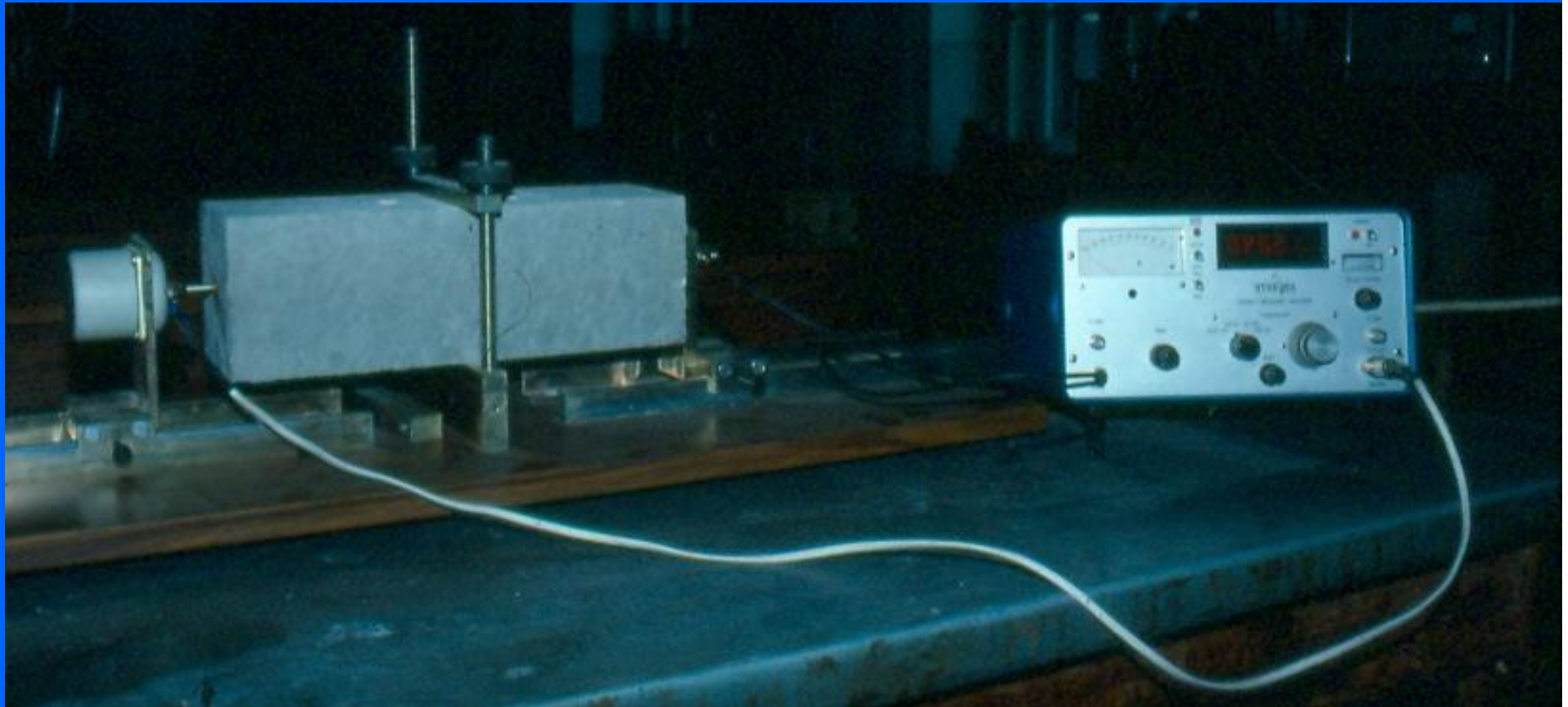
- *U datom izrazu  $f$  je izmerena rezonantna frekvencija,  $l$  dužina prizme ili visina cilindra, a  $\gamma$  zapreminska masa betona izmerena na uzorku (dispozicija za ovo ispitivanje prikazana je na sledećem slajdu). Statički modul elastičnosti  $E$ , u odnosu na koji je vrednost  $E_D$  veća za 20 do 30%, tada se sračunava iz izraza:*

$$E = 1,25E_D - 19 \quad (\text{MPa})$$



# ISPITIVANJE BETONA BEZ RAZARANJA

## *Metoda rezonantne frekvencije*



*Dispozicija za ispitivanje rezonantne frekvencije*

- *Postolje za koje je pričvršćena prizma koja se izlaže vibracijama (levo),*
- *“Kutija” sa oscilatorom, analognim indikatorom maksimalne amplitude oscilacija i digitalnim displejom za očitavanje rezonantne frekvencije  $f$  (desno)*



# ISPITIVANJE BETONA BEZ RAZARANJA

## *Metode merenja površinske tvrdoće*

- *Kao što je napred navedeno, ova metoda, kao i metoda ultrazvuka, najšire se primenjuje kod ispitivanja betona*
- *Merenjem površinske tvrdoće na principu otkoka (sklerometar – Šmitov čakić), na vrlo jednostavan način se (uz definisanje zavisnosti površinska tvrdoća – čvrstoća) može odrediti čvrstoća pri pritisku na velikom broju mernih mesta u konstrukciji*
- *Definisanje zavisnosti površinska tvrdoća – čvrstoća ima nedostataka, ali se i pored toga, zbog jednostavnosti merenja površinske tvrdoće, najviše primenjuju za ispitivanje čvrstoće pri pritisku betona na licu mesta, u konstrukciji*
- *Glavni nedostaci ove metode vezani su za činjenicu da se merenja vrše na površinama elemenata, gde beton, u opštem slučaju, ima nižu čvrstoću nego masa betona u unutrašnjosti, iz sledećih razloga (v. sledeći slajd):*

# ISPITIVANJE BETONA BEZ RAZARANJA

## *Metode merenja površinske tvrdoće*

- *Usled neizbežnog efekta zida,*
- *Usled nemogućnosti dobrog vibriranja svežeg betona u relativno tankim, zaštitnim slojevima betona između armature i oplata*
- *Usled slabije nege, koja se po pravilu sprovodi kvašenjem površina betonskih elemenata*
- *Jedan od nedostataka je i velika disperzija rezultata od jednog do drugog mesta očitavanja, ali se taj nedostatak lako eliminiše, očitavanjem na većem broju mesta (20-25), u okviru unapred pripremljene ortogonalne mreže, za svako merno mesto na ispitivanom elementu u konstrukciji. Ovako dobijen rezultat ispitivanja, definiše se kao “indeks sklerometra”*
- *Ova metoda je, zajedno sa metodom ultrazvuka, domaćim standardom JUS U.M1.048, usvojena kao zvanična metoda za naknadno definisanje čvrstoće betona, tj. za ocenu marke betona MB, u gotovim konstrukcijama (u kombinaciji sa destruktivnim ispitivanjem kocki – primena kalibracione krive)*

# ISPITIVANJE BETONA BEZ RAZARANJA

## *Metode merenja površinske tvrdoće*

- Za određivanje čvrstoće pri pritisku, na osnovu merenja površinske tvrdoće betona, kod nas se najčešće koriste dve metode:
  - Metoda HPS, koja predstavlja poznatu Brinelovu metodu za ispitivanje čelika, modifikovanu za potrebe ispitivanja površinske tvrdoće, odnosno čvrstoće pri pritisku, betona. Postupak se bazira na merenju prečnika otiska kuglice ( $\Phi 10$  mm), aplicirane određenim udarnim radom aparature. U praksi se ređe primenjuje, zbog teškoće tačnog merenja prečnika otiska na površini betona (krunjenje po obodu),
  - Metoda Šmitovog čekića (sklerometra), koja se zasniva na merenju veličine elastičnog otkoka udarne mase, koja se nalazi u sastavu primenjene aparature. Ovaj drugi postupak u praksi se mnogo češće primenjuje, nego metoda HPS).

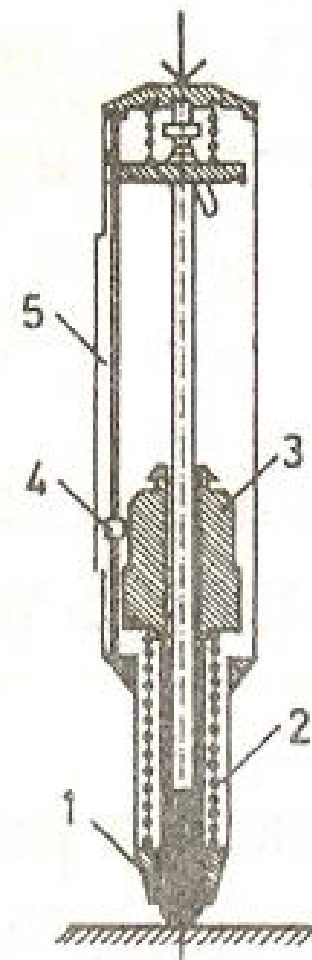
# ISPITIVANJE BETONA BEZ RAZARANJA

## *Metode merenja površinske tvrdoće*

- *Fotografija aparature tipa “Proceq” sa automatskim pisačem (levo),*
- *Skica podužnog preseka aparature (desno)*



*Na slici desno: 1 – udarni valjak, 2 – udarna opruga, 3 – udarna masa, 4 – strelica na skali (5), koja se nalazi na spoljnoj strani aparature (kod aparature sa pisačem, ova strelica beleži visinu otkoka na posebnom papiru)*

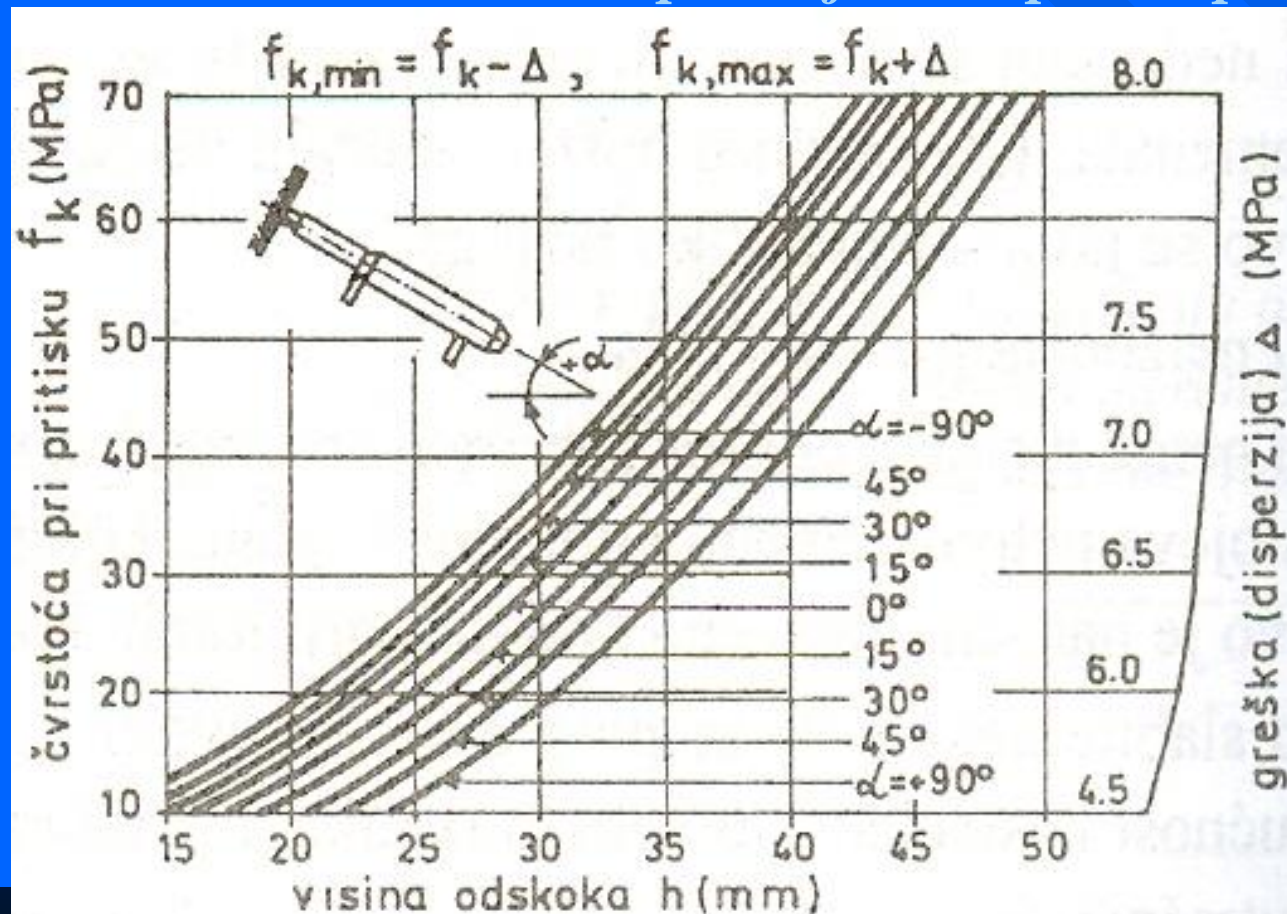




# ISPITIVANJE BETONA BEZ RAZARANJA

## *Metode merenja površinske tvrdoće*

- *Dijagram (proizvođača) za određivanje čvrstoće pri ritisku, u zavisnosti od “indeksa sklerometra” i položaja ose aparata pri merenju*

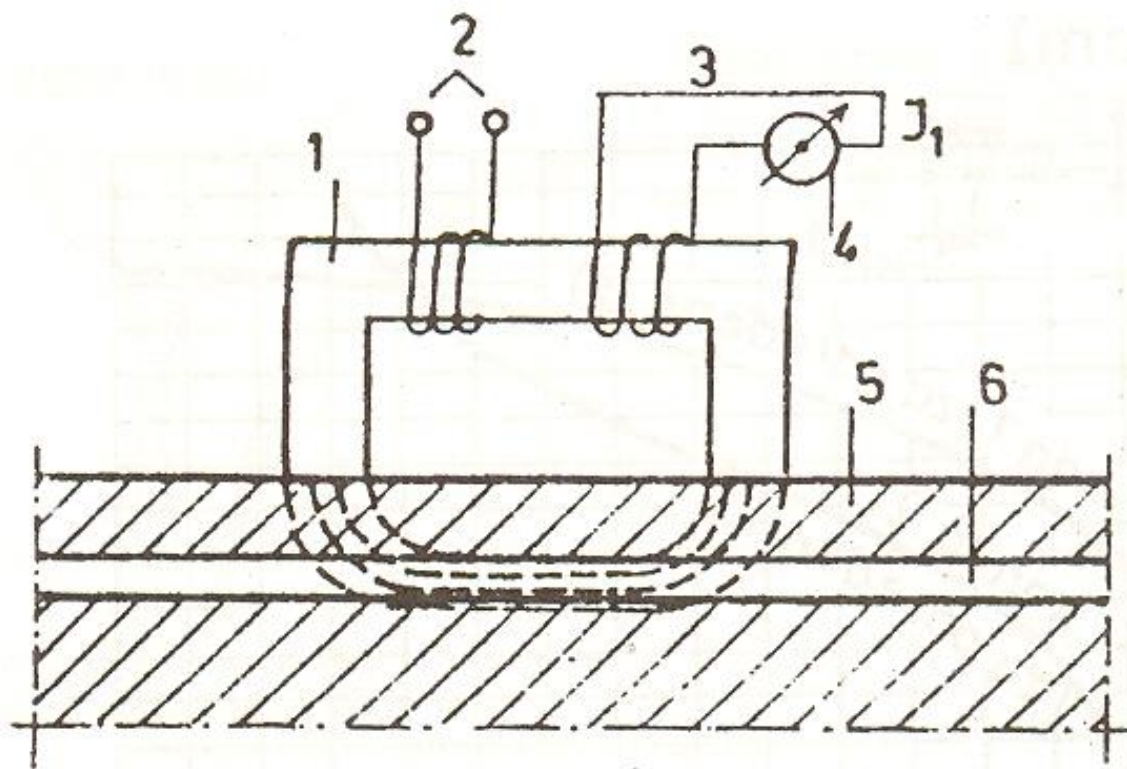


Sl. 56. Zavisnost  $h-f_k$



# ISPITIVANJE BETONA BEZ RAZARANJA

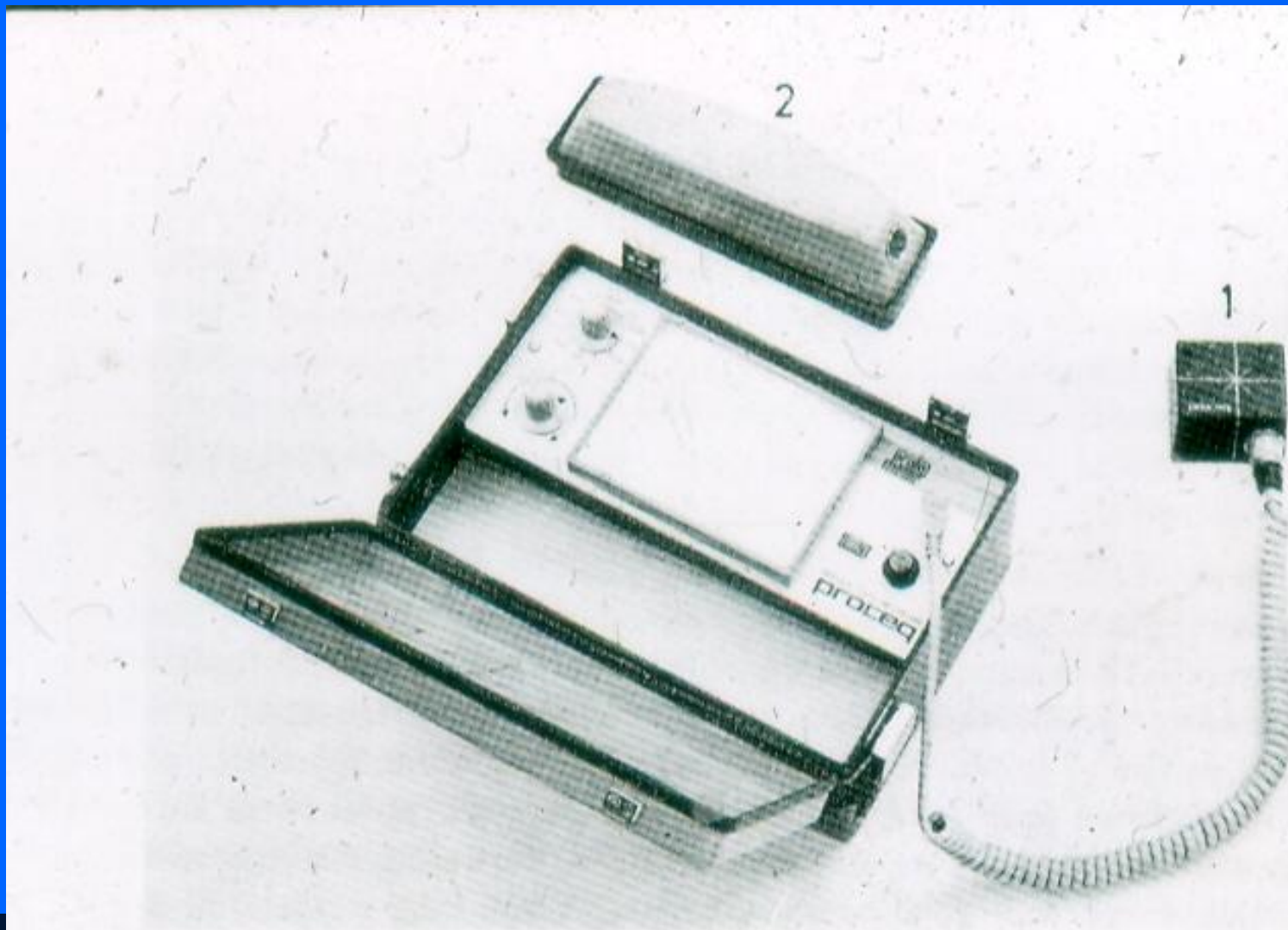
## *Magnetne metode*



*Slika 7.13 Šema aparature za detekciju armature magnetnom metodom.*

# ISPITIVANJE BETONA BEZ RAZARANJA

## *Magnetne metode*



*Slika 7.14 Aparatura za detekciju armature pod nazivom "Profometer"*

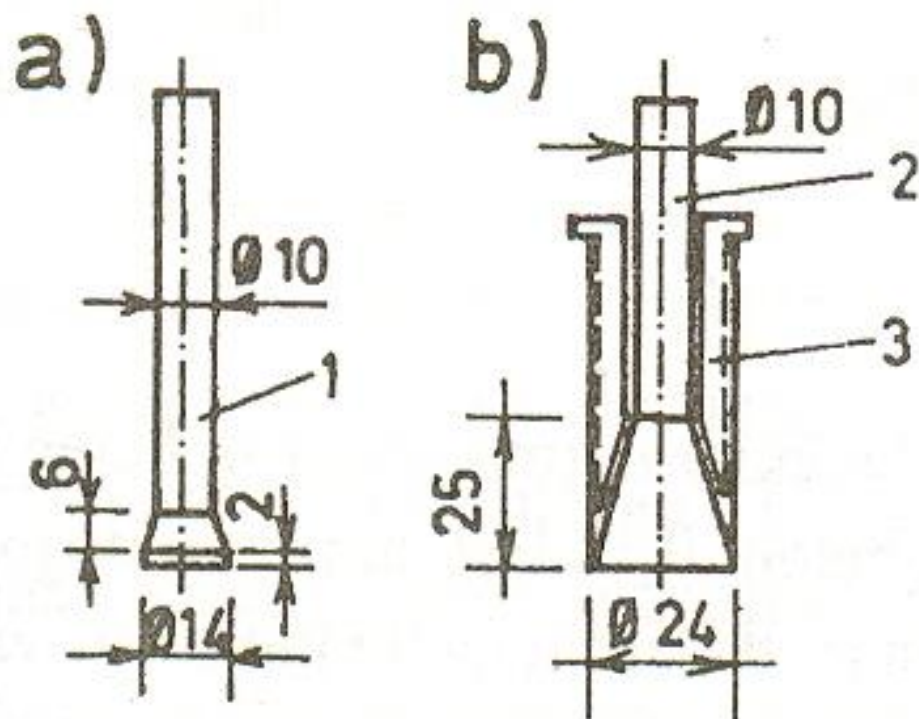
# ISPITIVANJE BETONA BEZ RAZARANJA

## *Metode lokalne destrukcije*

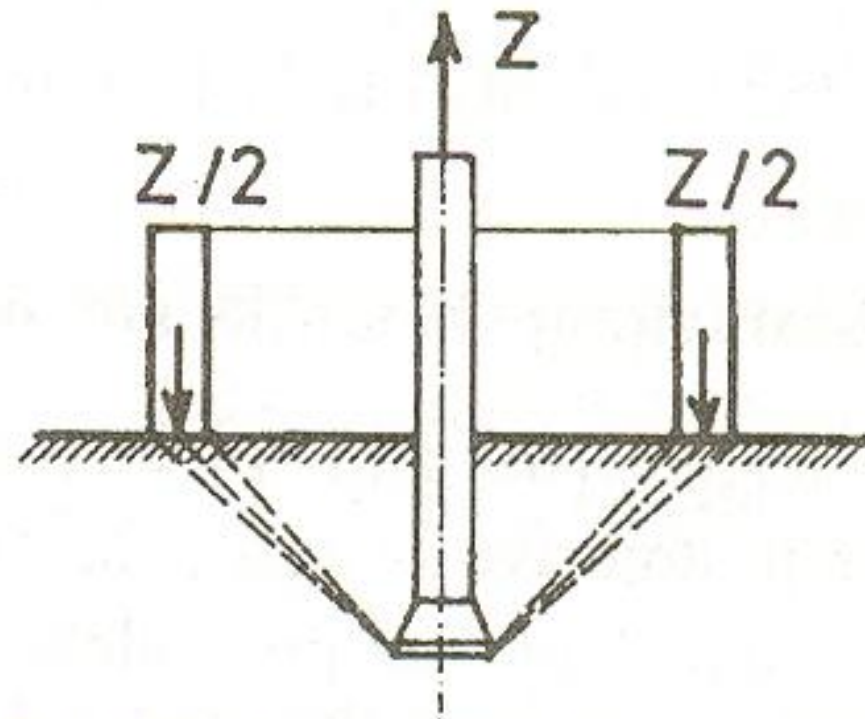
- *Postoji veći broj metoda za ocenu čvrstoće betona koje se zasnivaju na merenju sile, potrebne da se sa površine betonskog elementa “otkine” komad betona određene veličine*
- *Jedan od takvih postupaka, koji je poznat pod imenom “Pulaut” (Pool Out), prikazan je dvema skicama na narednom slajdu*
- *Ankeri mogu biti ubetonirani u element (slika levo pod “a”) ili kasnije, kada beton očvrsne, ubacivanjem u izbušenu rupu na površini elementa (slika levo pod “b”)*
- *Specijalnim uređajem za apliciranje i očitavanje opterećenja se zatim ovakav anker čupa, zajedno sa delom betona, kako pokazuje skica desno. Na bazi paralelnih ispitivanja može se definisati zavisnost između sile čupanja  $Z$  i čvrstoće pri pritisku betona  $f_k$ :  $f_k = f_k(Z)$*

# ISPITIVANJE BETONA BEZ RAZARANJA

## *Metode lokalne destrukcije*



Sl. 6.58. Ankeri za čupanje iz betona

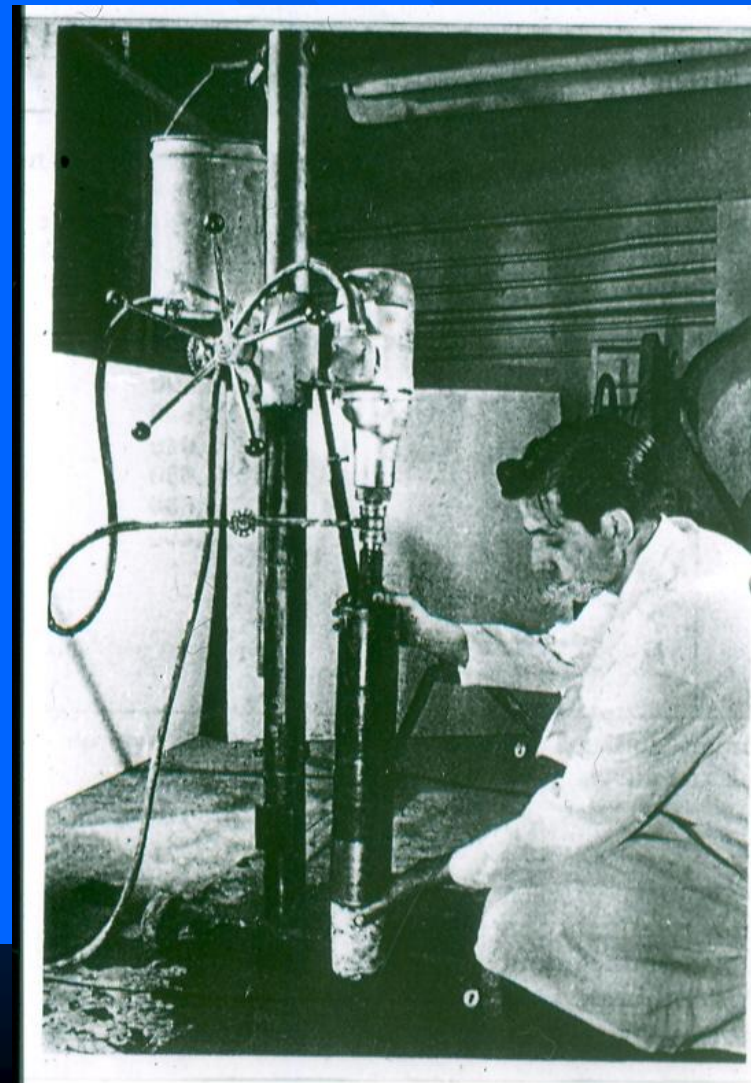
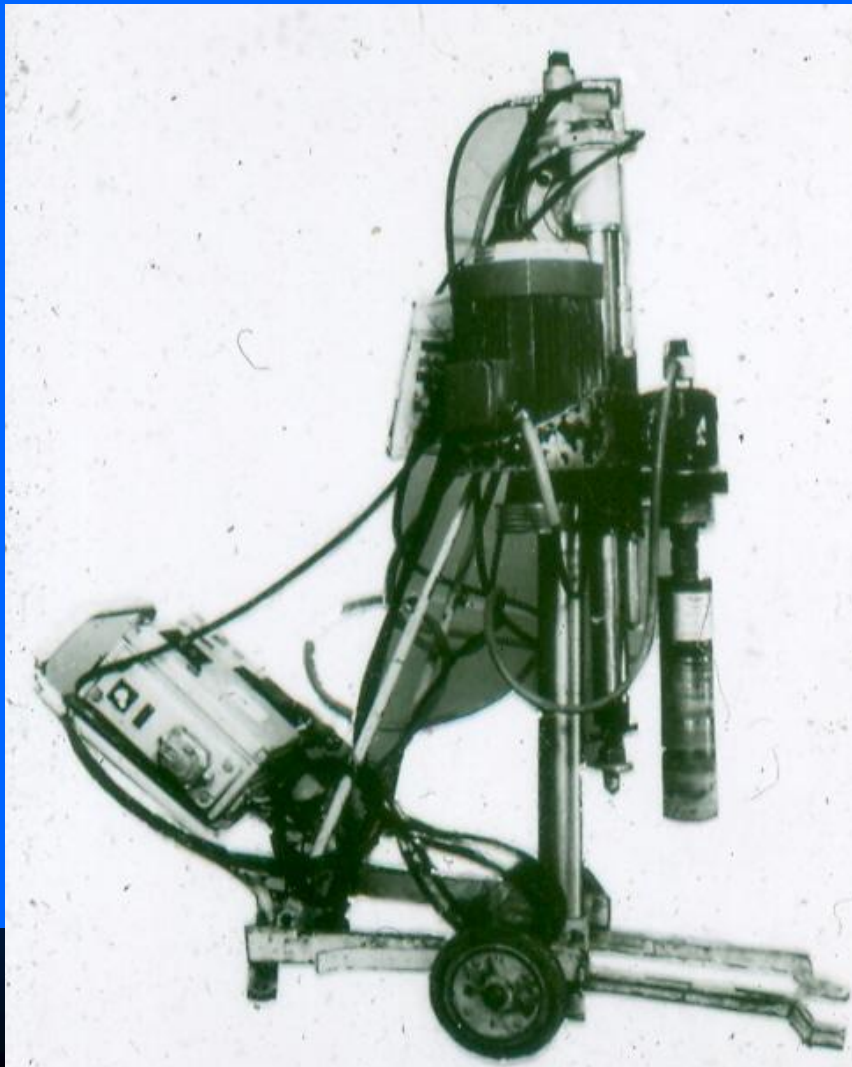


Sl. 6.59. Princip "pulaut" metode



# ISPITIVANJE BETONA SA RAZARANJEM

*Električna bušaća garnitura (levo) i vađenje izbušenog cilindra (kerna) iz betonske ploče (desno)*





# ISPITIVANJE BETONA SA RAZARANJEM

## *Mala električna bušéa garnitura*





# ISPITIVANJE BETONA SA RAZARANJEM

## *Mala električna bušeca garnitura*

