

SMIČUĆA ČVRSTOĆA TLA

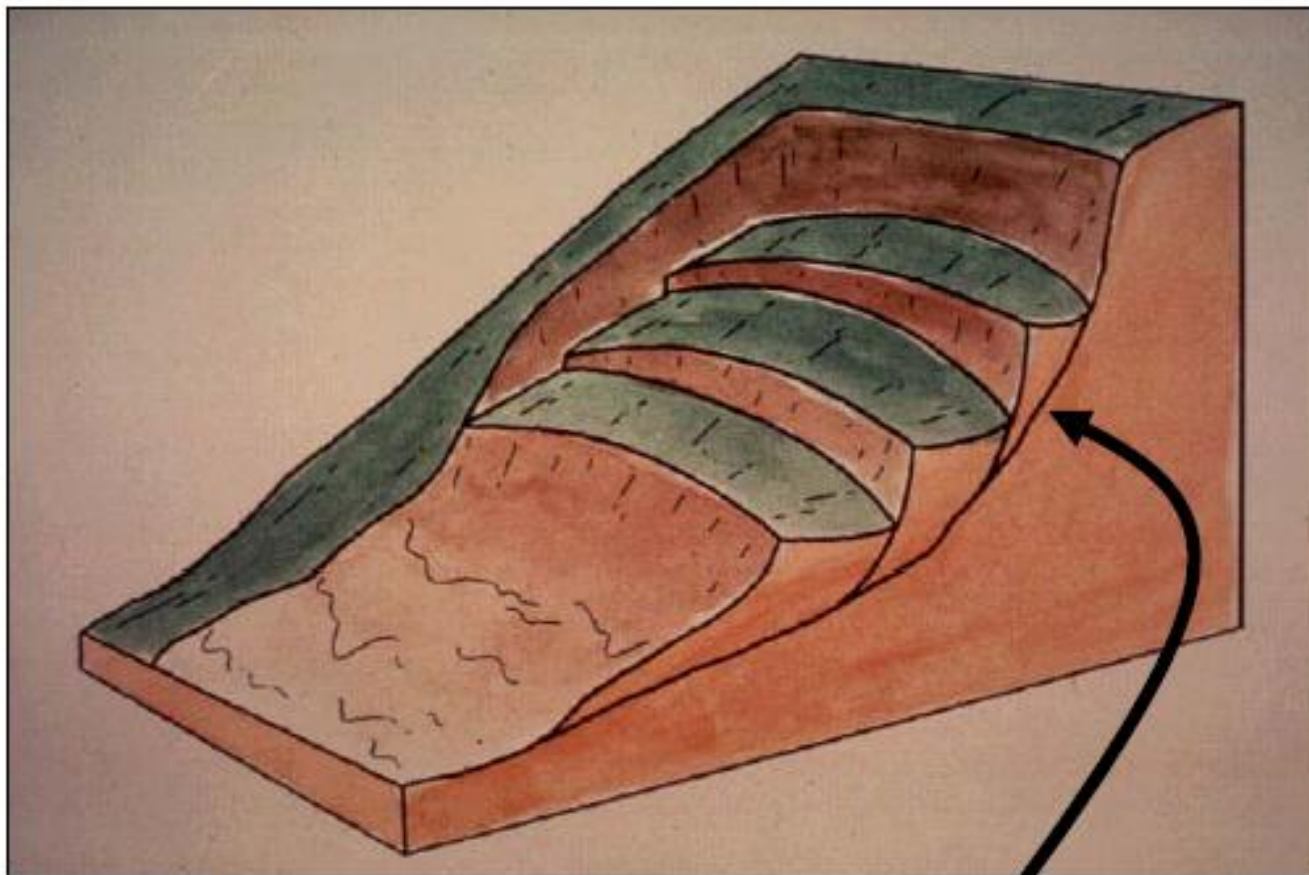
Značaj čvrstoće na smicanje

- Sigurnost bilo koje geotehničke konstrukcije zavisi o čvrstoći tla;
- Ako tlo popusti, konstrukcija temeljena na tlu može se srušiti;
- Razumijevanje čvrstoće na smicanje je osnova za analizu problema stabilnosti tla kao što su:
 - Bočni pritisak tla na potporne konstrukcije;
 - Stabilnost kosina (prirodnih, vještačkih);
 - Nosivost tla ispod temelja različitih konstrukcija

Smičući lom u tlu



Klizanje (pokretanje) tla



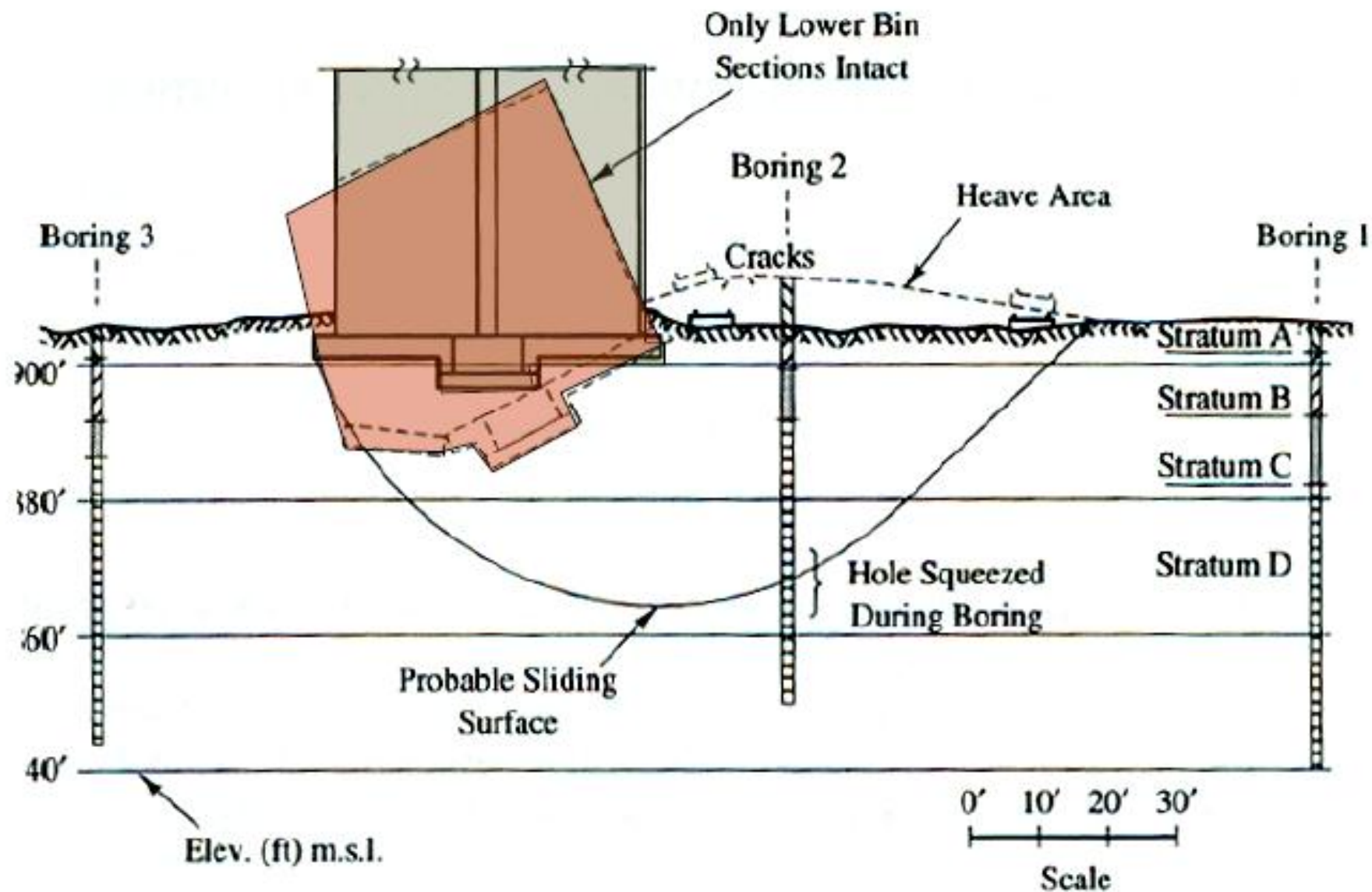
Pokretanje uslijed dostizanja
smičuće čvrstoće na kliznoj plohi

Static: Transcosna Grain Elevator Canada (Oct. 18, 1913)



West side of foundation sank 24-ft

Dostizanje nosivosti tla ispod objekta



**Dynamic: Foundation failure by liquefaction
after the 1964 Niigata Earthquake. (USGS)**

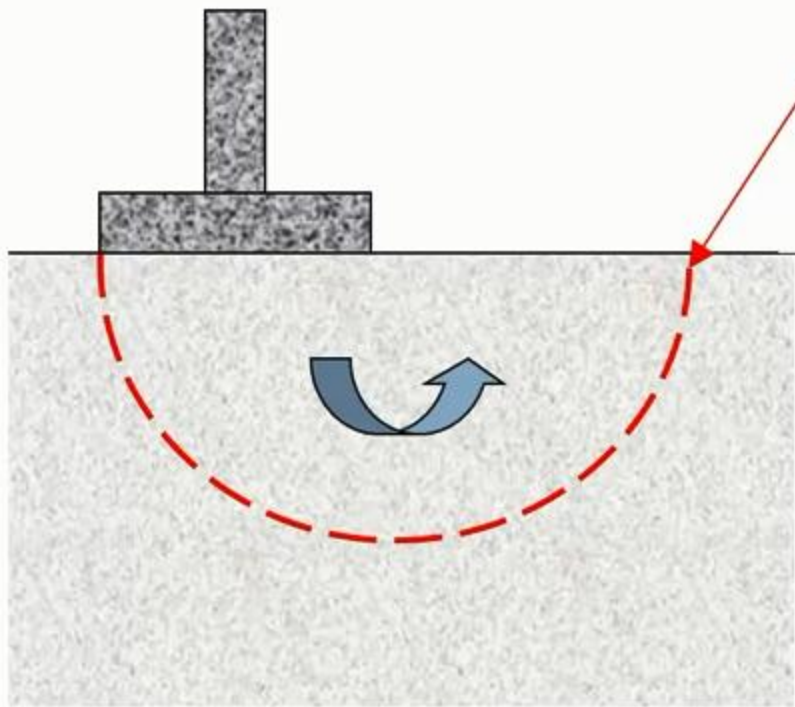


Dynamic: Lateral Spreading caused by the 1906 San Francisco Earthquake at Moss Landing, CA (USGS Professional Paper 993)

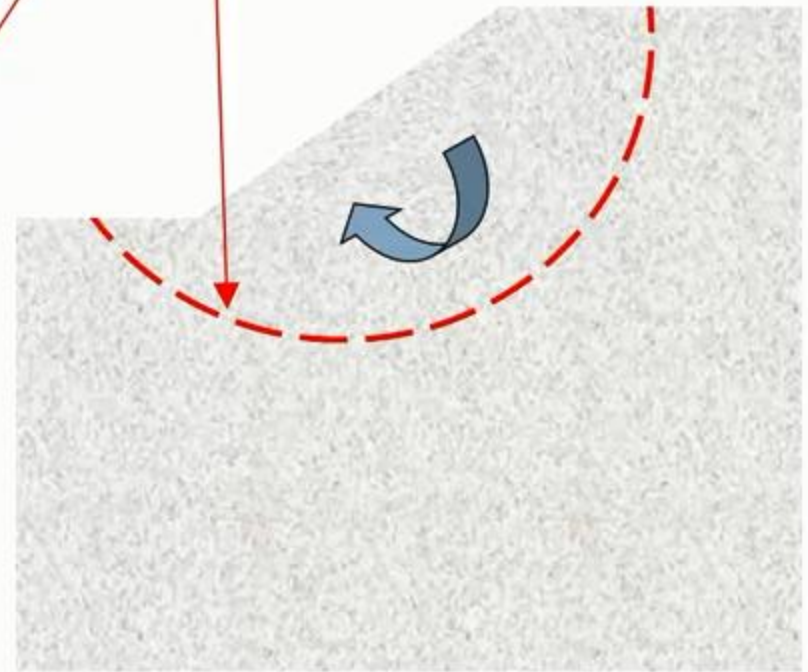


Smičući lom

Smičuća čvrstoća dostignuta duž lomne ravni



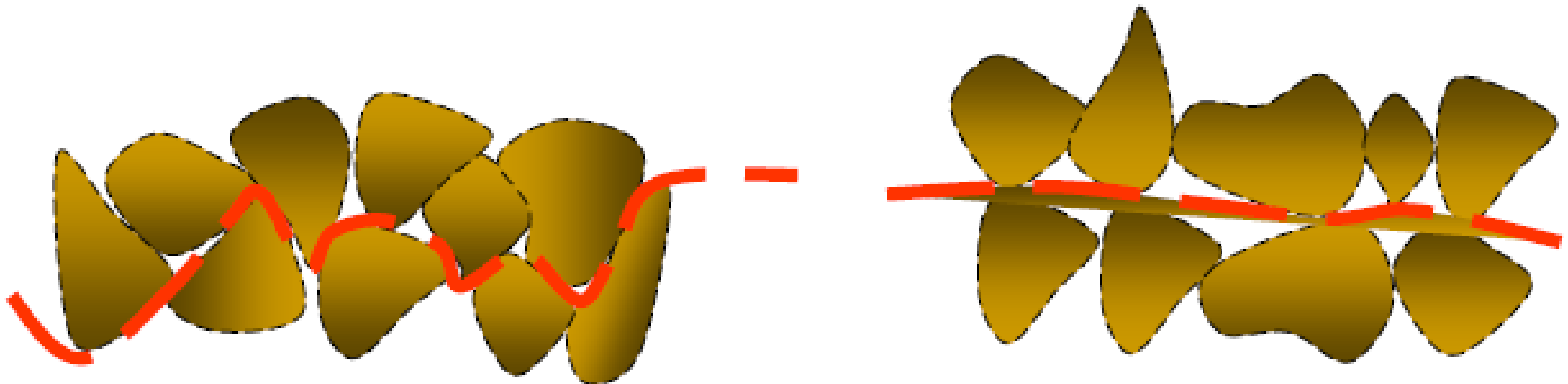
Temelj



Nasip/Kosina

Smičuća čvrstoća tla

- Smičuća čvrstoća tla je otpornost smičućim naprežanjima;
- Mjera otpora tla deformisanju odgovara kontinuiranim pomjeranjima pojedinačnih čestica tla;
- Otpornost na smicanje u tlu zavisi prvenstveno o interakciji između čestica tla;
- Lom smicanjem se javlja kada nastupi klizanje između čestica ili se „rolanjem“ (preskakanje) mimoilaze.



Smičuća čvrstoća tla

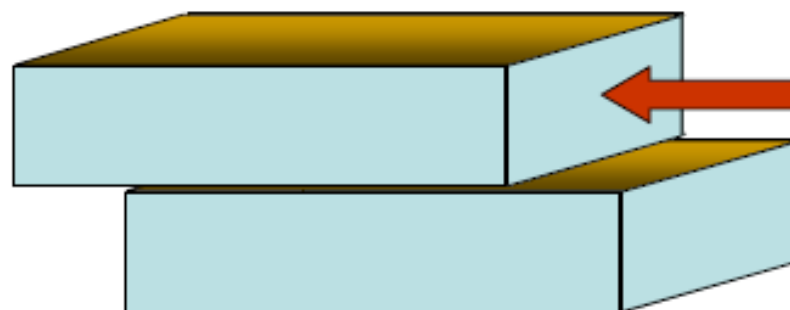
Smičućoj čvrstoći tla doprinose:

- **Kohezija** između čestica (komponenta nezavisna o naponu):
 - Cementacione veze između zrna tla,
 - Elektrostatički naponi između čestica gline
- **Trenje** između čestica tala (komponenta zavisna o naponu)

Smičuća čvrstoća tla: **Kohezija**

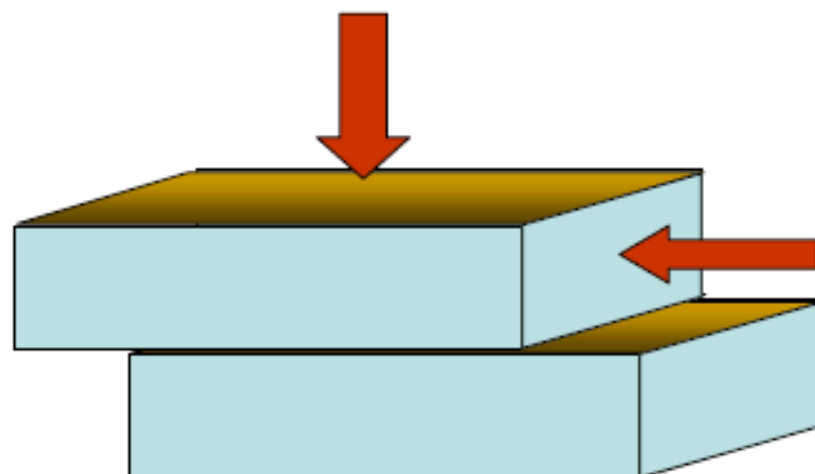
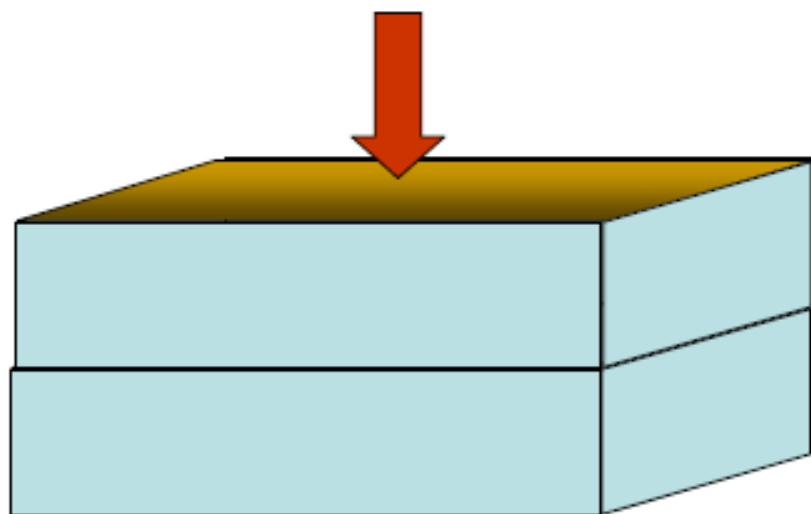
■ Kohezija (**C**), je mjera cementacije čestica zemljišta

- Suvi pijesak bez cementacije
- Suvi pijesak sa nešto cementacije
- Meka glina
- Čvrsta glina



Smičuća čvrstoća tla; **Unutrašnje trenje**

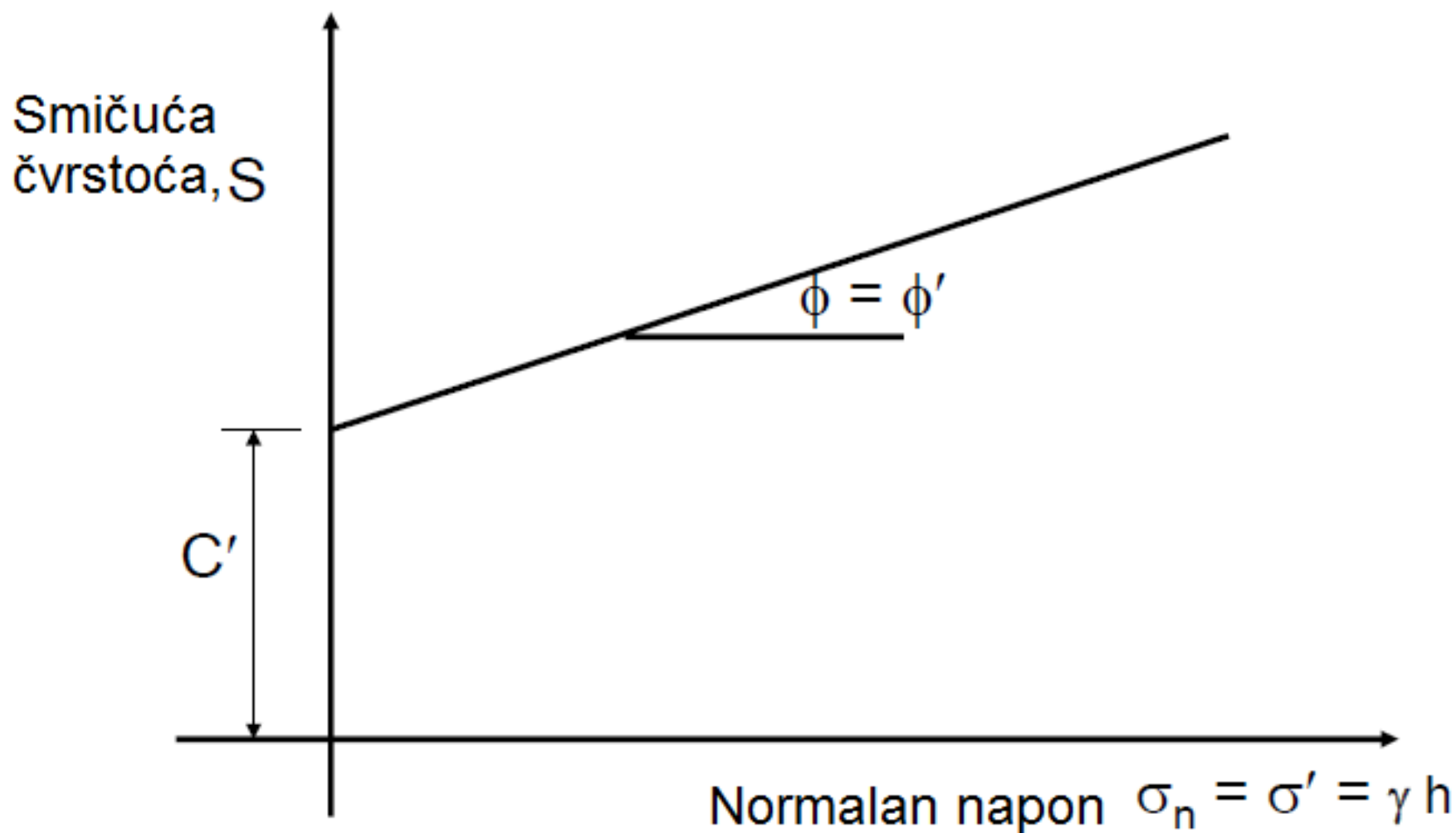
- Ugao unutrašnjeg trenja (φ), je mjera čvrstoće tla na smicanje uslijed trenja među česticama tla



Mohr-Coulomb kriterijum loma

- Prema ovoj teoriji do loma će dovesti kritična kombinacija normalnih napona i smičućih napona, a ne maksimalne vrijednosti pojedinačnih normalnih ili smičućih napona

Mohr-Coulomb kriterijum loma



KULON-MOR-TERZAGIJEV (linearan) ZAKON LOMA

Kulonov zakon definiše smičuću čvrstoću tla empirijskim izrazom u obliku:

$$\tau_f = c + \sigma_n \tan \phi$$

c - kohezija za totalne napone,

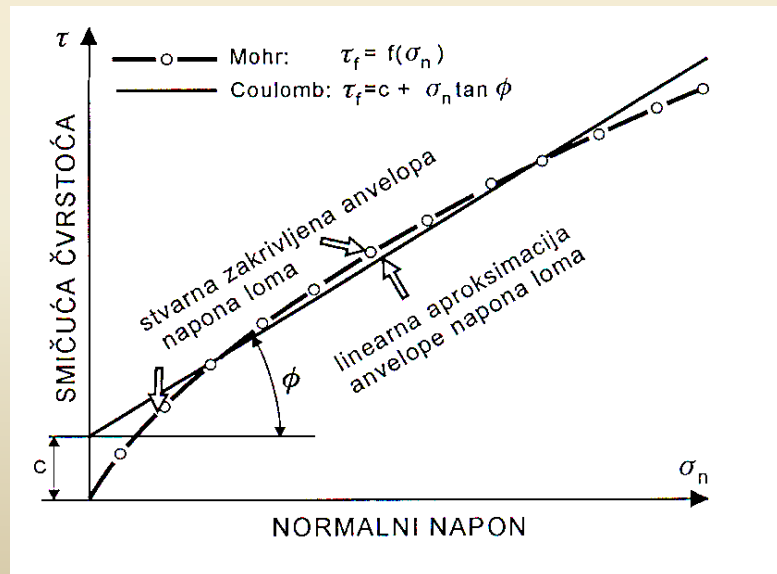
ϕ - ugao trenja za totalne napone,

σ_n - totalni normalni napon koji djeluje na ravan smicanja tj. ravan loma.

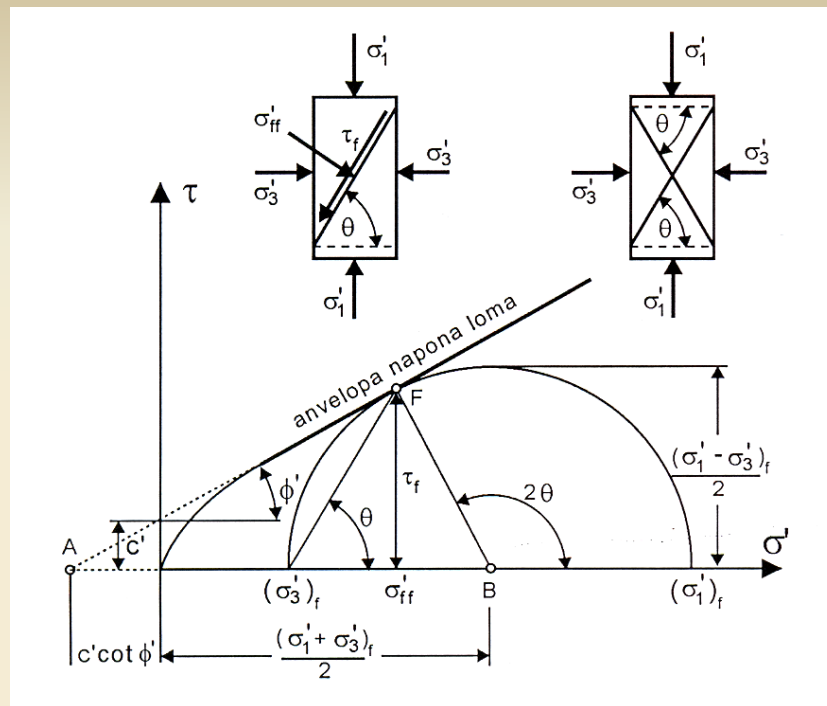
Smičuća čvrstoća se od kasnih dvadesetih godina XX vijeka opisuje empirijskim linearnim zakonom u funkciji efektivnih napona izrazom:

$$\tau_f = c' + (\sigma_n - u) \tan \phi' = c' + \sigma_n' \tan \phi'$$

c' - kohezija za efektivne napone ili prividna kohezija,
 ϕ' - ugao trenja za efektivne napone ili ugao smičuće otpornosti,



Zavisnost smičuće čvrstoće od normalnog napona



Morov dijagram napona loma

Koordinate tangentne tačke F su:

$$\tau_f = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} \sin 2\theta$$

$$\sigma'_{ff} = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)_f}{2} + \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f}{2} \cos 2\theta$$

ϕ' -teorijski ugao između ravni u kojoj djeluje maksimalni glavni napon i ravni loma.
 $\Theta = \pm (45^\circ + \phi'/2)$

Sa slike može se dobiti veza između efektivnih glavnih napona i parametara čvrstoće:

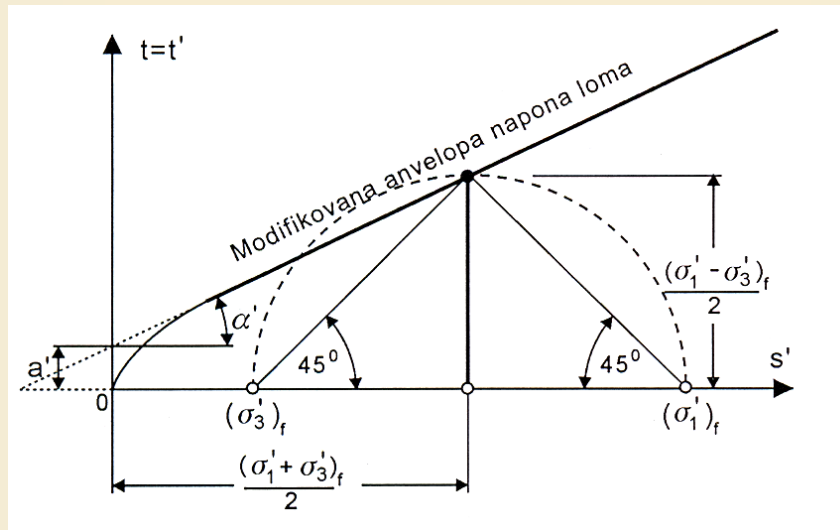
$$\sin \phi' = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f}{2c' \cot \phi' + (\sigma'_1 + \sigma'_3)_f}$$

tako da je razlika glavnih napona pri lomu

$$(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f = (\sigma'_1 + \sigma'_3)_f \sin \phi' + 2c' \cos \phi'$$

Može se pokazati da je za dati minimalni glavni napon σ'_3 maksimalna moguće veličina maksimalnog glavnog napona pri lomu:

$$\sigma'_{1f} = \sigma'_{3f} \tan^2 \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right) + 2c' \tan \left(45^\circ + \frac{\phi'}{2} \right)$$



Lembov dijagram loma

Na osnovu Lembovog dijagrama loma modifikovana anvelopa ima oblik:

$$\frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f}{2} = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)_f}{2} \tan \alpha' + a'$$

MJERENJE SMIČUĆE ČVRSTOĆE TLA

Neporemećeni uzorci sitnozrnog tla (gline i prašine) mogu se uzeti utiskivanjem cilindra u dno bušotine, ili iz kocke kada se uzorak uzima iz istražne jame ili bunara. Pri tome se smatra da su ručno uzeti uzorci iz kocke manje poremećeni od uzoraka uzetih cilindrom, tako da daju pouzdanije rezultate pri ispitivanjima mehaničkih osobina.

U nevezanim krupnozrnim materijalima (pijesak i šljunak) uzimanje neporemećenih uzoraka iz terena je veoma teško izvodljivo, tako da se laboratorijskim postupcima ispituju posebno pripremljeni uzorci pjeskovitih materijala u prerađenom stanju. Zbog praktične nemogućnosti da se u laboratorijskim uslovima tačno reprodukuje stanje krupnozrnog uzorka tla u terenu, mjerenje smičuće čvrstoće se vrši indirektno terenskim penetracionim opitima.

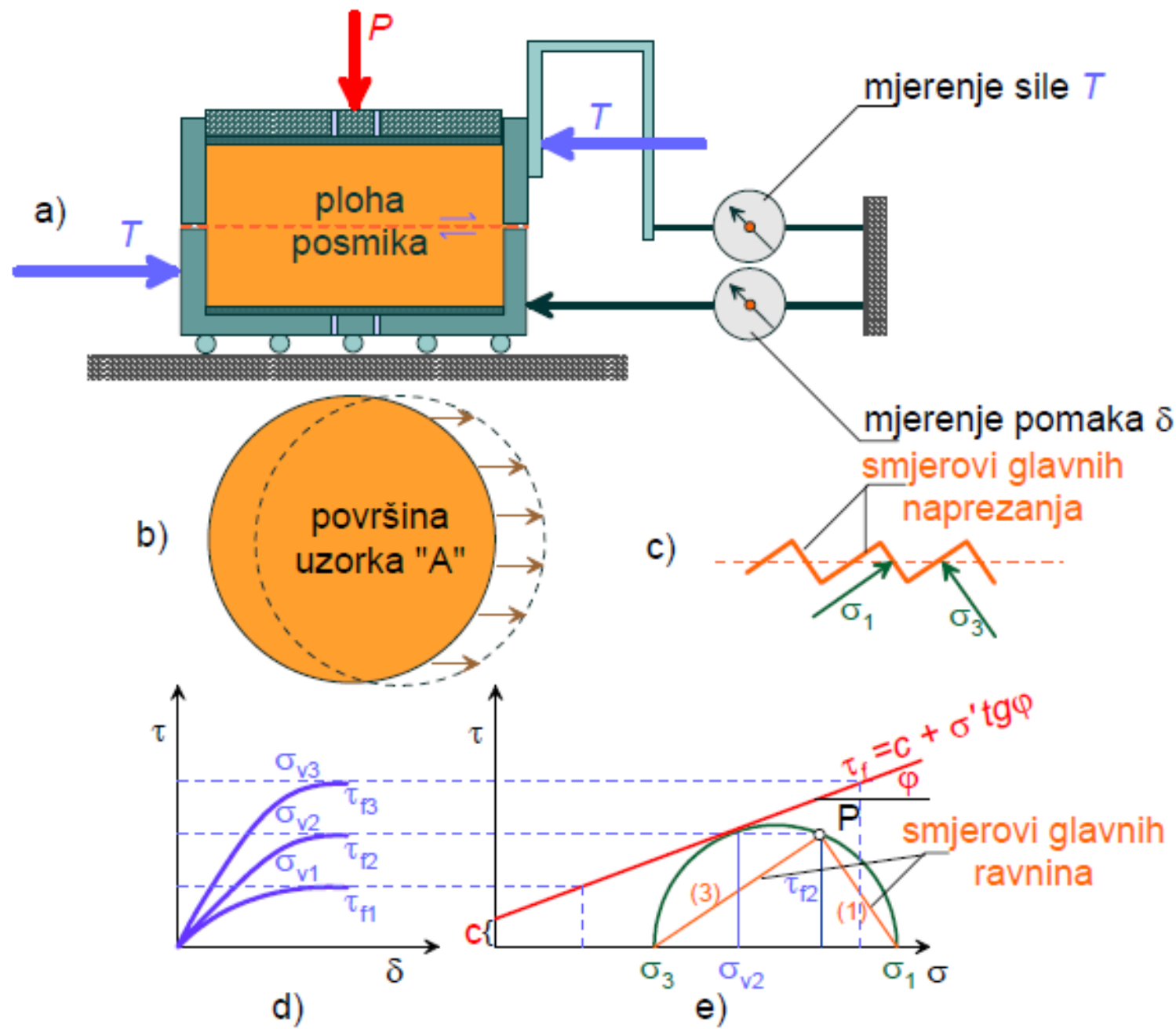
Postoje dva tipa uređaja za direktno smicanje:

- sa konstantnim prirastom sile
- sa konstantnim prirastom deformacije





Sl.: Presjek uređaja za direktni posmik i prikaz rezultata ispitivanja



Direktni posmik je opit kojim se određuju osnovni parametri čvrstoće prema Mohr–Coulombovom zakonu loma: ugao unutrašnjeg trenja (φ) i kohezija (c).

Ispitivanja se mogu vršiti na neporemećenim i poremećenim uzorcima tla s tim da je postupak ugradnje različit.

Kod neporemećenih uzoraka tla kvadratni kalup se utisne u reprezentativni dio uzorka, površina uzorka se zagladi i poravna sa visinom kalupa.

Kod poremećenih uzoraka tla određena masa tla se zbija u kvadratni kalup poznatog volumena da bi se dobila gustoća odnosno zbijenost tla kakva je u prirodnom stanju.

Prema načinu smicanja postoje dvije različite vrste uređaja za direktni posmik:

- 1) uređaj sa stalnim prirastom sile
 - prirast horizontalne sile je konstantan,

- 2) uređaj sa stalnim prirastom deformacija
 - prirast deformacije je konstantan, a mjeri se prirast sile (ili promjena sile).

Opit se odvija u dvije faze:

I faza - **konsolidacija**,

II faza - **posmik**.



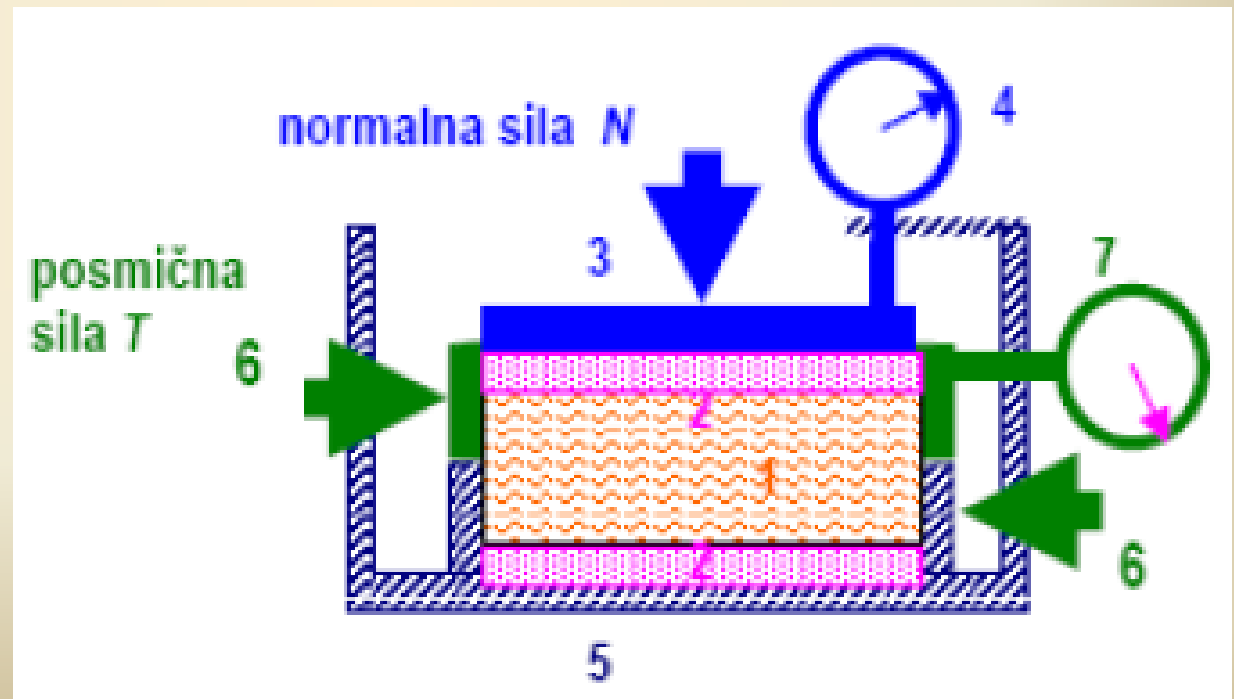
Ureñaj za konsolidaciju.

Ureñaj za direktni posmik.



Dijelovi uređaja zadirektan posmik:

- neporemećeni uzorak (1),
- porozne pločice koje se stavljaju s gornje i donje strane (2),
- metalna ploča postavljena na gornju poroznu ploču tako da prenosi opterećenje po cijeloj horizontalnoj površini uzorka jednoliko, preko nje se nanosi sistem za opterećenje (3),
- komparater(mikroura) za mjerenje vertikalnih deformacija (4),



- posuda koja osigurava potopljenost i zasićenost uzorka i koja je postavljena na kugličnim ležajevima tako da se pomiče u smjeru djelovanja horizontalne sile (5),
- kvadratni kalup u koji se ugrađuje uzorak, koji se sastoji od dva dijela koja se pomiču u horizontalnom smjeru jedan u odnosu na drugi (6),
- komparater(mikroua) za mjerenje horizontalnih deformacija (7).

Postupak ispitivanja:

- reprezentativni uzorak podijelimo na tri jednaka dijela;
- u svaki uzorak utisnemo metalni kvadratni kalup dimenzija 6x6x2.5 cm, višak materijala odrežemo i izravnamo površinu s rubom kalupa (s gornje i donje strane);
- izvažemo masu kvadratnog kalupa sa uzorkom (masa kvadratnog kalupa je poznata) za određivanje prirodne vlažnosti uzorka;

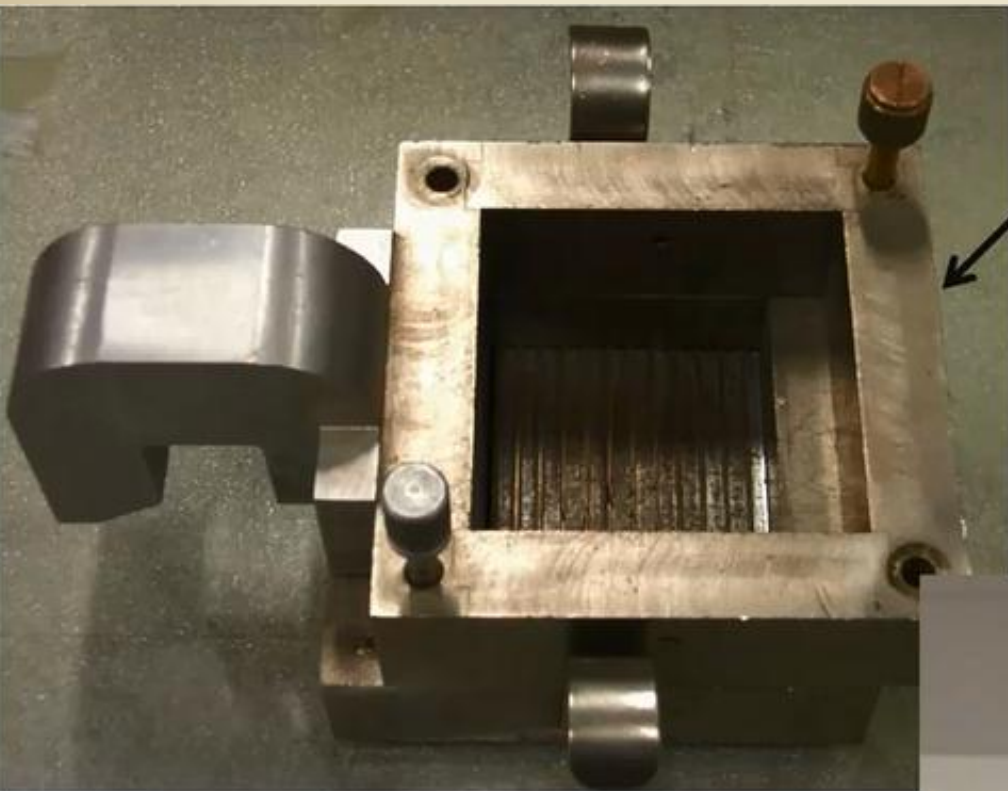
- s gornje i donje horizontalne površine uzorka postavimo porozne pločice da bi s obje strane uzorka bilo omogućeno dreniranje (na tim površinama uzorka tlak vode tokom cijelog opita je jednak nuli);
- kalup sa uzorkom i poroznim pločicama ugradimo u uređaj za konsolidaciju (staklena posuda);
- na vrh uzorka stavlja se metalna ploča preko koje se sistemom poluga nanosi opterećenje i koja omogućava da se opterećenje ravnomjerno preraspodijeli po uzorku.

Opterećenje se prenosi centrično preko čelične kuglice postavljene na vrh metalne ploče i urenja za prijenos sile;

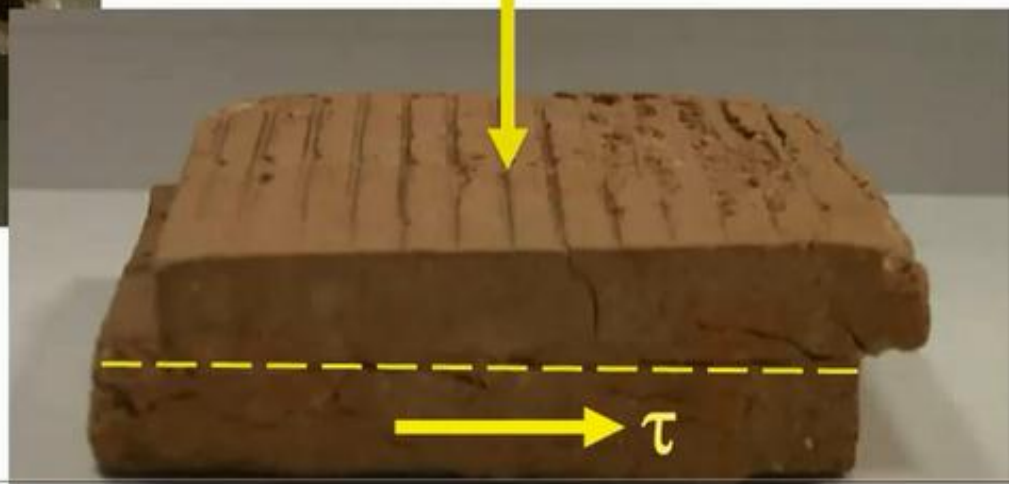
- uzorke opterećujemo sa 100, 200 i 400 kPa;
- staklenu posudu koja osigurava potopljenost i zasićenost uzorka napunimo vodom do nivoa gornje površine uzorka;
- ostavimo uzorke da se pod datim opterećenjem konsolidiraju 24 h;
- nakon 24 h prebacujemo ih (svaki posebno) u uređaj za direktni posmik (postupak ugradnje kalupa u uređaj je isti kao i kod uređaja za konsolidaciju);

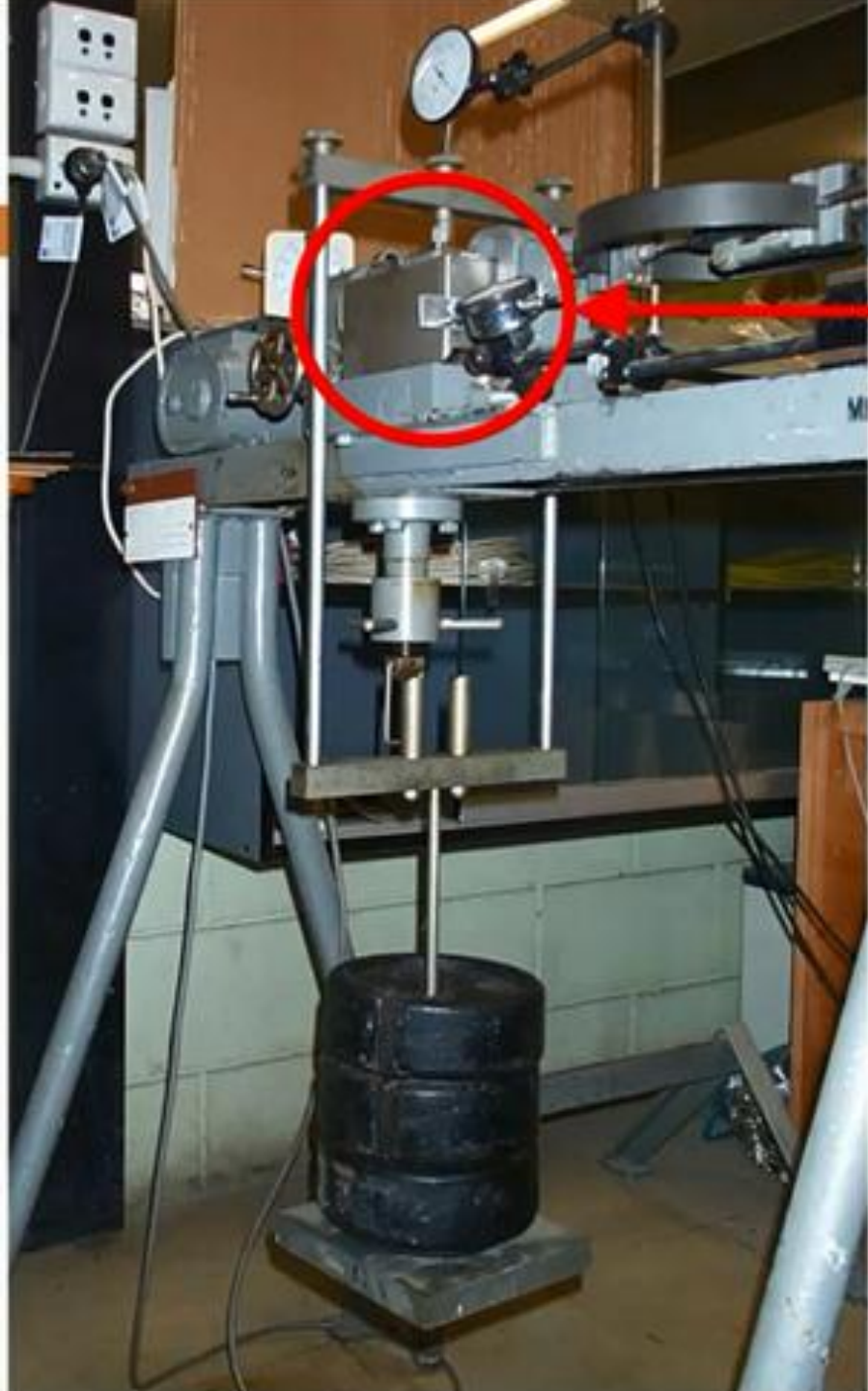
- na vrh metalne ploče postavimo senzor (komparater) za mjerenje vertikalnih pomaka, a na kalup prislonimo senzor za mjerenje horizontalnih pomaka te na komparaterima nuliramo pomake pomoću kompjutera;



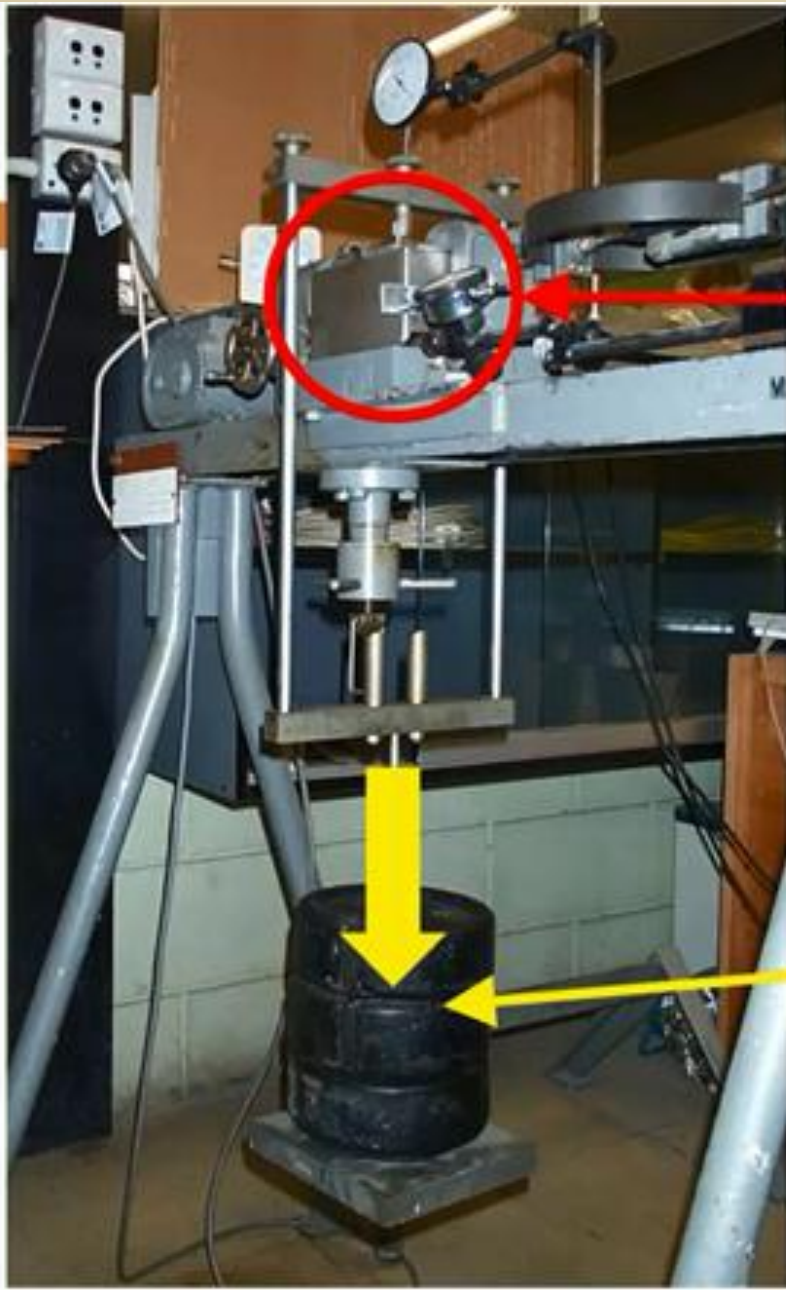


60mm x 60mm x 20mm
podijeljeni boks



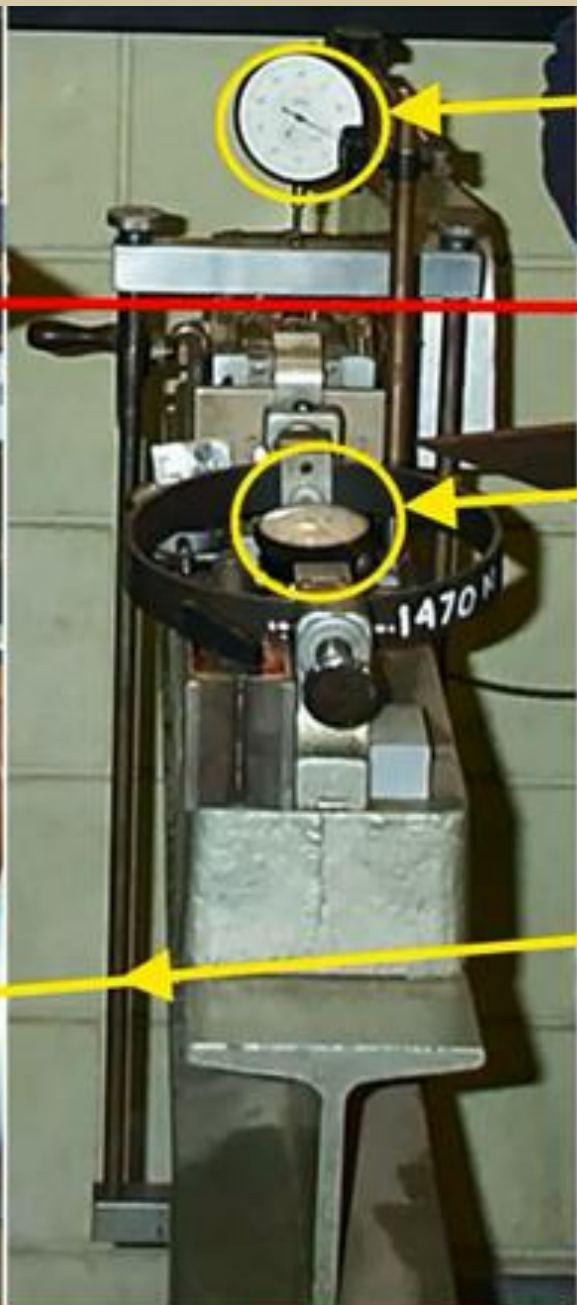
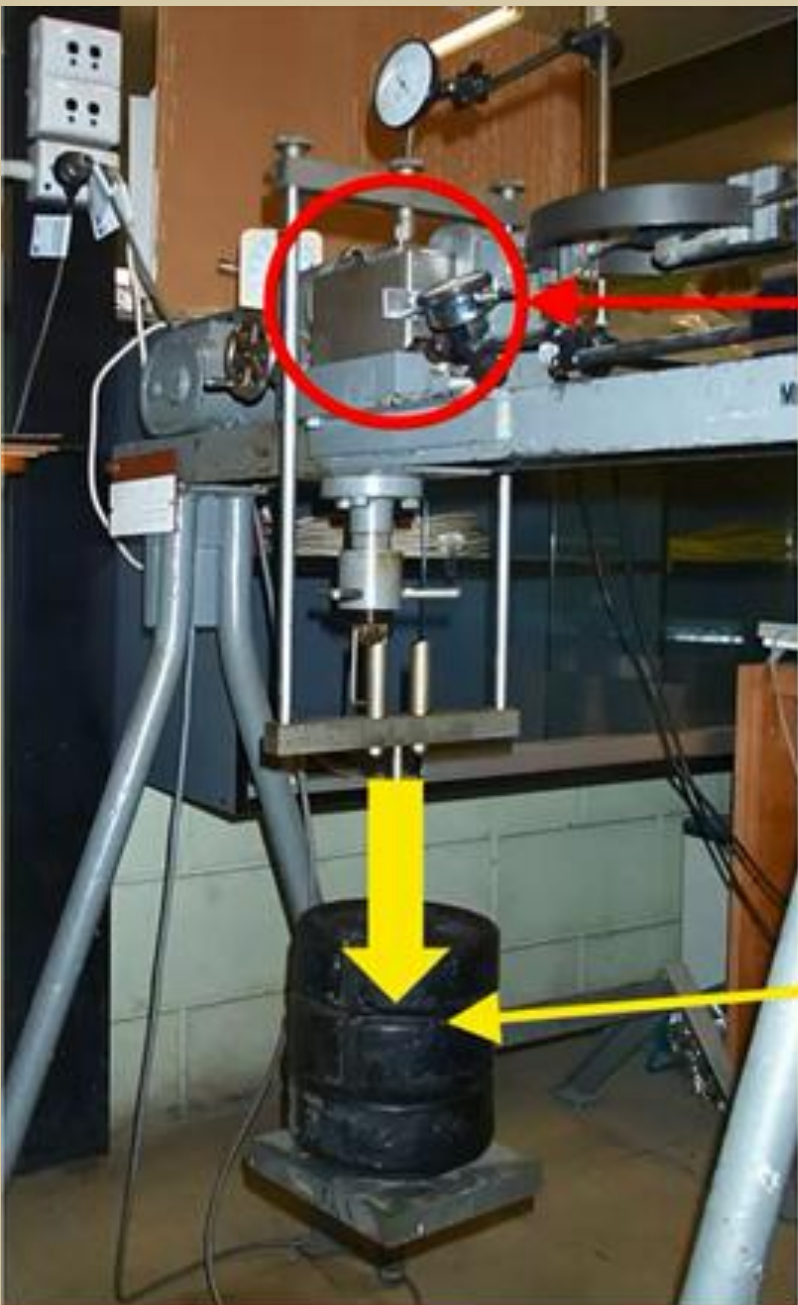


**boks
uzorka**



**boks
uzorka**

**vertikalna
sila F
(težina+veš-
aljka)**



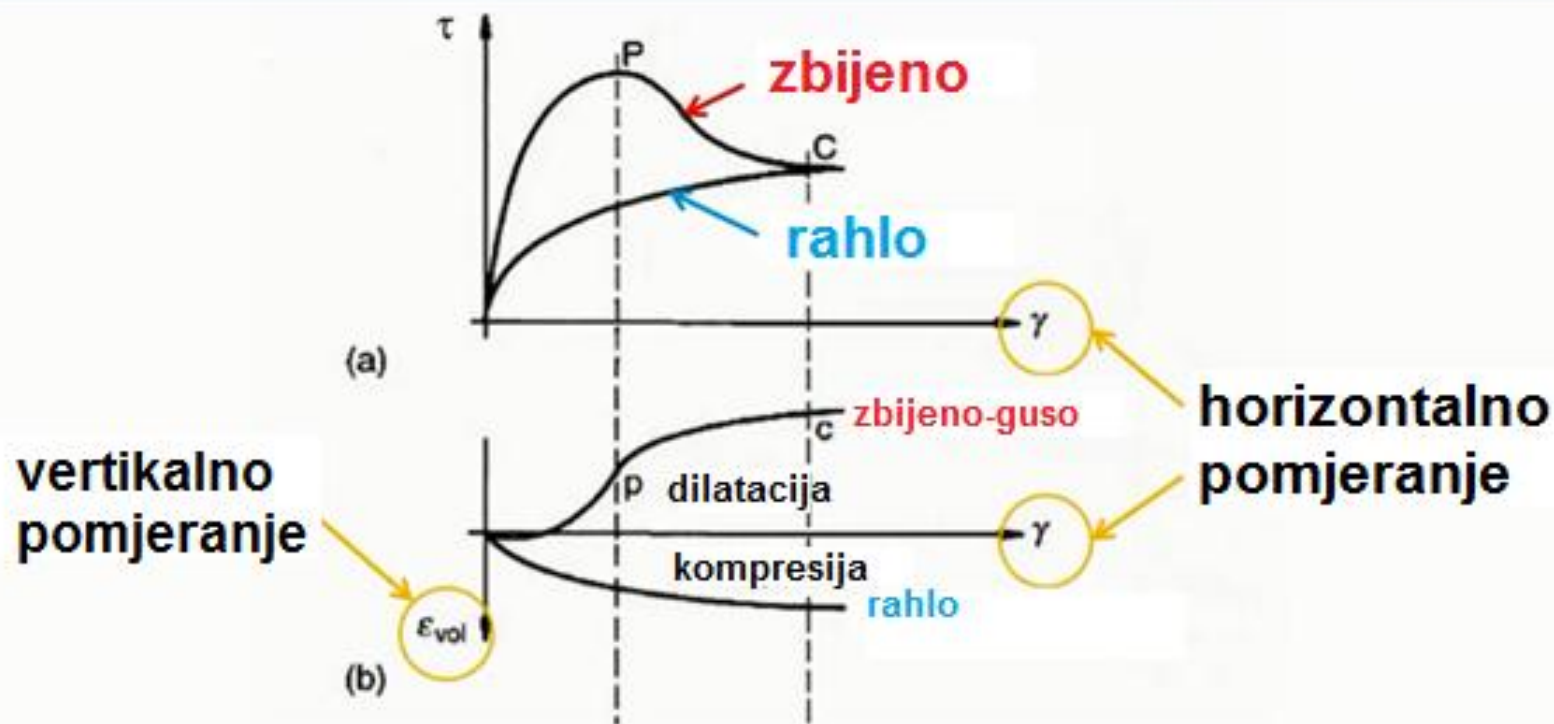
vertikalno pomjiranje

boks uzorka

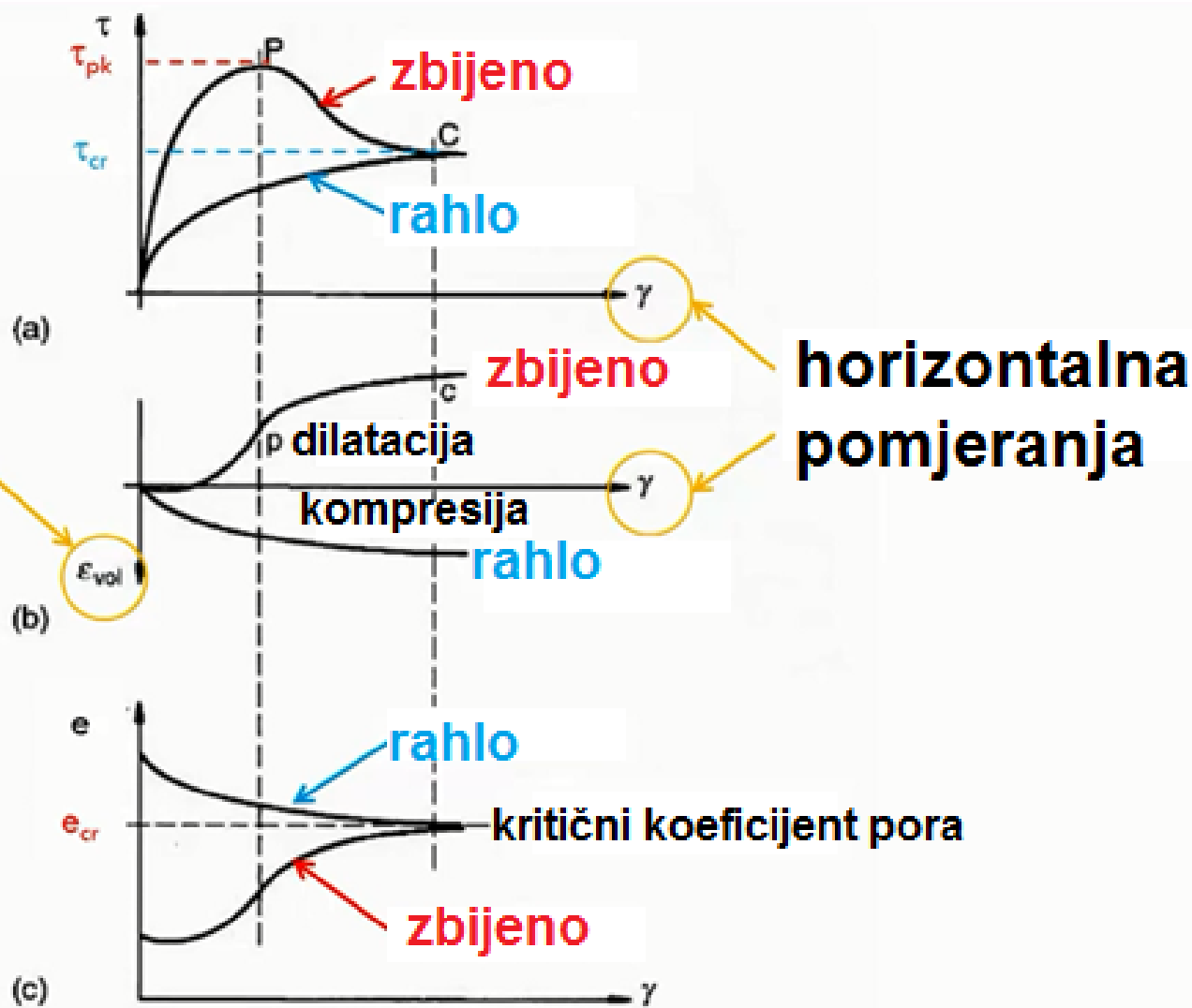
horizontalna/
smičuća sila

vertikalna sila F
(težina+vešaljka)

Vršna čvrstoća i dilatacija



Vršna čvrstoća i dilatacija

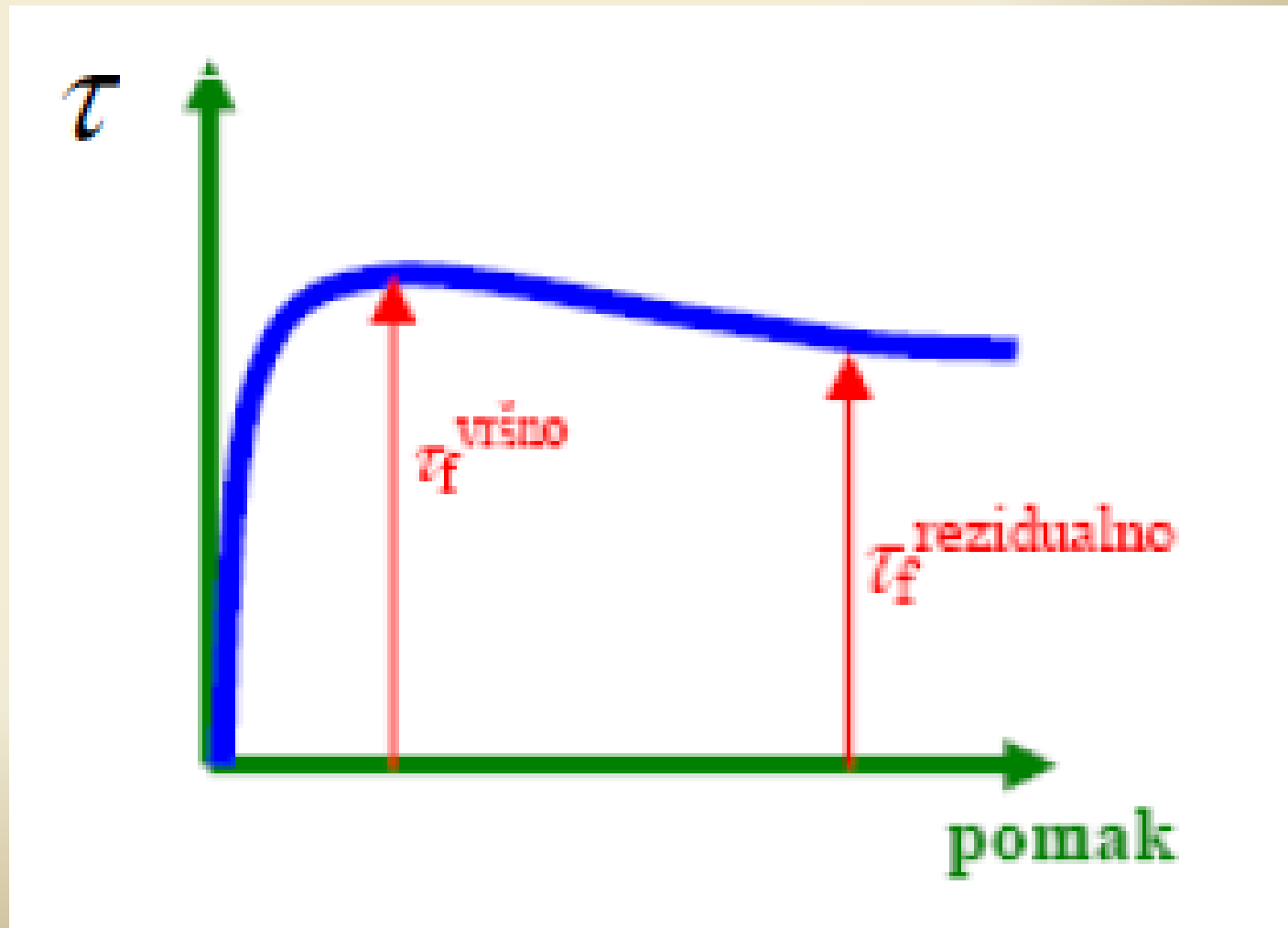


vertikalna pomjeranja

horizontalna pomjeranja

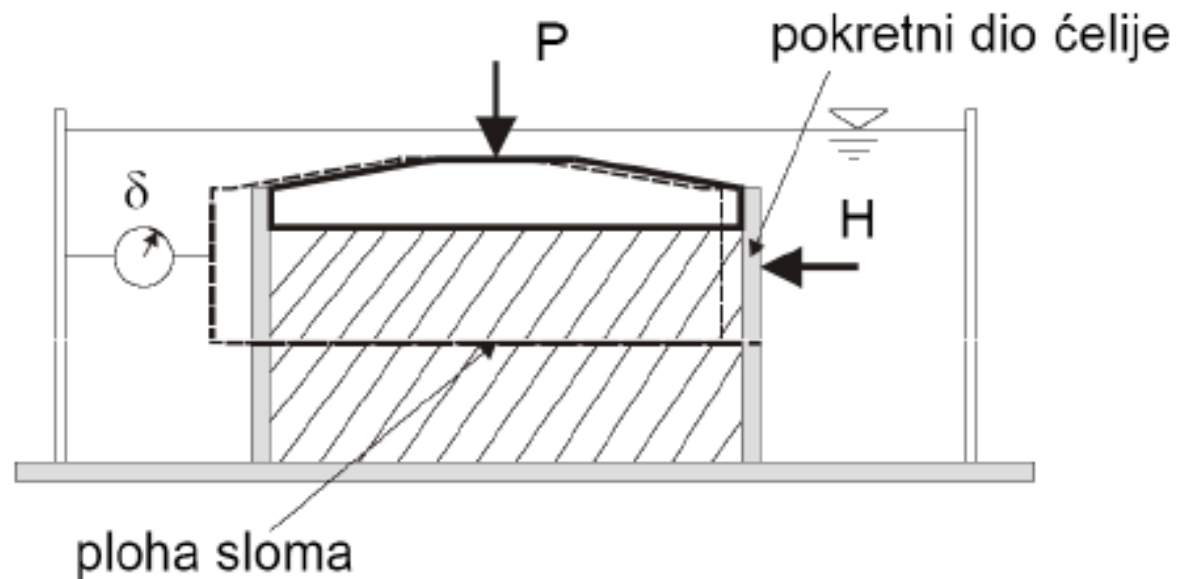
- uključimo uređaj za direktno smicanje, na njemu namjestimo brzinu smicanja na $150 \mu\text{m}/\text{min}$ i prvo krećemo sa smicanjem uzorka pod opterećenjem od 100 kPa ;
- opit pokrećemo pomoću kompjutera, dok se uzorak smiče pratimo vrijednost horizontalne sile pomoću dinamometra i pomake pomoću komparatora(mikroure). Kad se uzorak smakne 10 mm opit je gotov;
- na kraju opita kalup sa uzorkom stavimo u pećnicu na sušenje , te na već poznati način odredimo prirodnu vlažnost uzorka;

- postupak ponovimo za opterećenje od 200 i 400 kPa;
- rezultati mjerenja - za svako vertikalno opterećenje – prikazuju se kao relacija između ostvarenog posmičnog naprezanja (τ) i odgovarajućeg pomaka između gornjeg i donjeg kalupa;



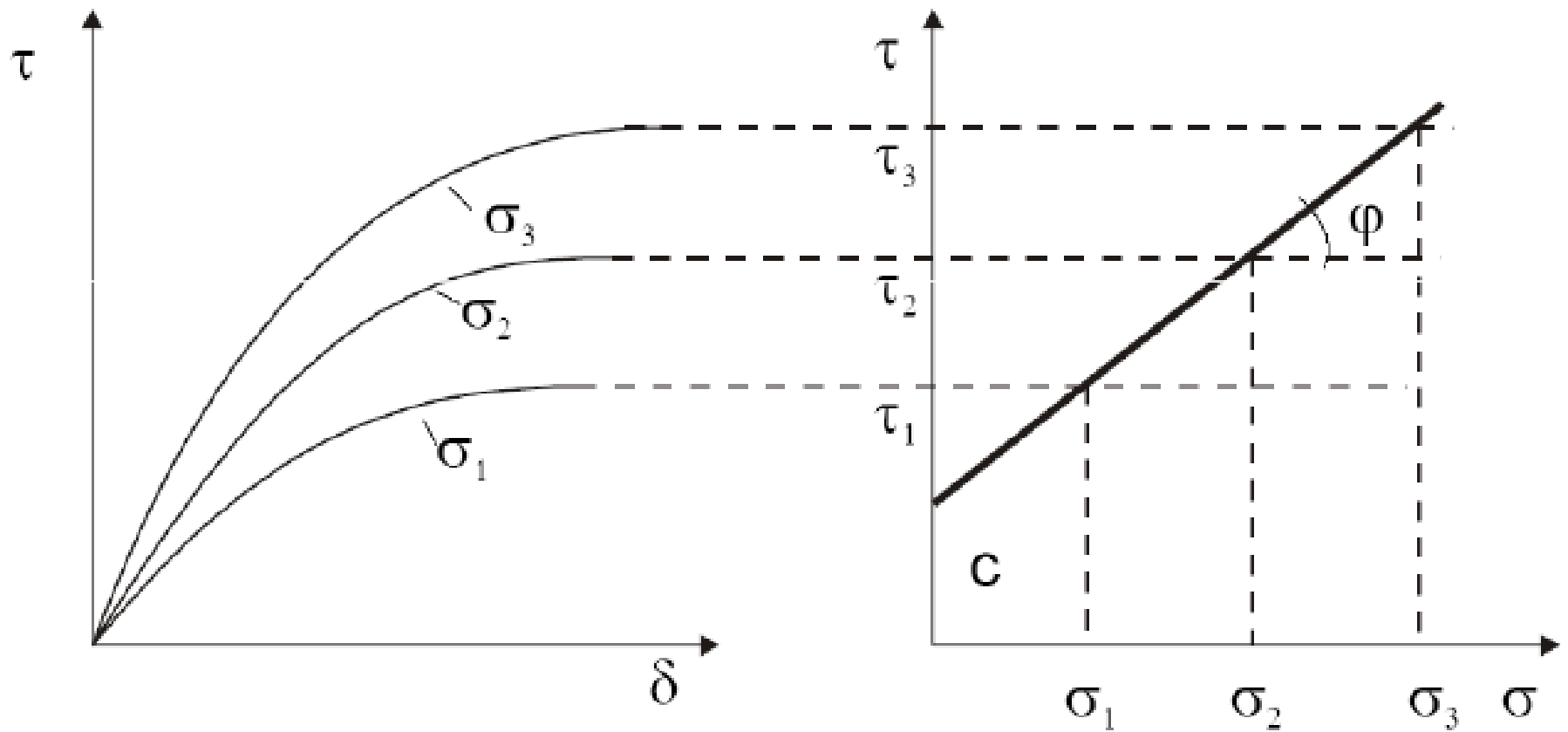
- posmično i normalno naprezanje u plohi na spoju dviju kutija su:

$$\tau = \frac{H}{A}$$
$$\sigma = \frac{P}{A}$$



Gdje je A - površina uzorka u ravnini dodira dviju kutija uređaja.

- rezultat opita su parametri čvrstoće **c** i **φ**:



$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg} \varphi$$

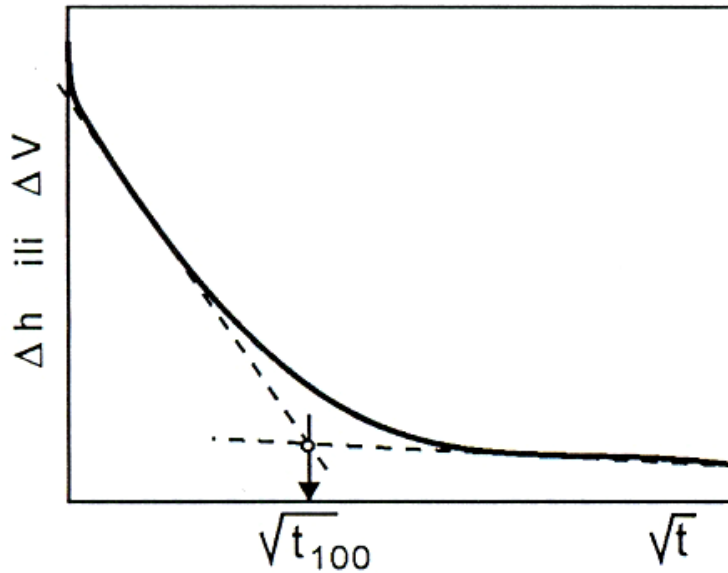
Prema načinu ispitivanja u aparatu za direktno smicanje primjenjuju se tri standardna postupka koji se, prije svega, razlikuju po uslovima dreniranja u pojedinim fazama opterećivanja:

1.DRENIRANI ili **SPORI** opit, (**D opit**). Postupak sa dreniranjem u obje faze opita za određivanje vršne čvrstoće tla za efektivne napone. Ovaj opit se standardno primjenjuje u praksi i daje *parametre čvrstoće izražene efektivnim naponima*.

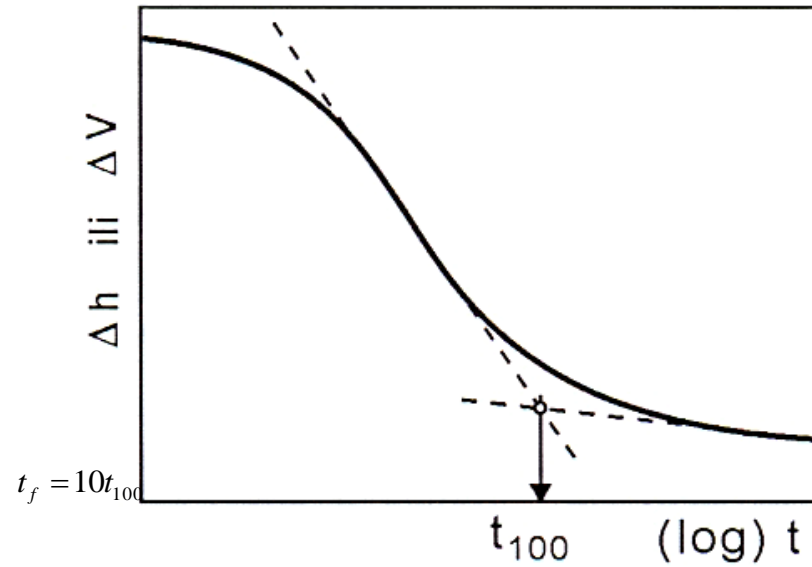
2.NEDRENIRANI ili **BRZI** opit, (**U opit**). Postupak bez dreniranja u obje faze opita. Služi za mjerenje *nedrenirane čvrstoće* koja se izražava *preko totalnih napona*. Ovakav opit direktnog smicanja treba primjenjivati samo uz posebno obrazloženje, jer se porni pritisci ne mogu mjeriti, a djelimično dreniranje je neizbježno.

3.POVRAATNI ili **REVERZNI**, (**R opit**). Drenirani opit smicanja za određivanje *rezidualne smičuće čvrstoće za efektivne napone*.

DRENIRANI ili "D" OPIT DIREKTNOG SMICANJA.



(a)



(b)

Određivanje vremena t_{100}

Potrebno vrijeme do loma se određuje na osnovu rezultata mjerenja sleganja uzorka u procesu konsolidacije uzimajući da je:

$$t_f = 10t_{100}$$

- pijesak 1mm/min, prašina 0,01mm/min, glina 0,001-0,003mm/min

NEDRENIRANI ili "U" OPIT DIREKTOG SMICANJA. Ima mišljenja da ovaj opit daje rezultate veoma niske pouzdanosti. Tokom izvođenja "U" opita izoluju se porozni keramički filteri tankim neperforiranim metalnim pločama u kontaktu sa uzorkom da bi se onemogućilo dreniranje uzorka pri nanošenju napona u obje faze opterećivanja. Brzina nanošenja smičućih opterećenja do loma uzorka treba da odgovara ukupnom trajanju oipta od nekoliko minuta, bez obzira na način nanošenja smičućih napona.

Pošto nije moguće na jednostavan način spriječiti promjenu zapremine u aparatu za direktno smicanje, moguće obezbjediti ni potpuno nedrenirane uslove, tako da se zbog ovih nedostataka za određivanje parametara nedrenirane smičuće čvrstoće preporučuje odgovarajući opit triaksijalne kompresije. S obzirom da nedrenirana smičuća čvrstoća tla može biti anizotropna, opit direktnog smicanja omogućava određivanje relativnih odnosa čvrstoća po ravnima različite orijentacije.

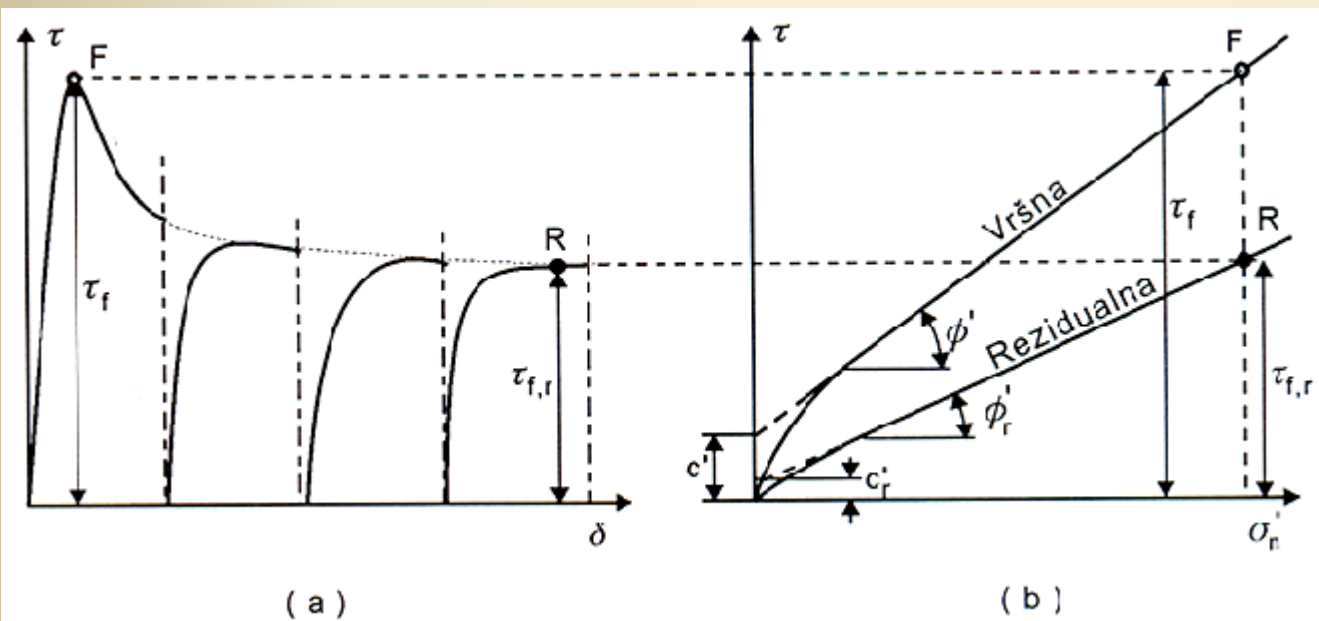
POVRATNI, REVERZNI ili "R" OPIT DIREKTOG SMICANJA..

Može se izvoditi na neporemećanim i prerađenim, poremećenim uzorcima, ili prethodno presječenim uzorcima po ravni smicanja, kao i na uzorcima koji sadrže ravan smicanja uzetih iz terena, najčešće klizišta.

Opit se provodi isključivo aparatima sa kontrolisanom brzinom smičućih pomjeranja i u dreniranim uslovima.

Iako je anvelopa napona loma nelinearna, *rezidualna čvrstoća* se može *aproksimirati linearnom zavisnošću u određenom intervalu efektivnih normalnih napona:*

$$\tau_{f,r} = c'_r + \sigma'_n \tan \phi'_r$$

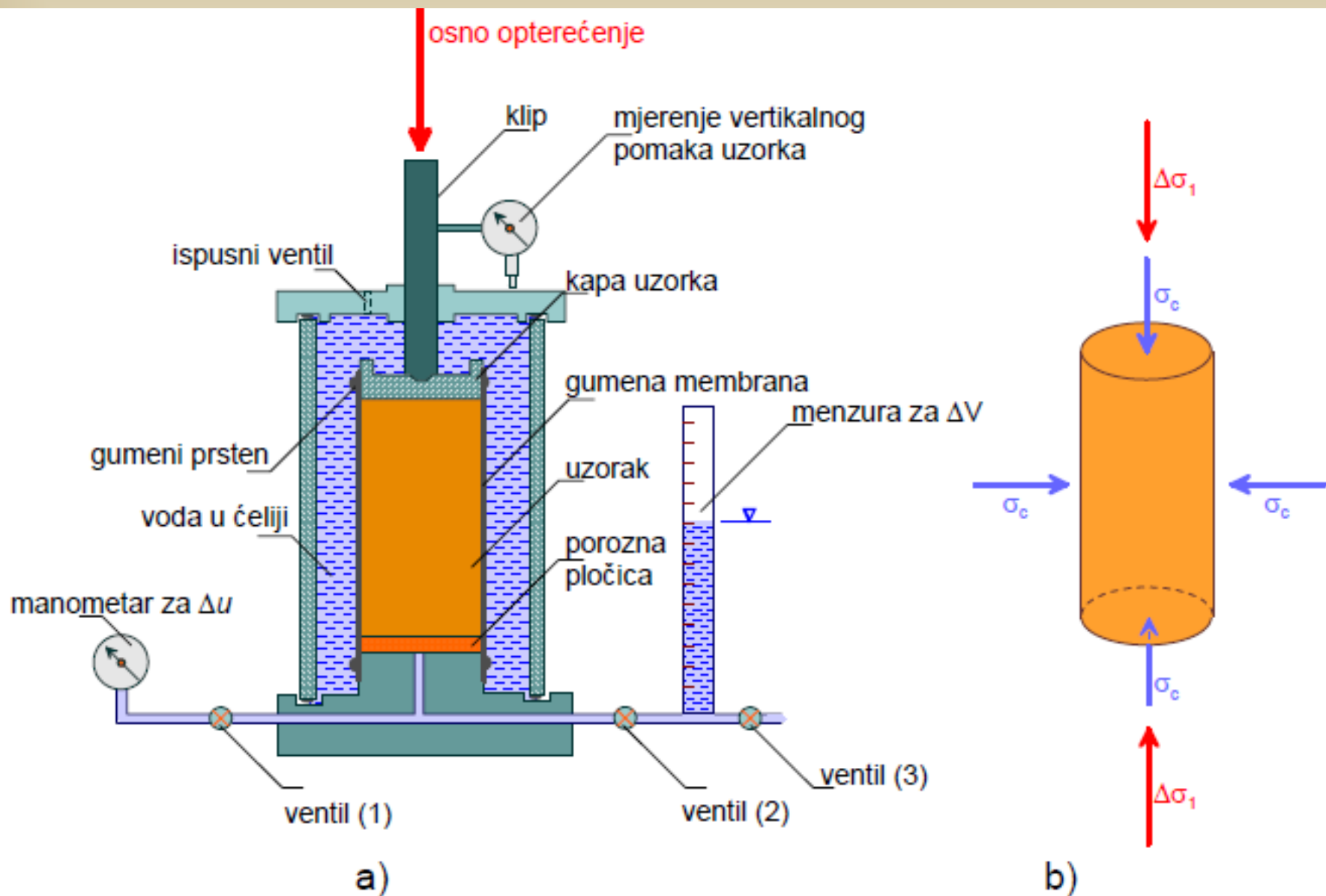


*Reversni opit
direktnog smicanja*

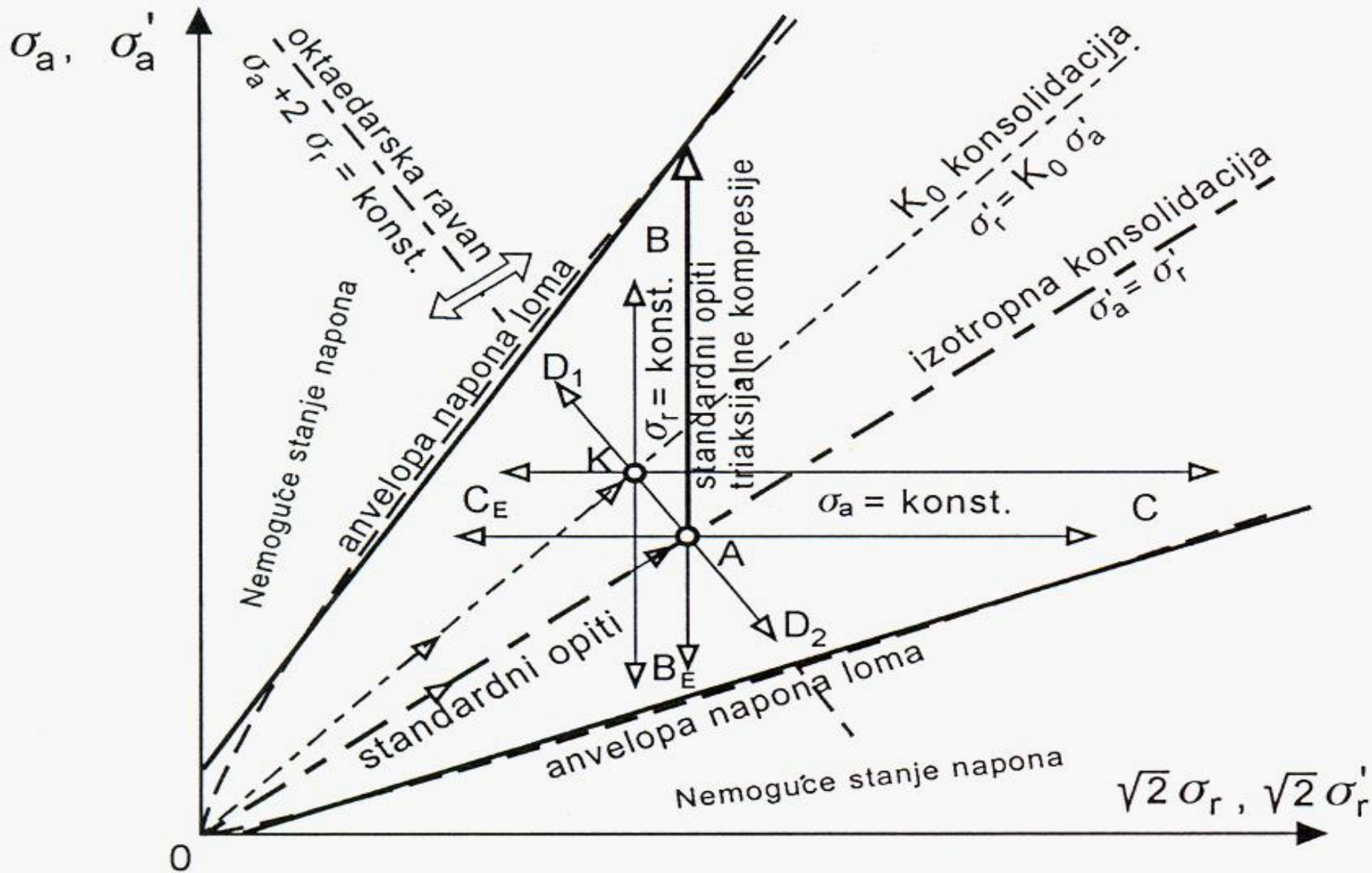
Troosni posmik

Oprema za troosna ispitivanja





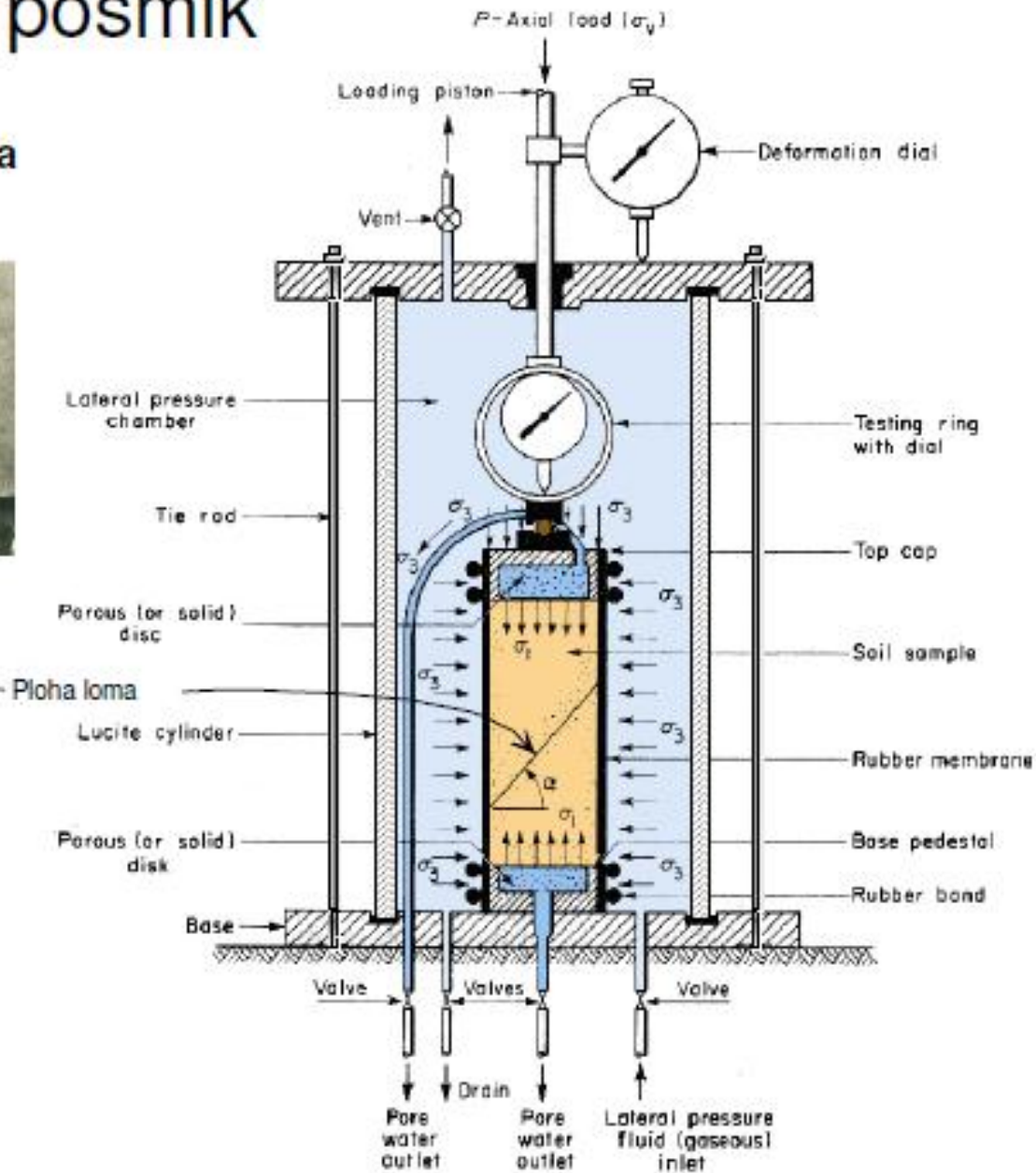
a) shema troosnog uređaja, b) shema opterećenja uzorka u troosnom uređaju



Neke dvofazne putanje opterećivanja u triaksijalnom aparatu

Troosni posmik

Troosna ćelija



Troosni posmik

Priprema neporemećenog uzorka

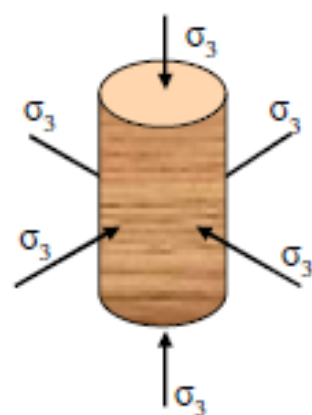


Uzorak je u gumenoj membrani



Ćelija se ipuni sa vodom

Troosni posmik



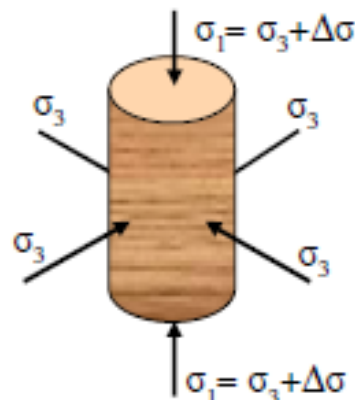
Hidrostatsko tlačenje

+

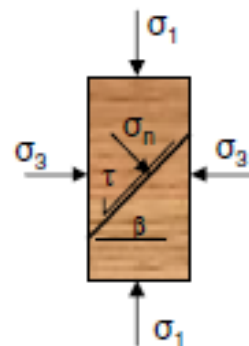
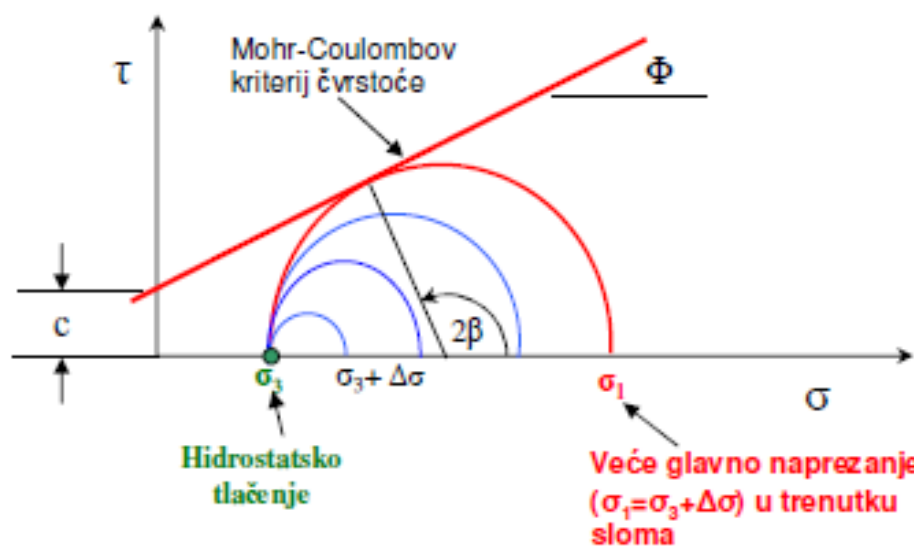


Povećanje aksijalnog napreznja uz zadržavanje bočnog tlaka stalnim (devijatorsko napreznje)

=



Troosno tlačenje



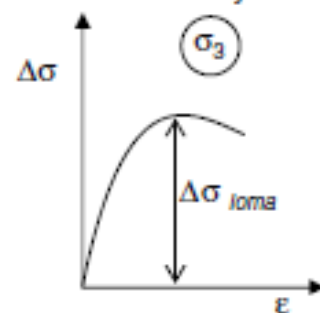
Troosni posmik

2- Konsolidirani drenirani pokus (Consolidated Drained Test (CD))

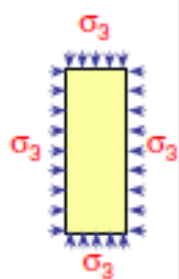
Prvi korak

Drugi korak

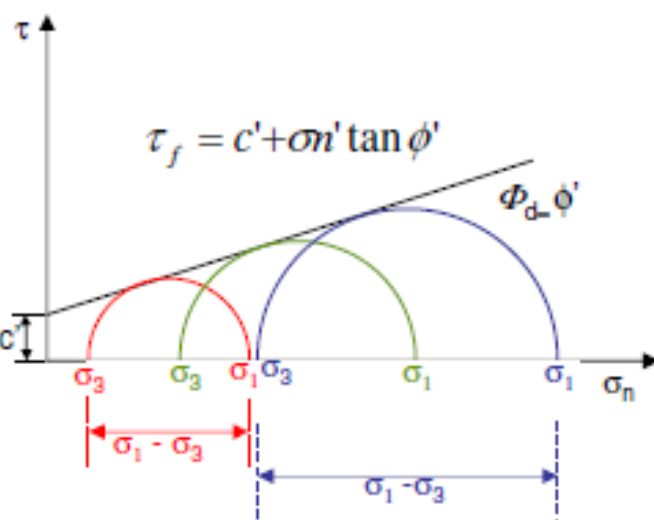
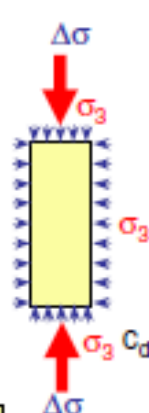
$\Delta\sigma$ Devijatorsko naprezanje



Čelijski tlak



$$\sigma_1 = \Delta\sigma + \sigma_3$$



Drenaža otvorena tokom konsolidacije

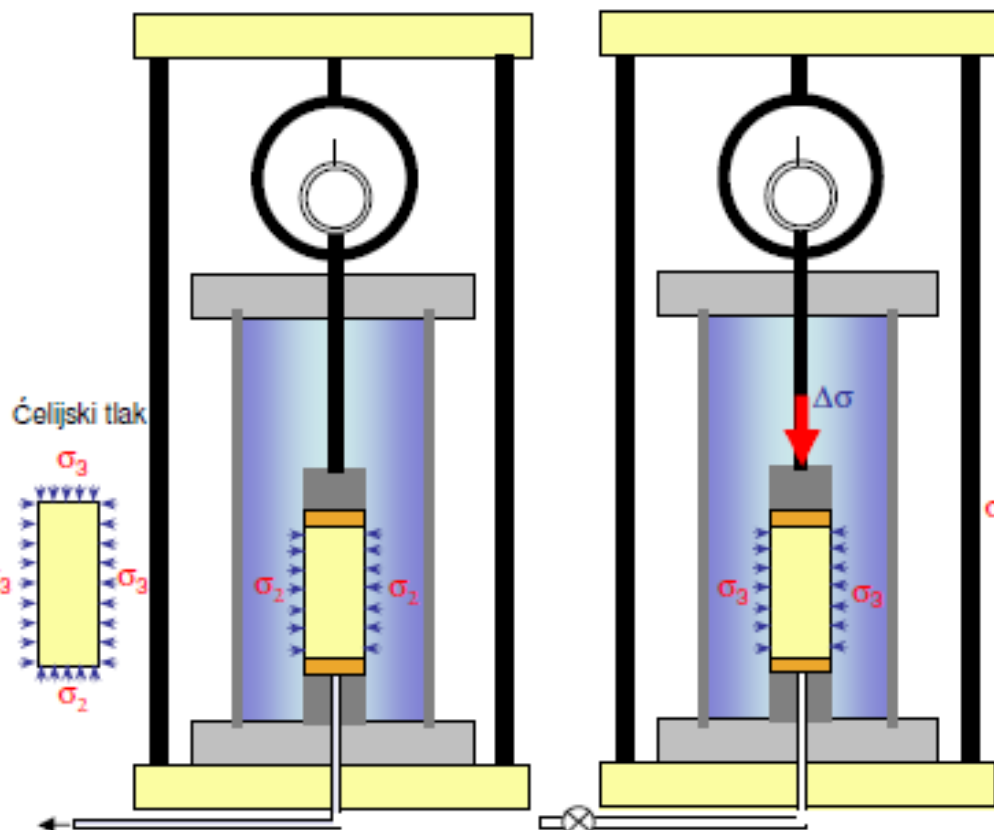
Drenaža otvorena tokom posmika

Troosni posmik

Konsolidirani nedrenirani pokus
(Consolidated Undrained Test (CU))

Prvi korak

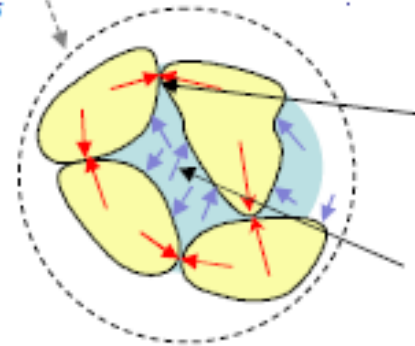
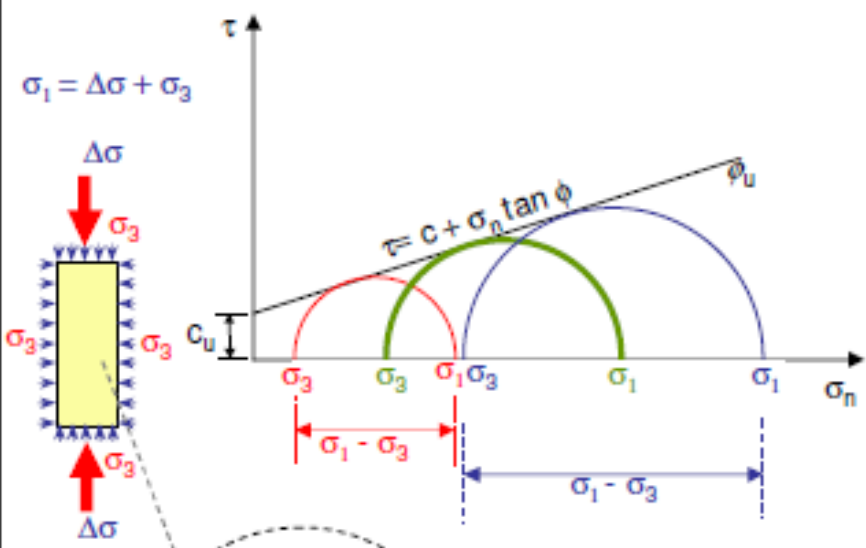
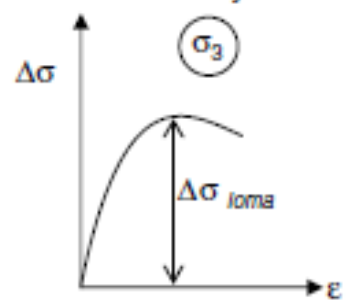
Drugi korak



Drenaža zatvorena tokom konsolidacije

Drenaža zatvorena tokom posmika
(mjeri se porni tlak)

$\Delta\sigma$ Devijatorsko naprezanje



Efektivna naprezanja na kontaktima zrna

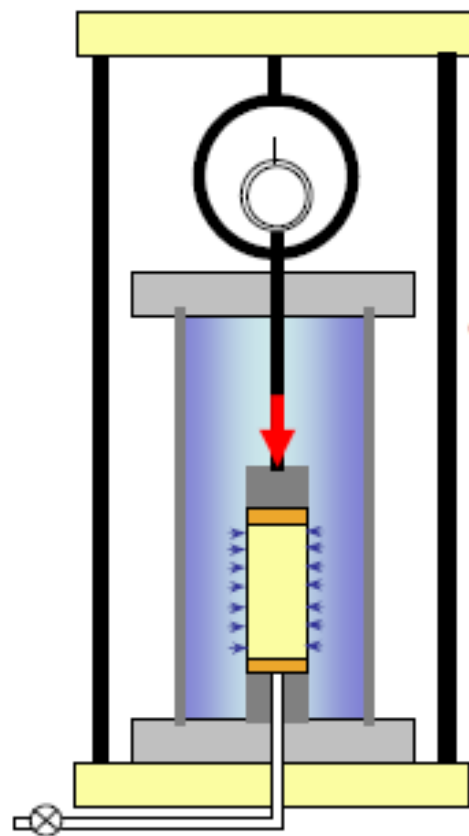
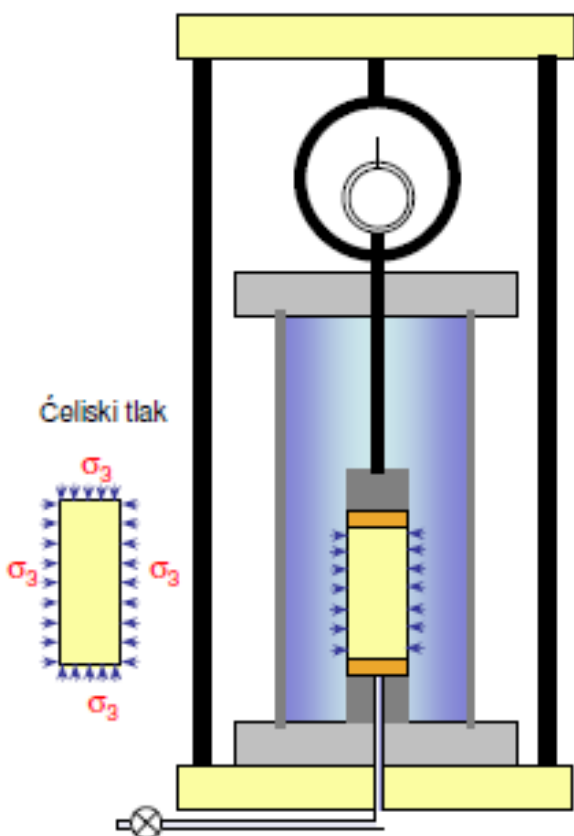
Mjeri se tlak vode u porama uzorka

Troosni posmik

Nekonsolidirani nedrenirani pokus
(Unconsolidated Undrained Test (UU))

Prvi korak

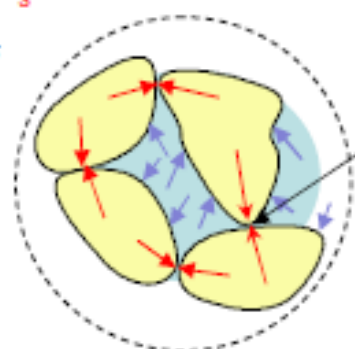
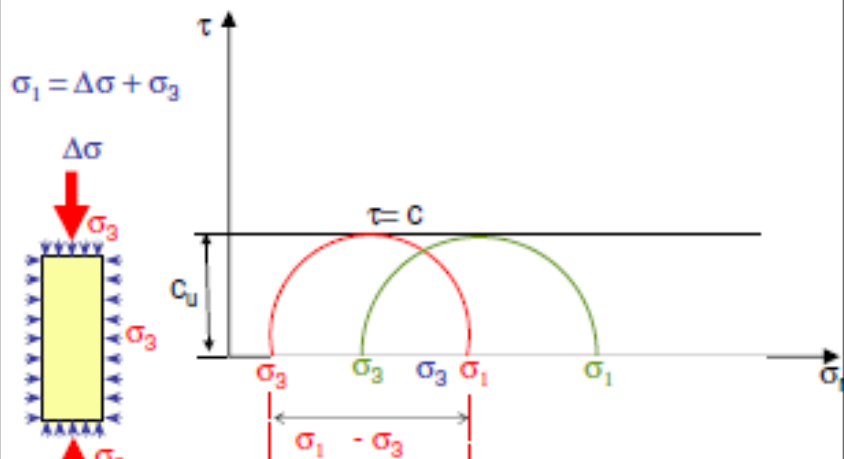
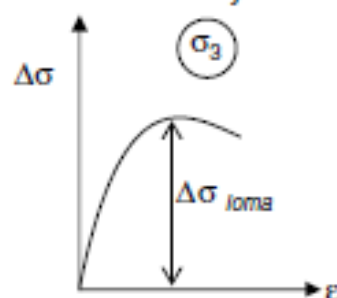
Drugi korak



Drenaža zatvorena tokom konsolidacije

Drenaža zatvorena tokom posmika

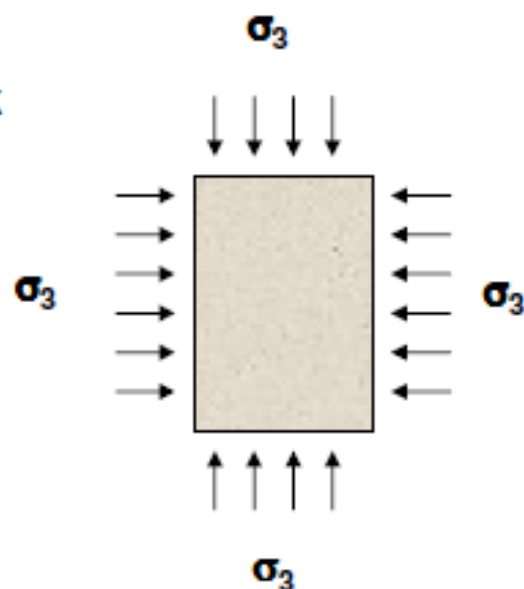
$\Delta\sigma$ Devijatorsko naprezanje



Tokom posmika
efektivna naprezanja
su stalna

Troosni posmik

Prvi korak



Postizanje ćelijskog tlaka

Jeli drenaža otvorena?

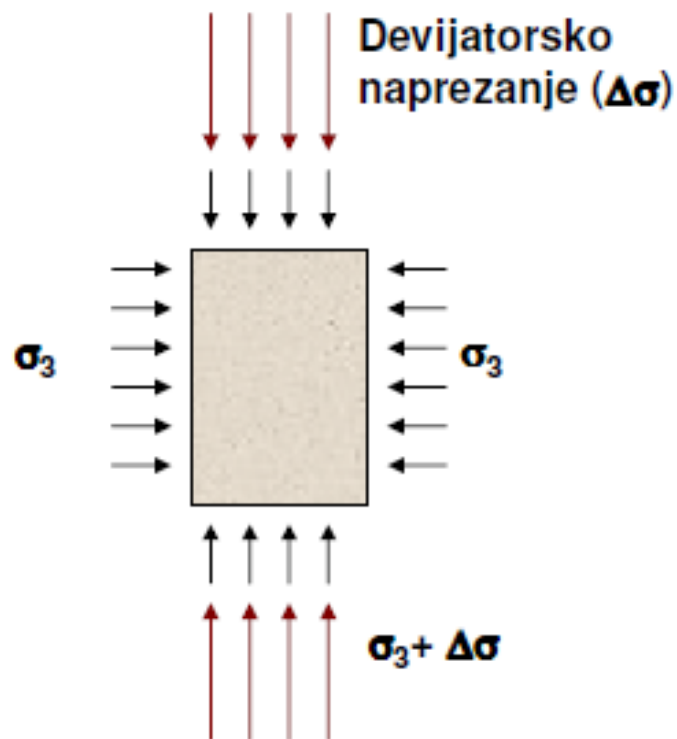
DA

Uzorak konsolidiran

NE

Uzorak ne konsolidiran

Drugi korak



Posmik (opterećenje)

Jeli drenaža otvorena?

DA

Dreniranje tokom opterećenja

NE

Tokom opterećenja nema dreniranja

Troosni posmik

Prvi korak

Postizanje ćelijskog tlaka

Jeli drenaža otvorena?

DA

Uzorak konsolidiran

NE

Uzorak ne konsolidiran

CD test

CU test

Drugi korak

Posmik (opterećenje)

Jeli drenaža otvorena?

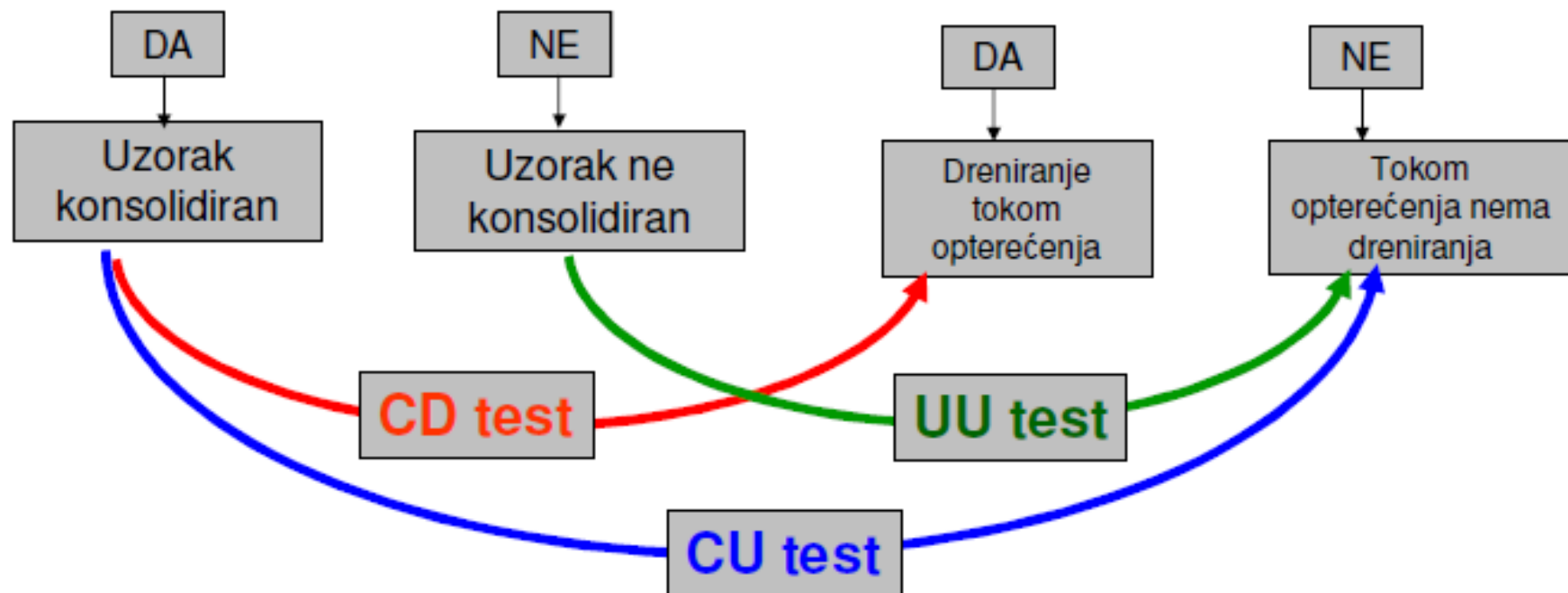
DA

Dreniranje tokom opterećenja

NE

Tokom opterećenja nema dreniranja

UU test



Konsolidirani drenirani pokus (CD Test)

Ukupno, σ

=

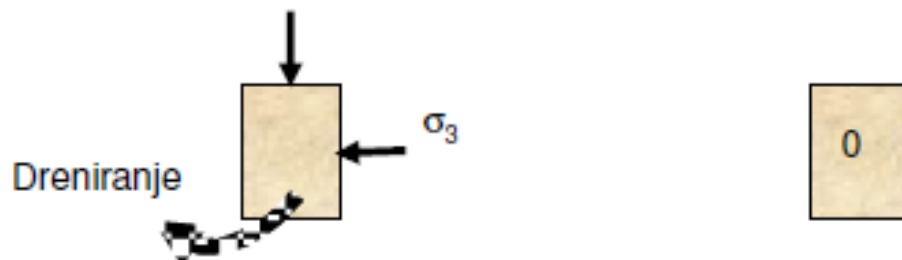
Porni tlak, u

+

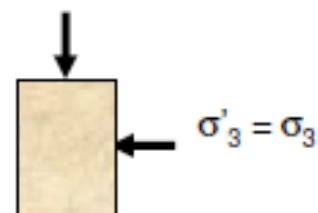
Efektivno n., σ'

Prvi korak: na kraju konsolidacije

$$\sigma_1 = \sigma_3$$

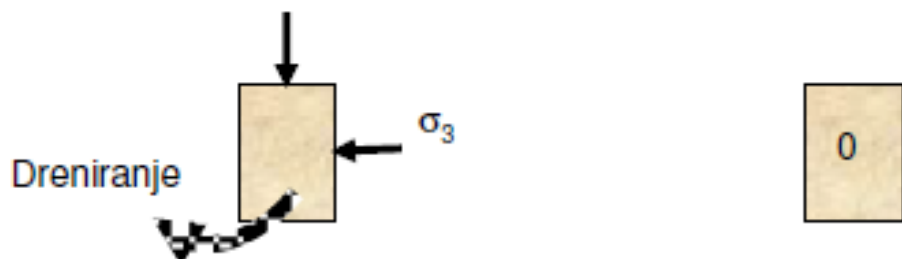


$$\sigma'_1 = \sigma_1 = \sigma_3$$

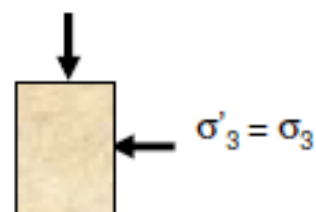


Drugi korak: Tokom aksijalnog opterećenja

$$\sigma_1 + \Delta\sigma$$

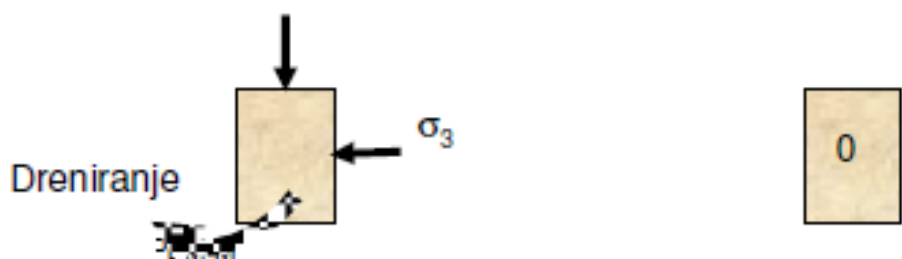


$$\sigma'_1 = \sigma_1 + \Delta\sigma$$

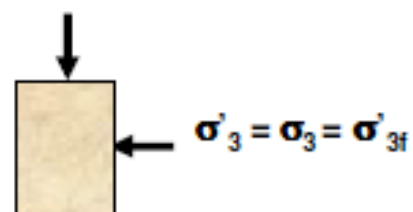


Korak 4: Tokom loma

$$\sigma_1 + \Delta\sigma_f$$

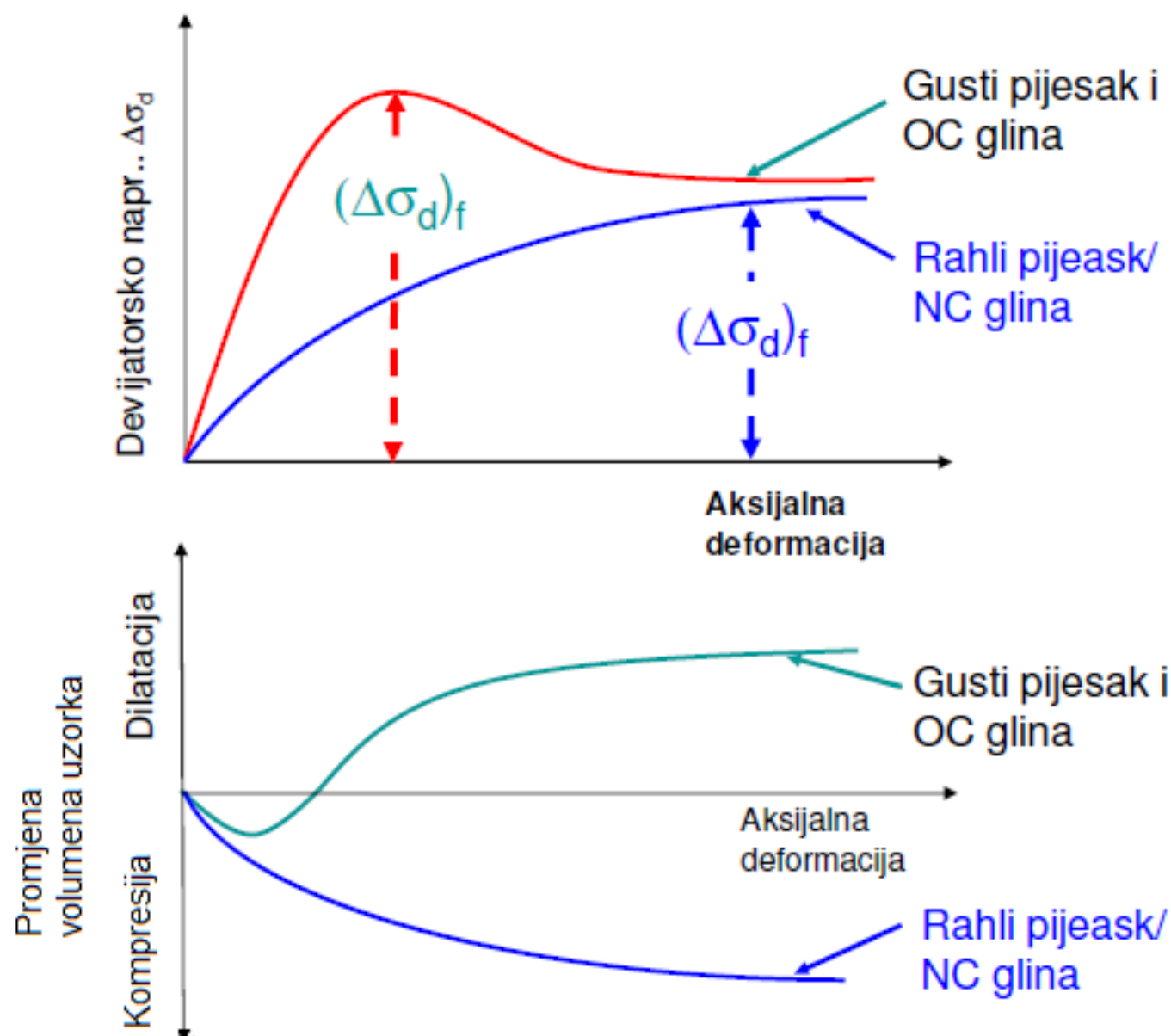


$$\sigma'_1 = \sigma_1 + \Delta\sigma_f = \sigma'_{1f}$$



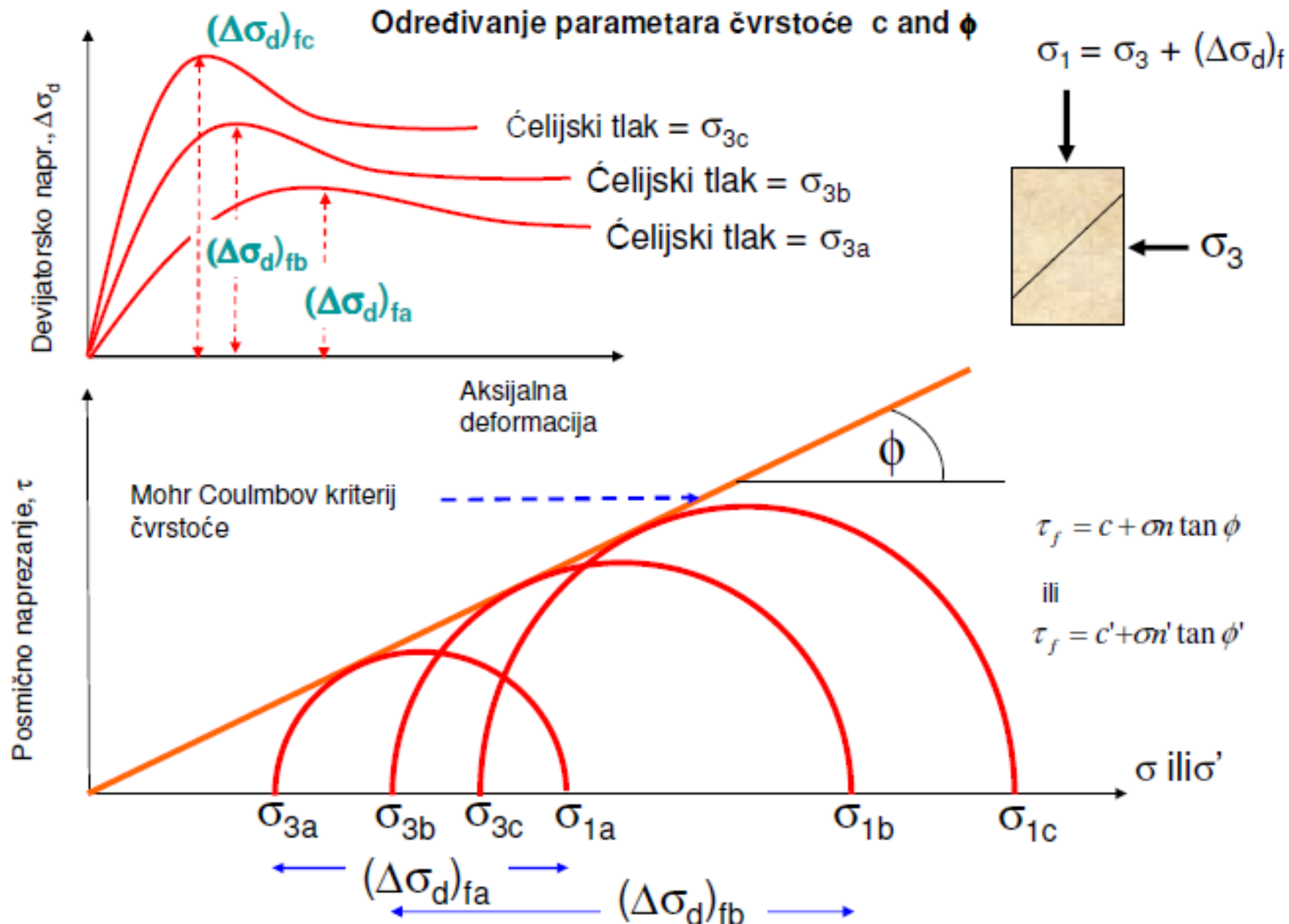
Konsolidirani drenirani pokus (CD Test)

Naponsko-deformacijski odnosi tokom posmika



Konsolidirani drenirani pokus (CD Test)

Određivanje parametara čvrstoće c and ϕ



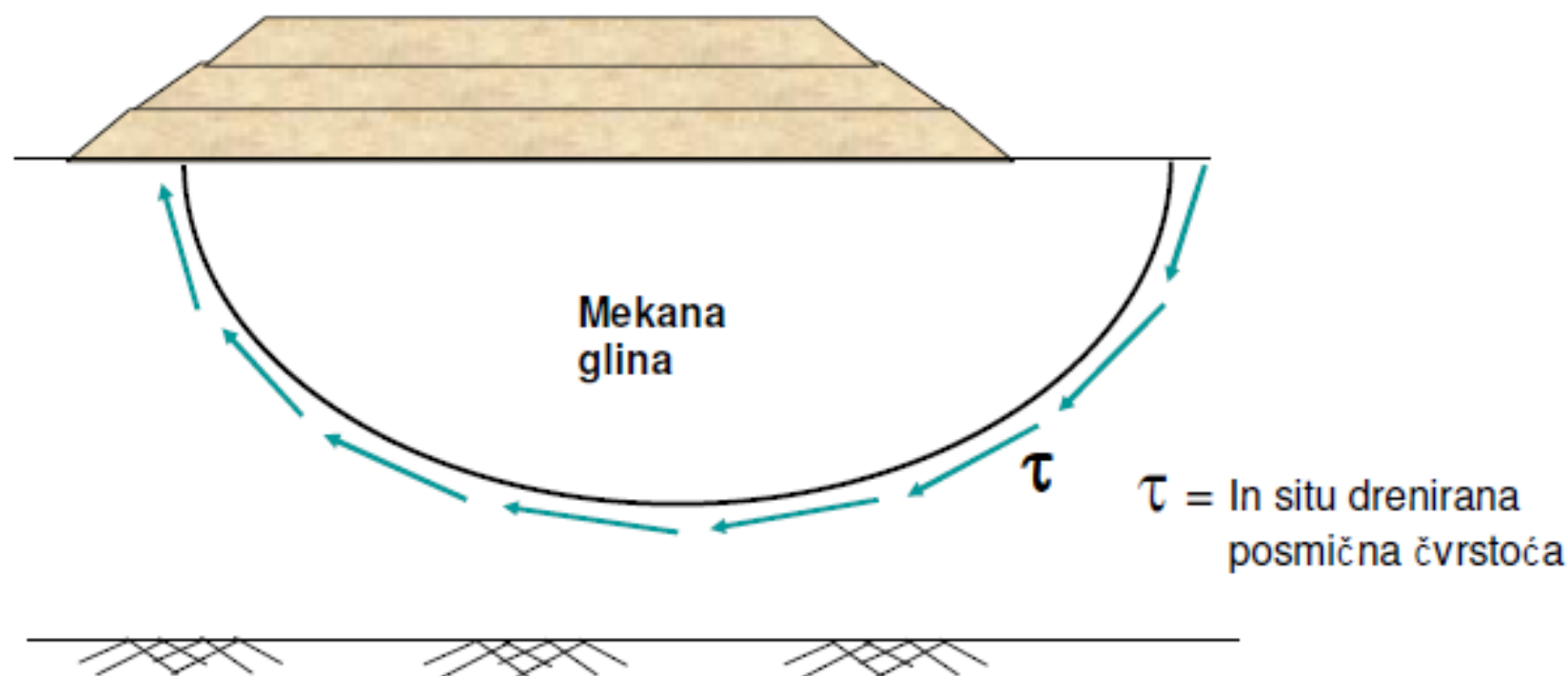
Konsolidirani drenirani pokus (CD Test)

Određivanje parametara čvrstoće c i ϕ'

- Tokom pokusa se ne generiraju porni tlakovi (drenaže otvorene) tada je $\sigma = \sigma'$
- Zbog toga je $C = C'$ i $\phi = \phi'$

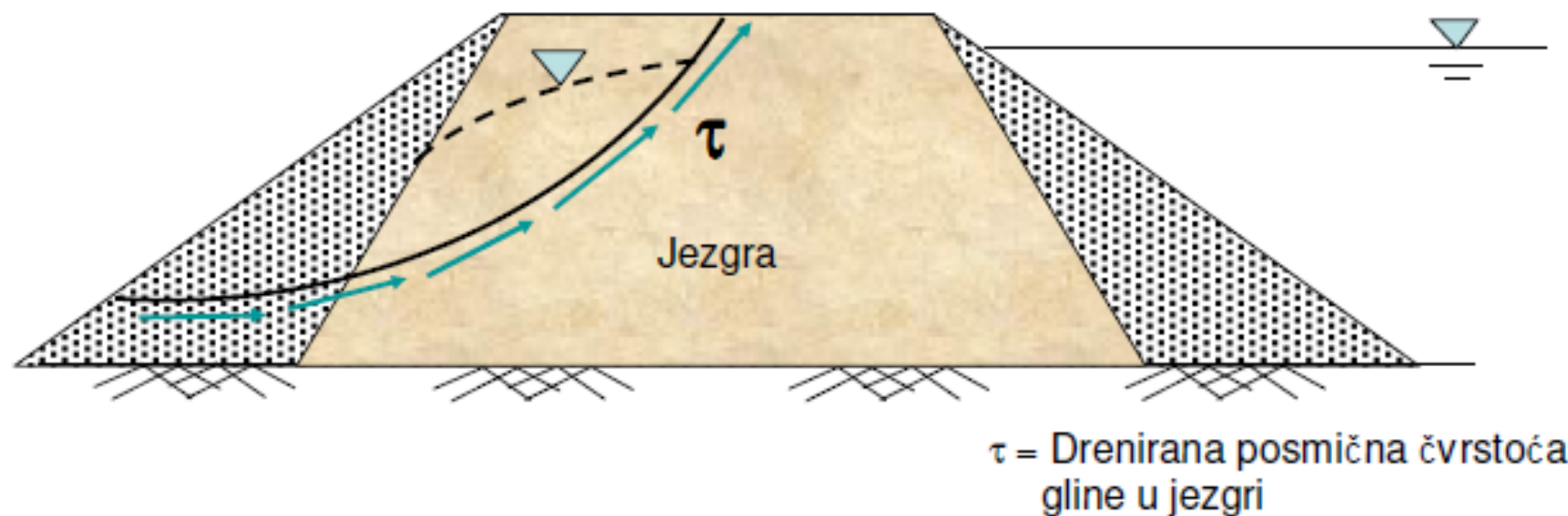
Praktični primjeri primjene CD parametara u glini

1. Vrlo spora izgradnja nasipa u slojevima na mekanoj glini



Praktični primjeri primjene CD parametara u glini

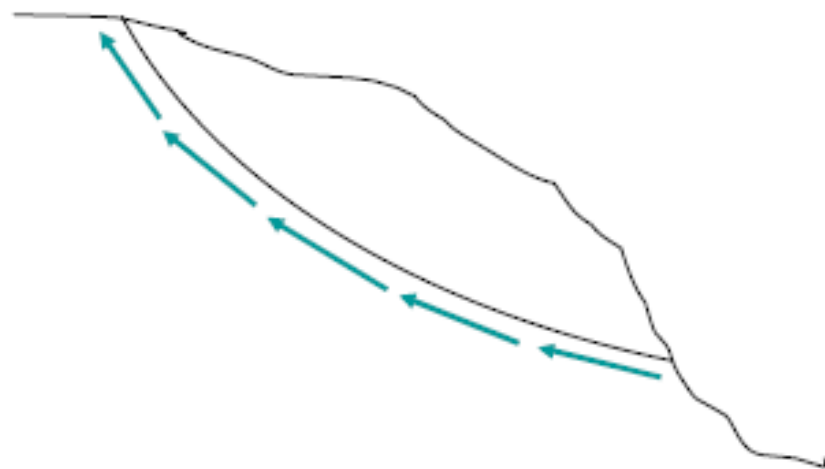
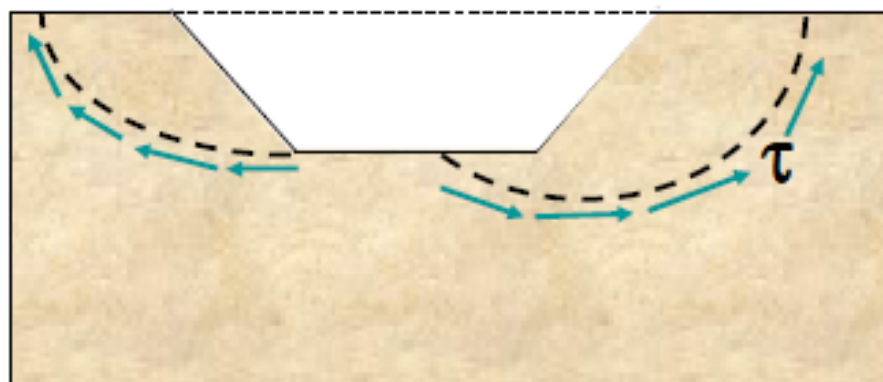
2. Zemljana brana sa stacionarnim strujanjem



Pri **stacionarnom strujanju** fluid se u odsustvu prepreke giba u paralelnim slojevima. Svaki fluid može protjecati stacionarno ako su ispunjeni određeni uslovi: da je brzina dovoljno malena i da su prepreke takve da ne uzrokuju suviše naglu promjenu brzine. Ako ti uslovi nisu ispunjeni, strujanje fluida se naziva **turbolentnim** strujanjem

Praktični primjeri primjene CD parametara u glini

3. Iskop prirodne kosine u glini



τ = In situ drenirana posmična čvrstoća

Napomena: CD pokus simulira dugotrajne uslove u tlu. Zato c_d i ϕ_d treba koristiti za procjenu dugotrajnog ponašanja tla

Konsolidirani nedrenirani pokus (CU Test)

Ukupno, σ

=

Porni tlak, u

+

Efektivno n., σ'

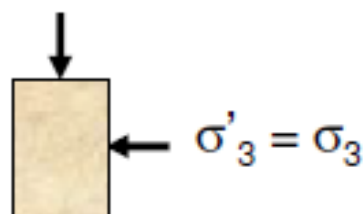
Prvi korak: na kraju konsolidacije

$$\sigma_1 = \sigma_3$$



0

$$\sigma'_1 = \sigma_1 = \sigma_3$$



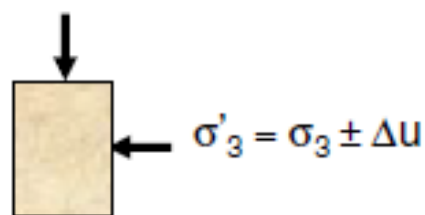
Drugi korak: Tokom aksijalnog opterećenja

$$\sigma_1 + \Delta\sigma$$



$\pm\Delta u$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 + \Delta\sigma \pm \Delta u$$



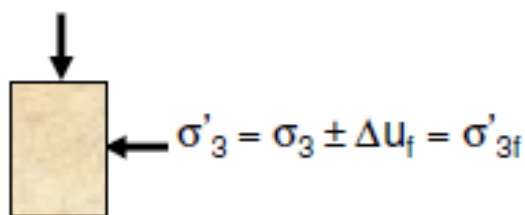
Korak 4: Tokom loma

$$\sigma_1 + \Delta\sigma_f$$



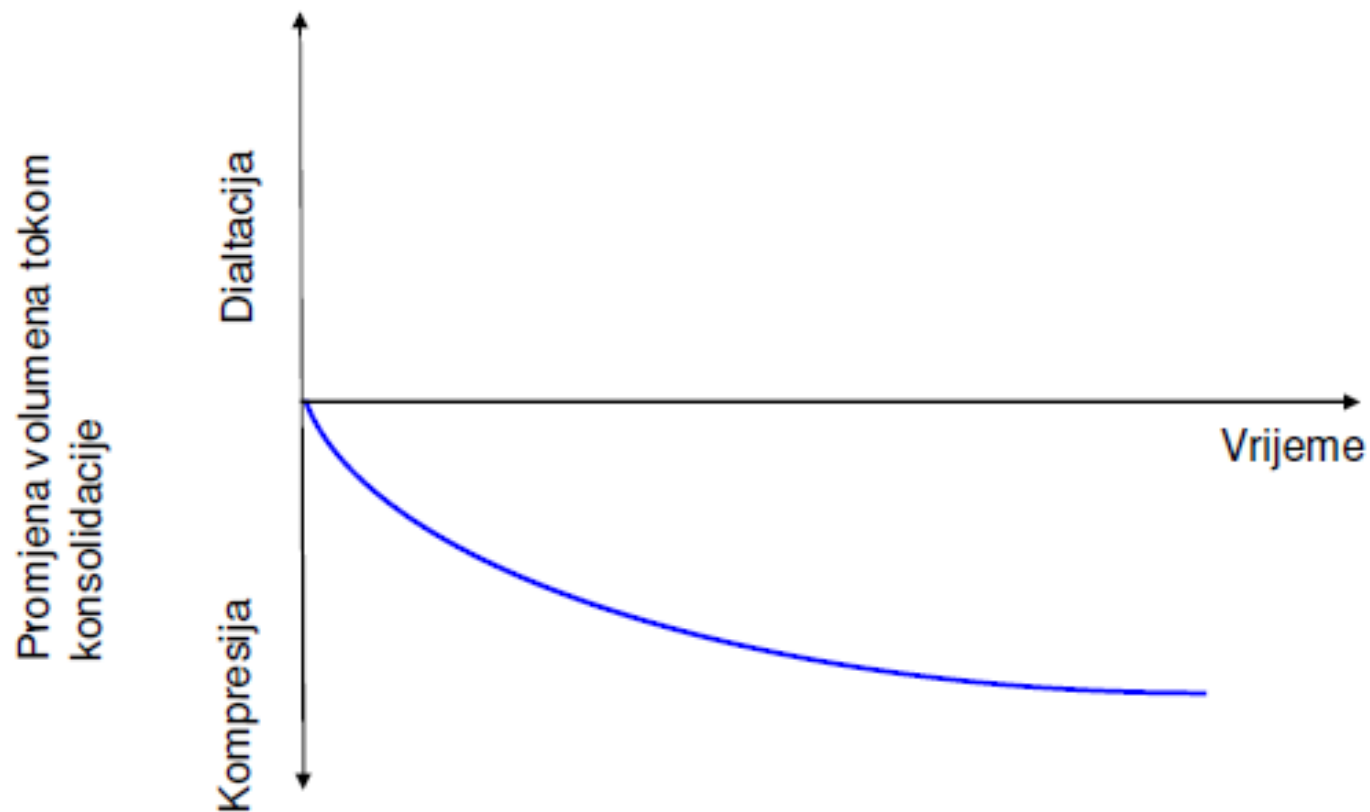
$\pm\Delta u_f$

$$\sigma'_1 = \sigma_1 + \Delta\sigma_f \pm \Delta u_f = \sigma'_{1f}$$



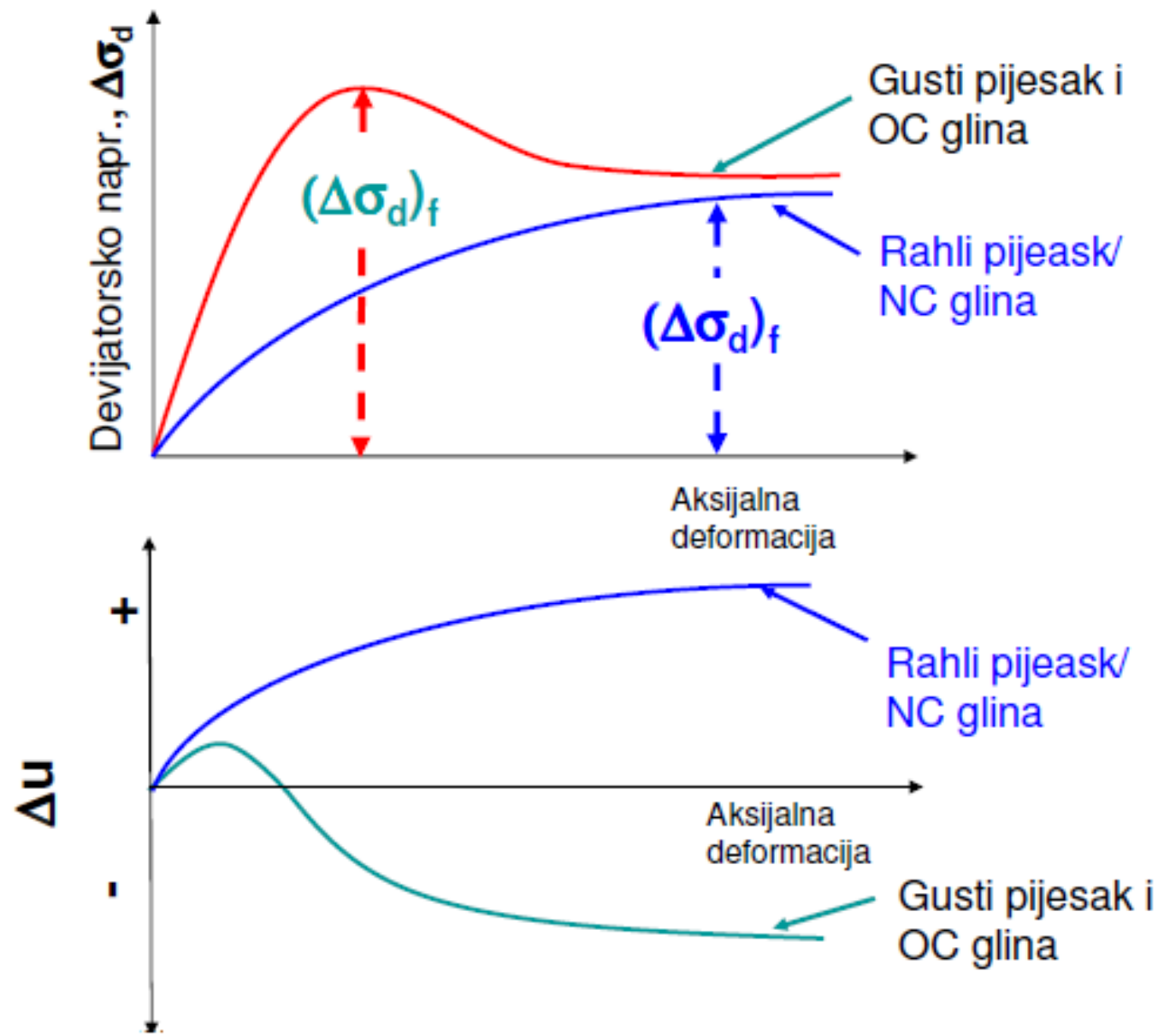
Konsolidirani nedrenirani pokus (CU Test)

Promjena volumena tokom konsolidacije



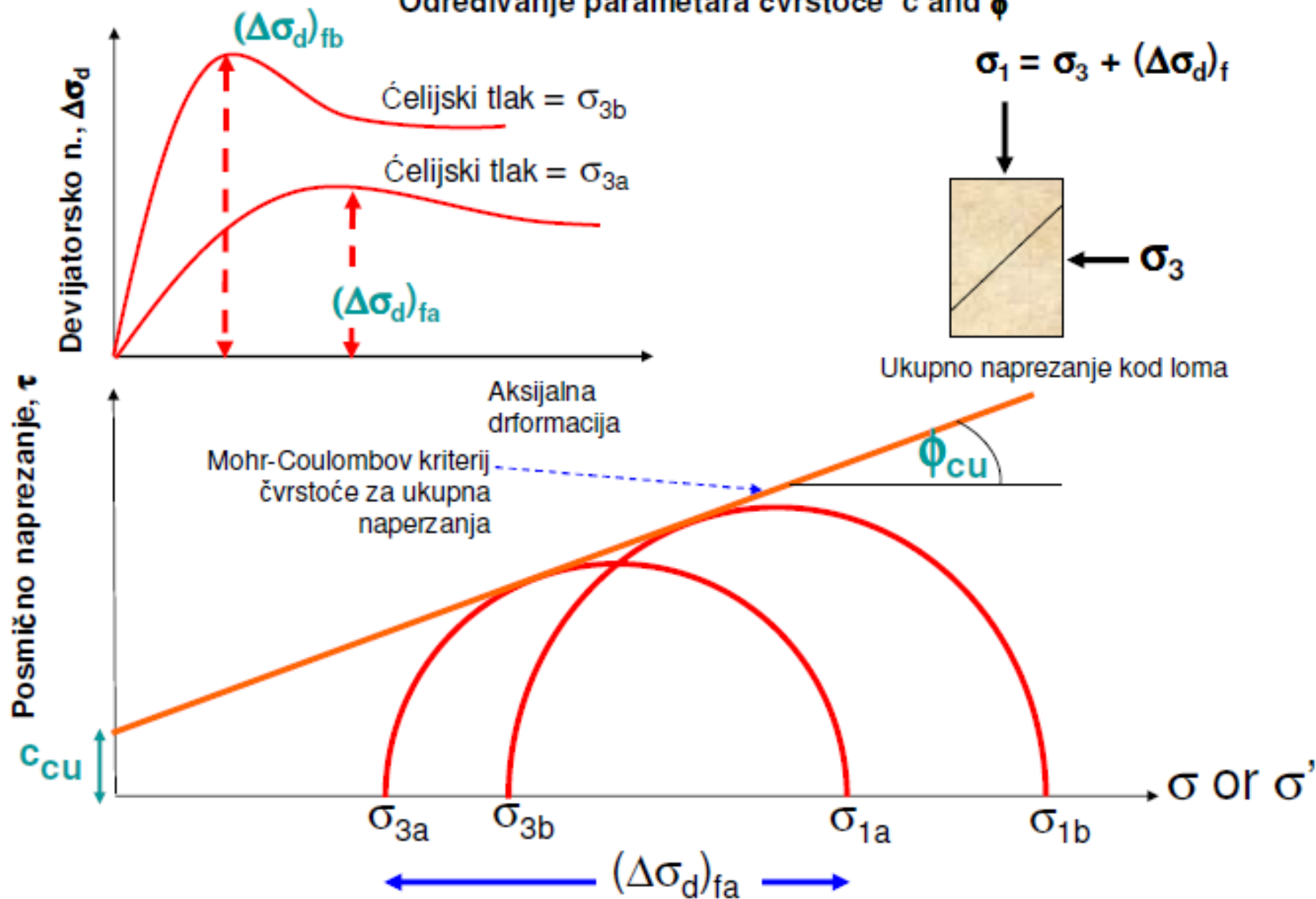
Konsolidirani nedrenirani pokus (CU Test)

Naponsko-deformacijski odnosi tokom posmika



Konsolidirani nedrenirani pokus (CU Test)

Određivanje parametara čvrstoće c and ϕ



CU pokus

Određivanje parametara čvrstoće c and ϕ

$$\sigma'_1 = \sigma_3 + (\Delta\sigma_d)_f - u_f$$

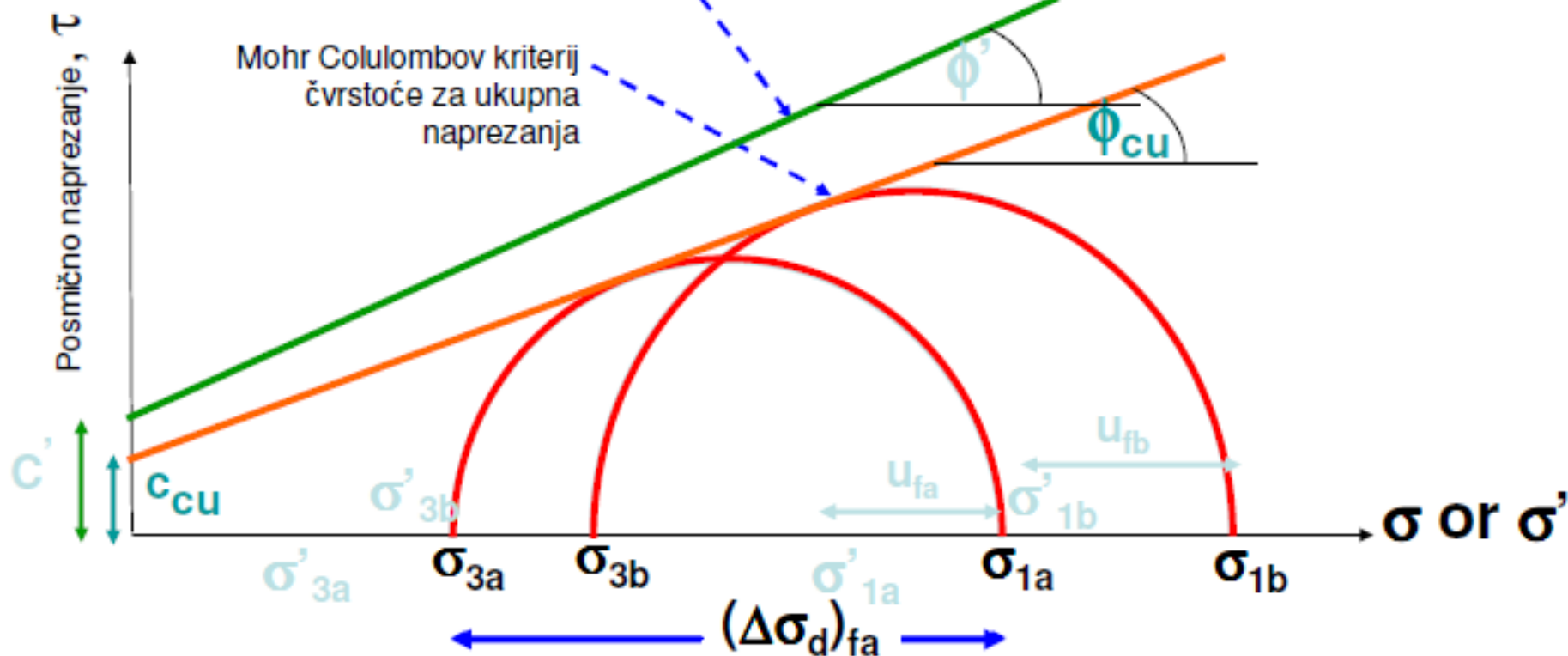


$$\sigma'_3 = \sigma_3 - u_f$$

Mohr Colulombov kriterij
čvrstoće za efektivna
naprezanja

Lom pri efektivnim naprežanjem

Mohr Colulombov kriterij
čvrstoće za ukupna
naprezanja



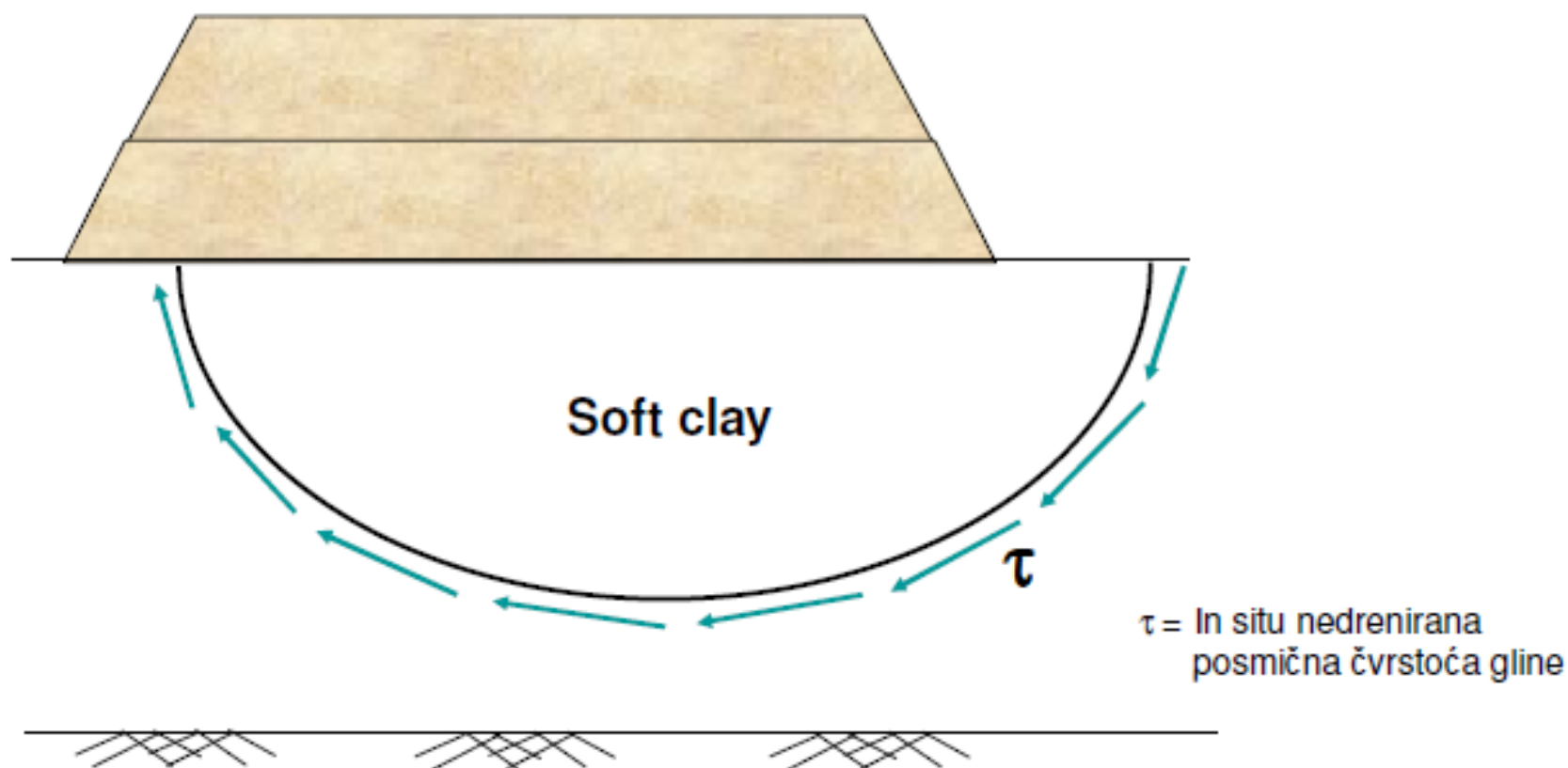
CU pokus

Određivanje parametara čvrstoće c i ϕ'

- Parametri posmične čvrstoće u obliku ukupnih naprezanja su C_{cu} i ϕ_{cu}
- Parametri posmične čvrstoće u obliku efektivnih naprezanja su c' i ϕ'
- $c' = C_d$ i $\phi' = \phi_d$

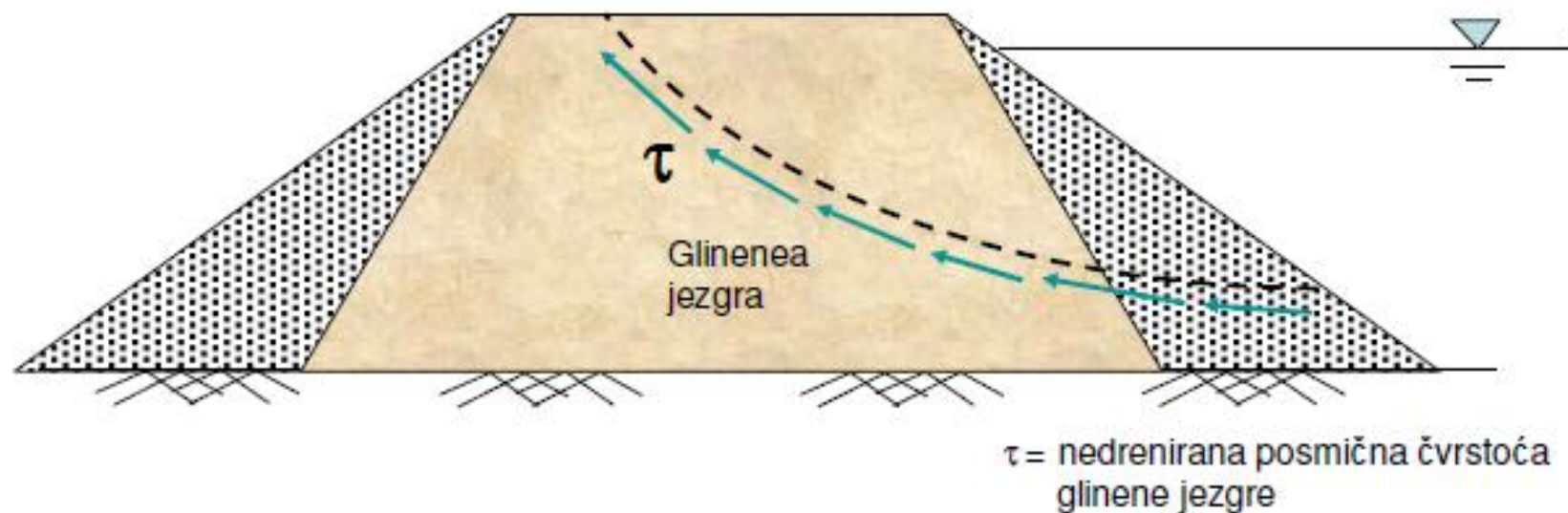
Praktični primjeri primjene CU parametara u glini

2. Zemljana brana brzo građena na mekanoj glini



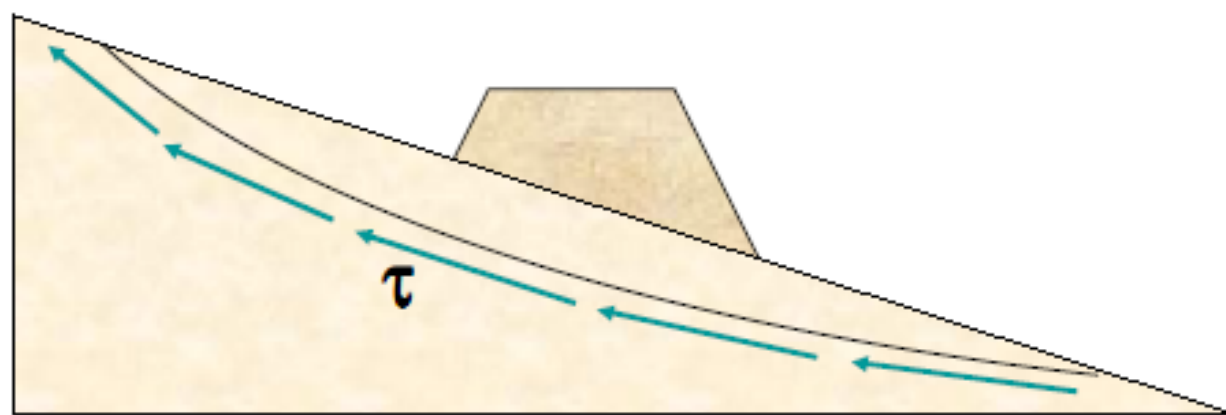
Praktični primjeri primjene CU parametara u glini

2. Brzo pražnjenje jezera



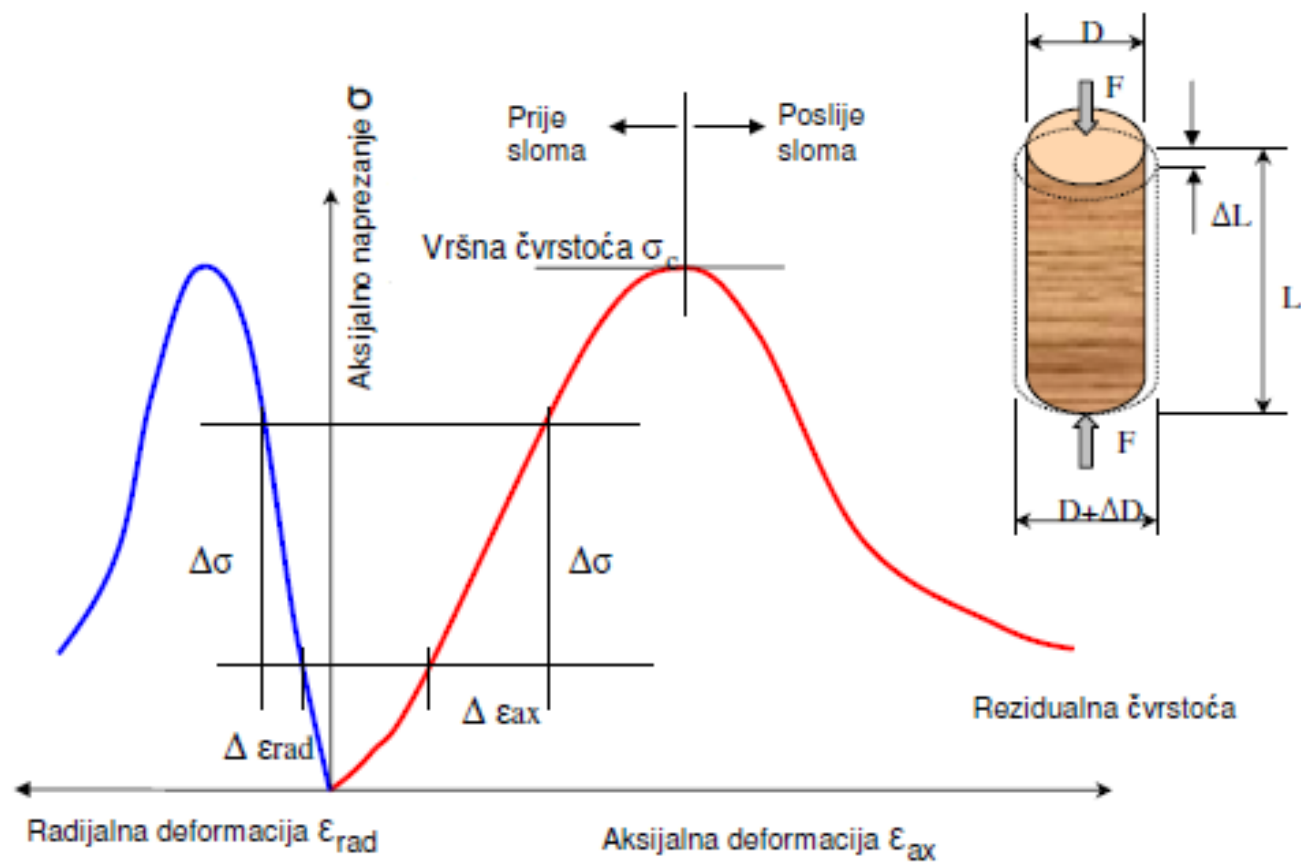
Praktični primjeri primjene CU parametara u glini

3. Brza izgradnja nasipa na prirodnom terenu



τ = In situ nedrenirana posmična čvrstoća gline

Napomena: Parametri dobiveni iz ukupnih naprezanja CU pokusa (c_{cu} and ϕ_{cu}) mogu se koristiti za analizu stabilnosti kada je tlo potpuno konsolidirano pod djelovanjem postojećih naprezanja. Nakon toga se, iz nekog razloga, brzo pojave dodatna naprezanja pri čemu se ne događa dreniranje (nema vremena za dreniranje)



$$\epsilon_{ax} = \frac{\text{Skracenje duzine}}{\text{Duzina uzorka}} = \frac{\Delta L}{L}$$

Vršna čvrstoća

$$\sigma_c = \frac{F_{max}}{A} \left[\frac{kN}{m^2} \right] = [kPa]$$

Youngov modul

$$E = \frac{\Delta \sigma}{\Delta \epsilon_{ax}} \left[\frac{kPa}{m^2} \right] = [kPa]$$

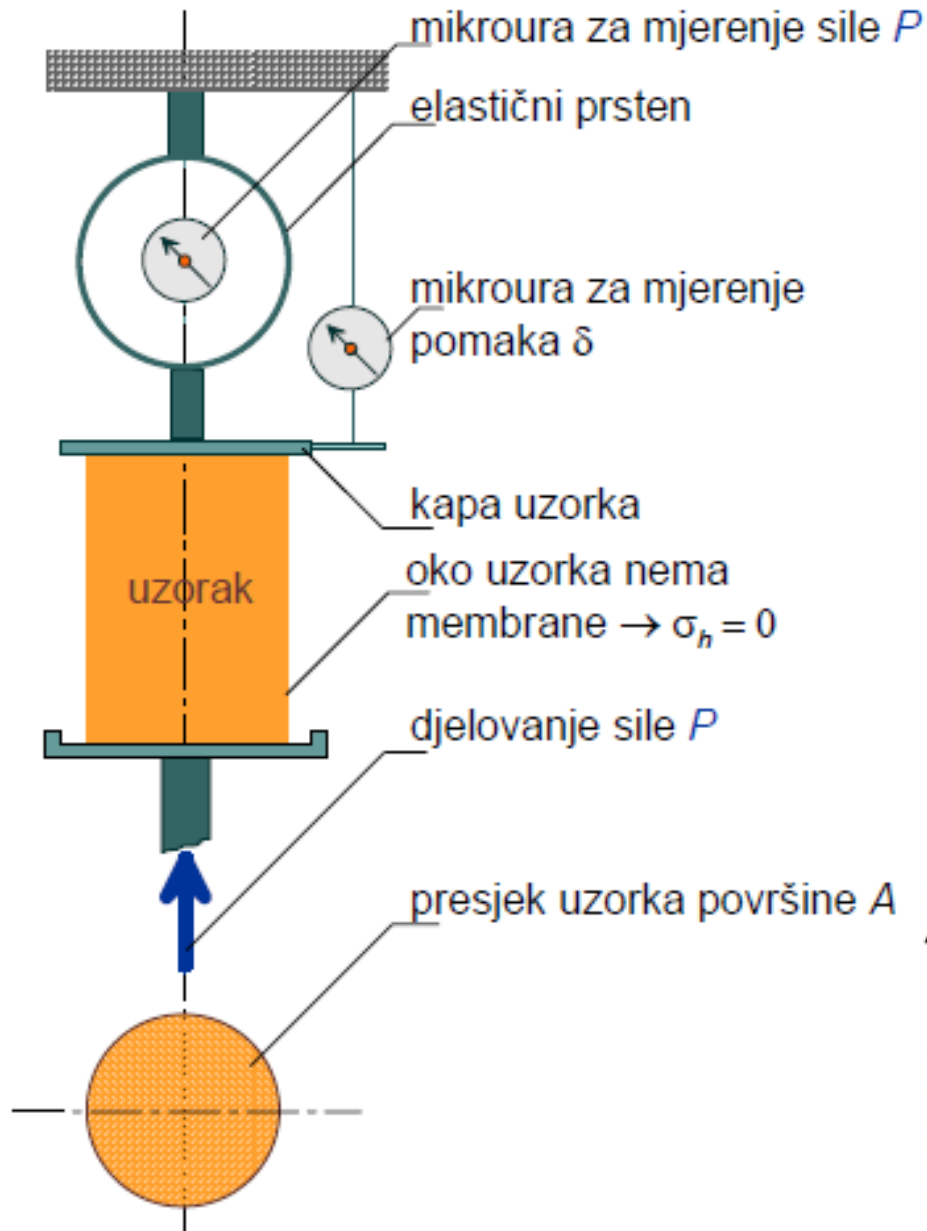
$$\epsilon_{rad} = \frac{\text{Povecanje promjera}}{\text{Pocetni promjer}} = \frac{\Delta D}{D}$$

Poissonov koeficijent

$$\nu = \frac{\Delta \epsilon_{rad}}{\Delta \epsilon_{ax}}$$

$$A = \left(\frac{D^2 \pi}{4} \right) [m^2]$$

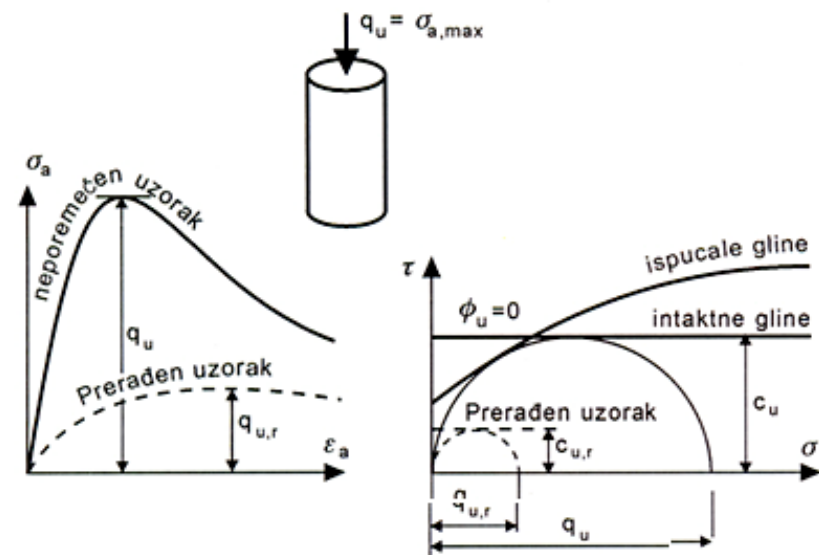
OPIT JEDNOAKSIJALNE KOMPRESIJE (POSMIKA)



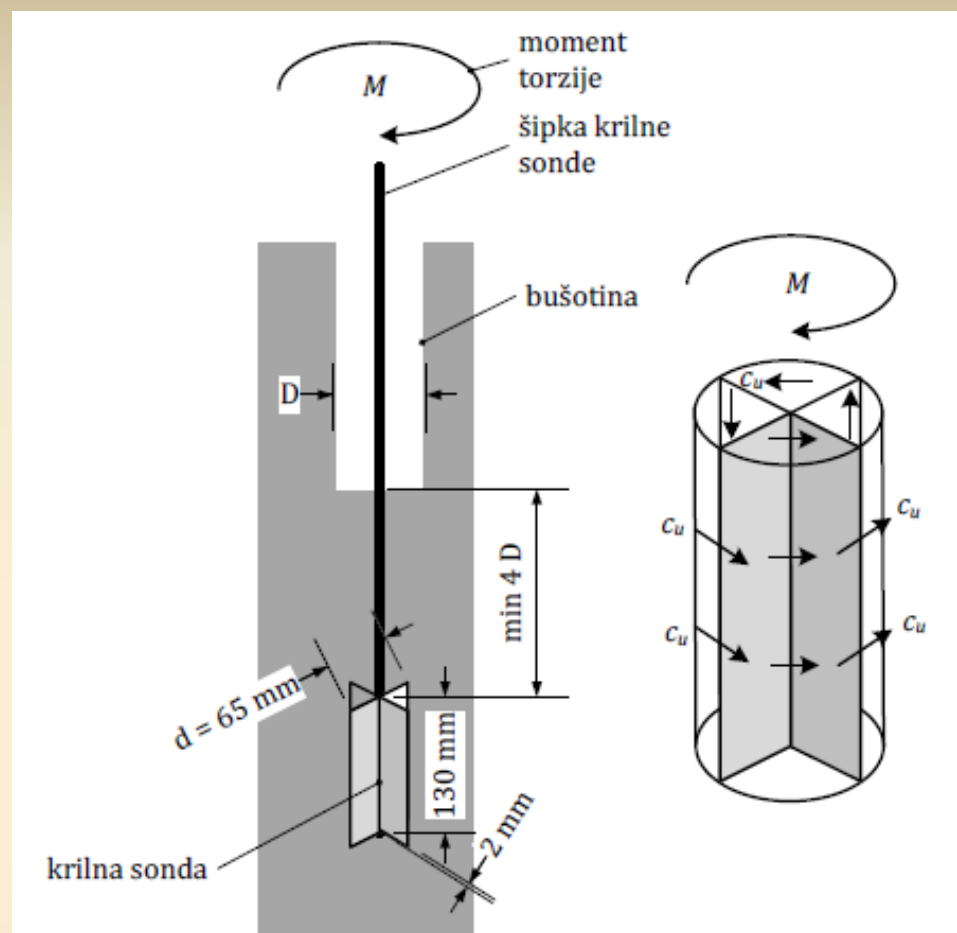
Schema uređaja za jednoosni posmik

Opit se najčešće provodi na neporemećenim uzorcima vodom zasićenih sitnozrnih materijala uzetih iz terena

Krupnozrna nevezana tla (pijesak, šljunak i kameni nabačaj) nemaju jednoaksijalnu čvrstoću



KRILNA SONDA

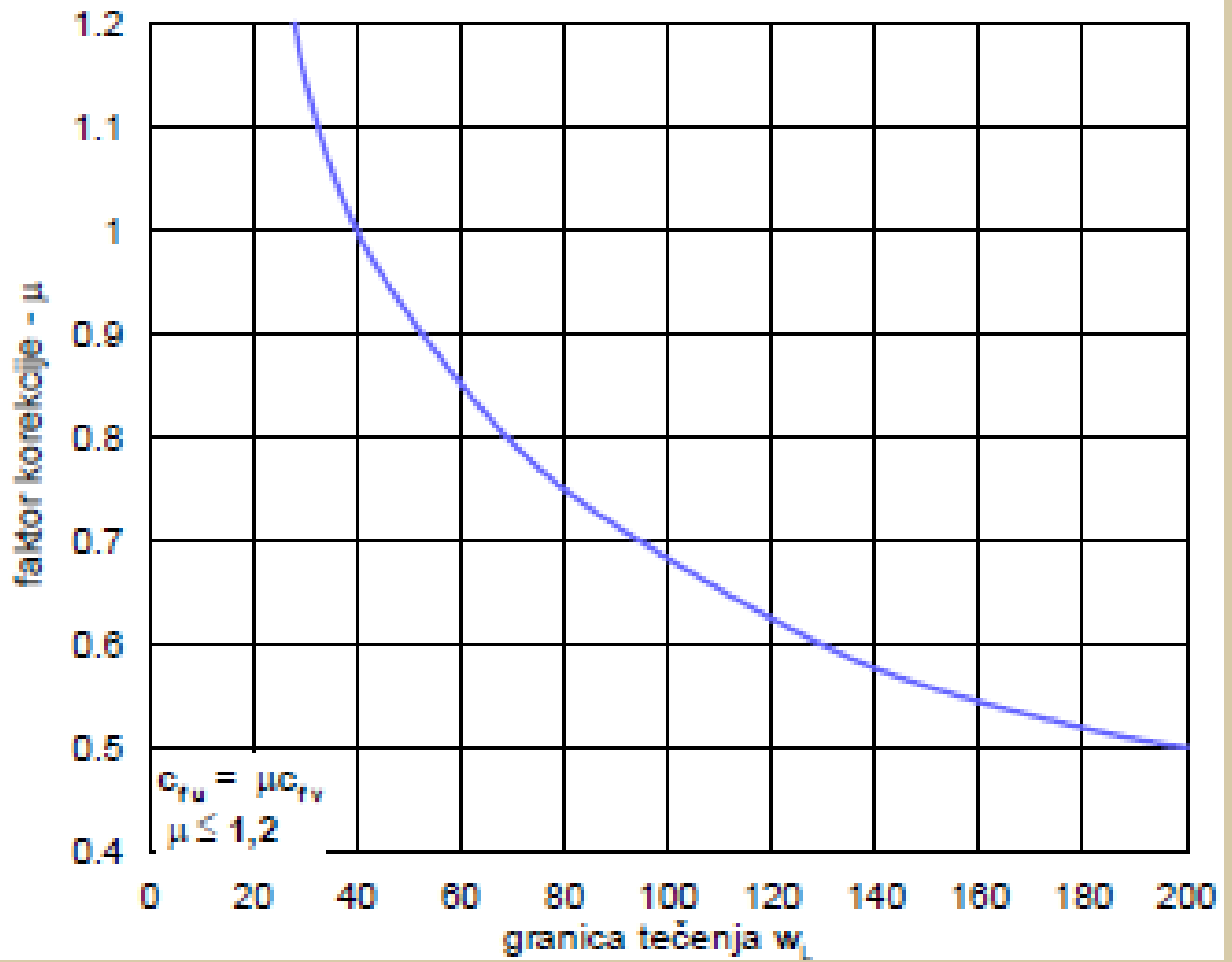


$$M = c_{fv} \cdot \left(2 \cdot \frac{2}{3} \cdot \frac{d}{2} \cdot \frac{d^2 \cdot \pi}{4} + d \cdot h \cdot \pi \cdot \frac{d}{2} \right)$$

$$\tau_f = c_{fv} = \frac{2M}{\pi d^2 \left(h + \frac{d}{3} \right)} = 0,273 \cdot \frac{M}{d^3}$$

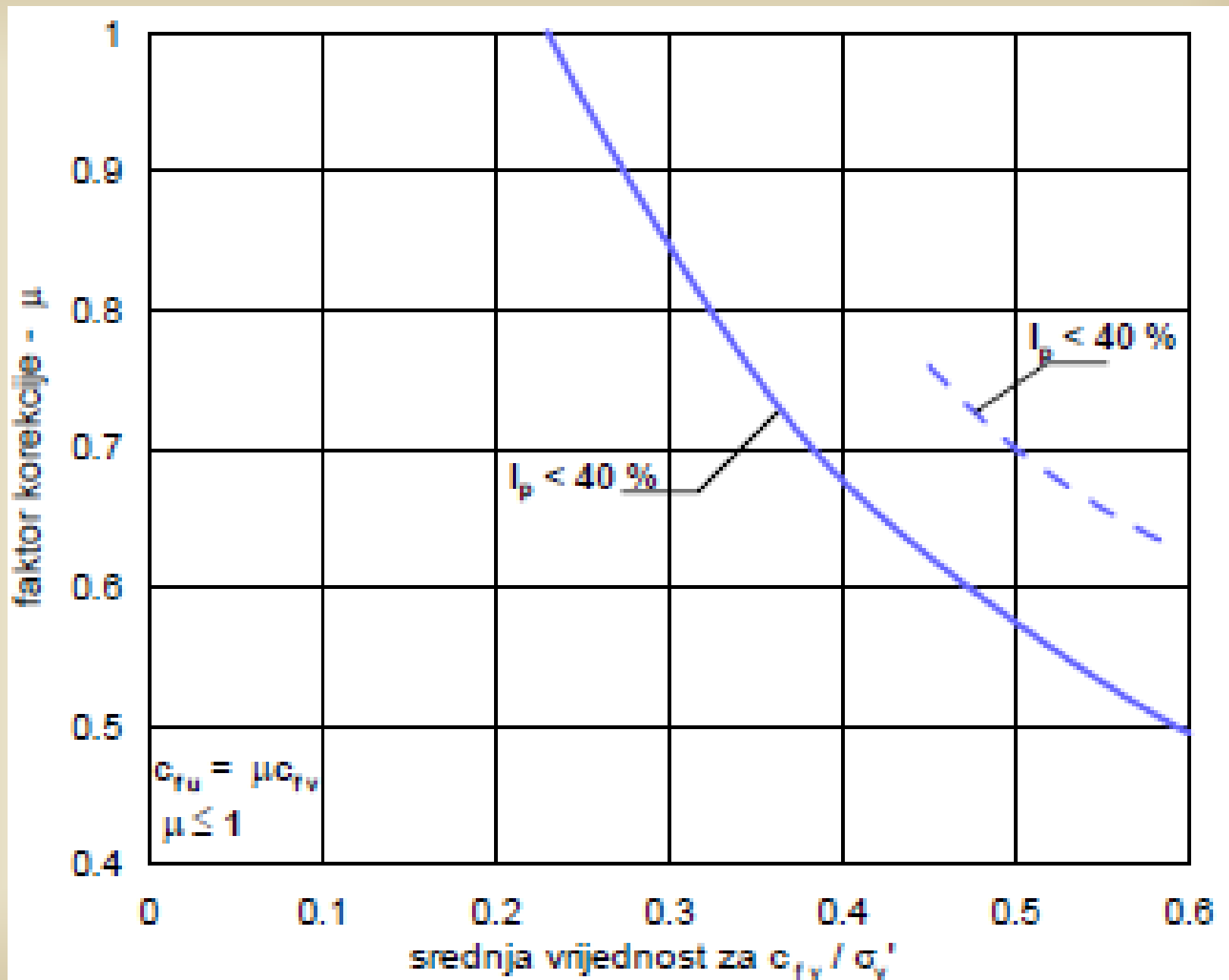
KRILNA SONDA

Popravni koeficijent c_{fv} , za normalno konsolidovanu glinu



KRILNA SONDA

Popravni koeficijent c_{fv} , za
prekonsolidovanu glinu



SMIČUĆA ČVRSTOĆA REALNOG TLA

Smičuća čvrstoća nije neka konstanta za jedno tlo, već se mora uvijek naglasiti o kakvoj se čvrstoći radi.

Za jedan nivo totalnih napona nedrenirana čvrstoća može biti i veća i manja od drenirane, zavisno od tendencije tla da mijenja zapreminu tokom nanošenja smičućih napona.

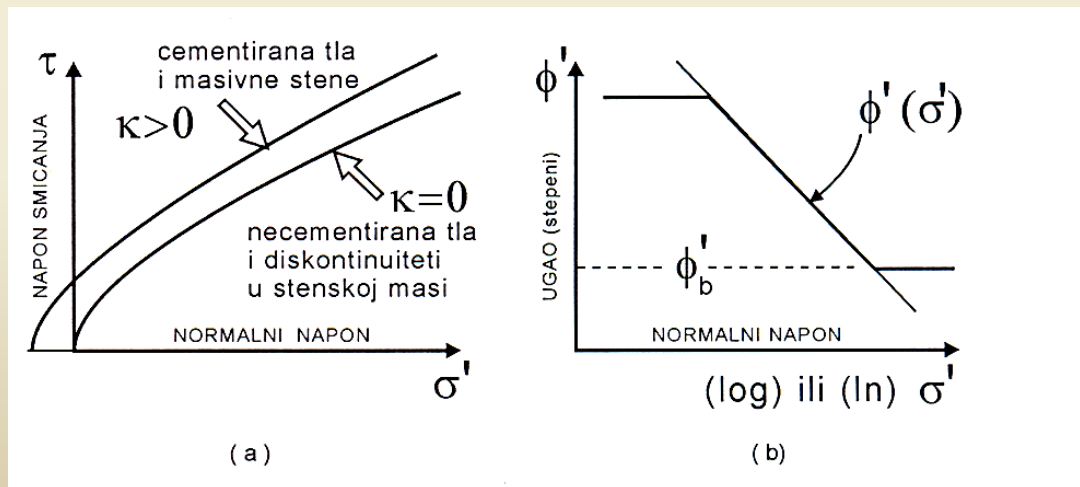
KRITZERIJUMI LOMA. Eksperiment su pokazali da linearna Mor-Kulonova zavisnost može biti, manje ili više, prihvatljiva aproksimacija rezultata u relativno širokom području efektivnih napona.

Izraz paraboličkog tipa, koji je predložio Yaroshenko (1967.), a izgleda da se nepravredno pripisuje i nekim drugim autorima (de Mello, 1977.), ima oblik:

$$\tau_f = A\sigma^b$$

tako da je sekantni ugao smičuće otpornosti za isti efektivni normalni napon:

$$\tan\phi' = \frac{\tau_f}{\sigma_n} = Ab(\sigma_n')^{b-1} \quad \text{A i b su empirijske konstante.}$$



Karakteristični tipovi opisa nelinearnih anvelopa napona loma

Leps (1970.) prikazuje linearnu zavisnost u polulogaritamskom dijagramu, a ubrzo nakon toga Nobari i Duncan (1972.) koriste polulogaritamski opis u obliku:

$$\phi = \phi_0 - \Delta\phi \log \frac{\sigma_3}{p_a}$$

ϕ_0 - vrijednost ugla za $\sigma_3 = p_a$, pri čemu je p_a atmosferski pritisak
 $\Delta\phi$ - promjena ugla za jedan logaritamski ciklus promjene minimalnog glavnog napona.

Za ugla smičuću otpornost diskontinuiteta u stijeni se najčešće koristi kriterijum logaritamskog tipa (Barton 1977), tako da Barton i Kjaernsli (1981) predlažu analogni izraz za čvrstoću kamenog nabačaja u obliku:

$$\phi' = \phi'_B - R \log \frac{S}{\sigma'_n}$$

ϕ'_B - bazni ugao trenja.
 R - zavisi od hrapavosti zrna i poroznosti,
 S - mjera ekvivalentne čvrstoće zrna.

Opis smičuće čvrstoće izražena preko efektivnih napona bi trebalo da zadovolji sljedeće uslove:

- da bude primjenljiv u ukupnom području od nultog nivoa do veoma velikih pritisaka,
- da bude primjenljiv za sva tla, ili bar većinu tipova tla,
- da bude matematički jednostavan,
- da parametri imaju jasno fizičko značenje koje proističe iz eksperimenta, a da je u skladu sa prihvaćenim osnovnim konceptima postojećih teorija.

DRENIRANI USLOVI – EFEKTIVNI NAPONI

Ako uzmemo da se ugao smičuće otpornosti definiše kao sekantna vrijednost u funkciji normalnog napona. Zbog toga se smičuća čvrstoća opisuje izrazom:

$$\tau_f = \sigma'_n \tan \phi'_s \quad \phi'_s \text{ nije konstantna vrijednost za dato tlo već zavisi od normalnog napona.}$$

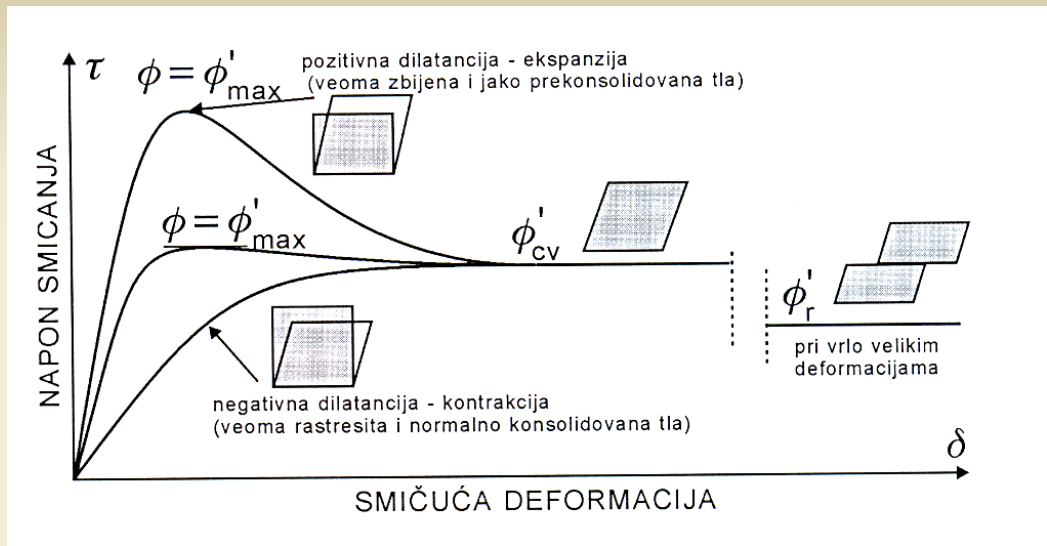
Ugao smičuće otpornosti izražen glavnim naponima pri lomu je:

$$\sin \phi'_s = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f}{(\sigma'_1 + \sigma'_3)_f} = \frac{\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}\right)_f - 1}{\left(\frac{\sigma'_1}{\sigma'_3}\right)_f + 1}$$

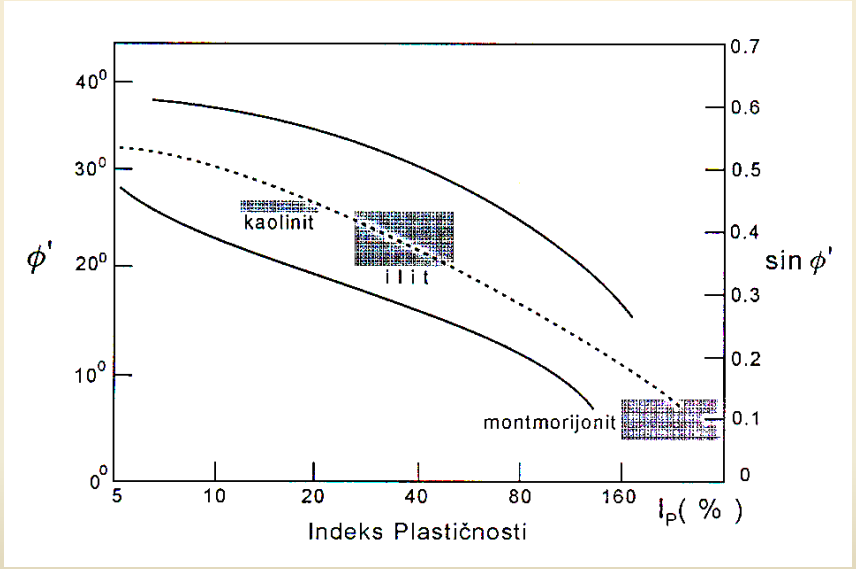
Ugao smičuće otpornosti necementiranog tla može se, na intuitivnoj osnovi, bar simbolično, prema Koerneru (1968), opisati zbirom:

$$\phi' = \phi'_\mu + \phi'_{\text{deg}} + \phi'_{\text{reor}} + \psi$$

ϕ'_μ - ugao fizičkog trenja između mineralnih zrna
 ϕ'_{deg} - ugao uslijed degradacije ili drobljenja zrna
 ϕ'_{reor} - ugao uslijed promjene orijentacije zrna
 ψ - ugao doprinosa dilatacije ili promjene zapremine

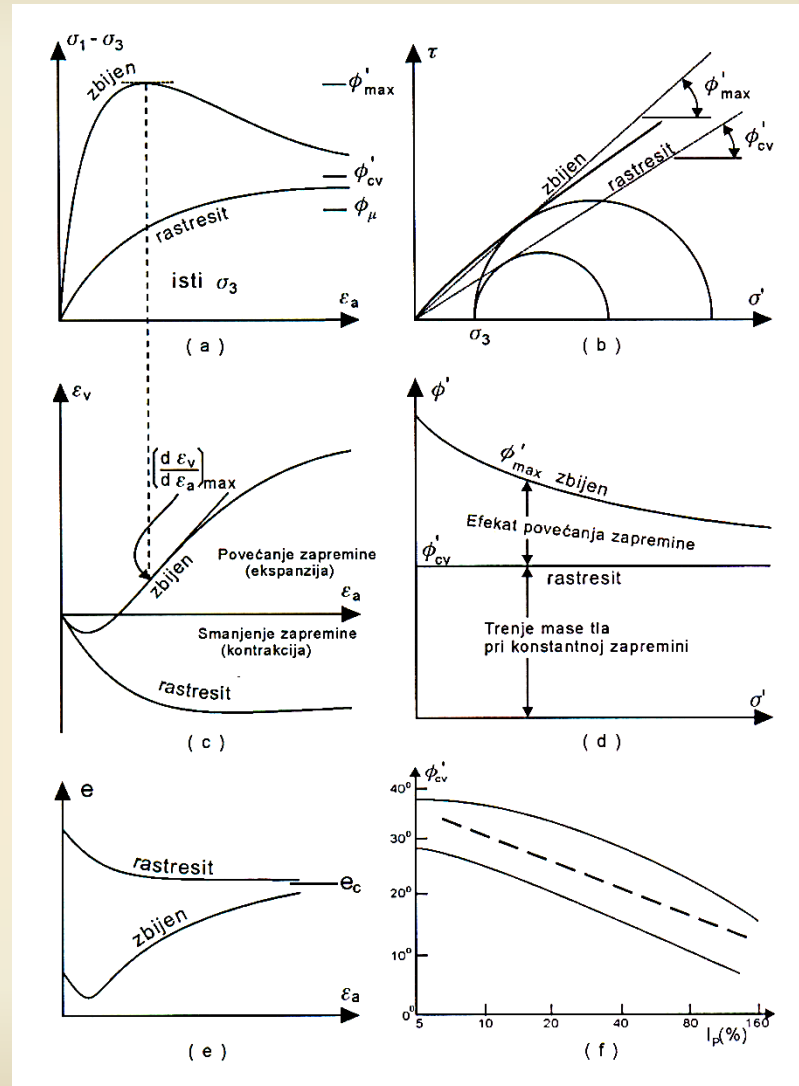


Definicije uglova smičuće otpornosti



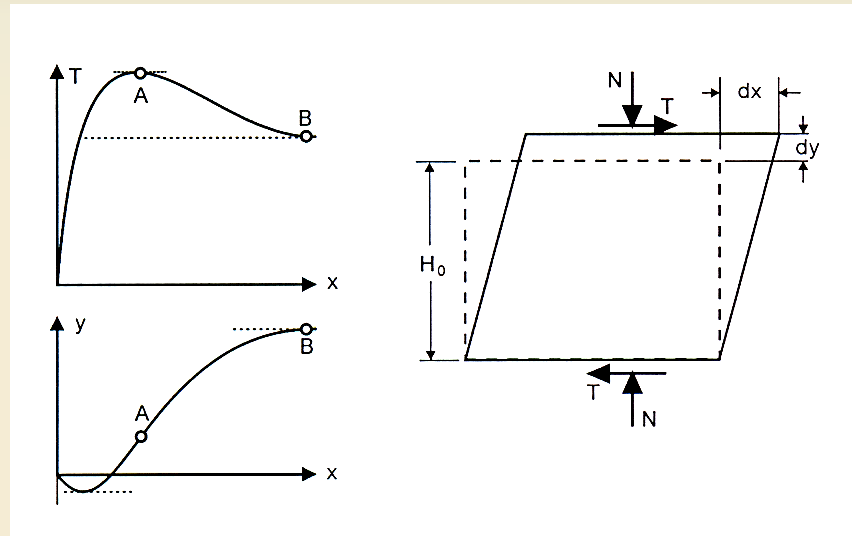
Orijentacione granice ugla vršne smičuće otpornosti za normalno konsolidovana tla u zavisnosti od indeksa plastičnosti

VRŠNA SMIČUĆA ČVRSTOĆA. Karakteristike smičuće otpornosti pijeska, kao tipičnog predstavnika zrnastih nevezanih materijala, mogu se ispitivati u dreniranim optima triaksijalne kompresije i u dreniranim optima direktnog smicanja



Smičuća čvrstoća zrnastog materijala

NAPONSKA DILATANCIJA. Za pojavu povećanja zapremine pri promjeni smičućih napona u mehanici tla se koristi izraz ‘‘dilatancija’’ kojom se objašnjava uticaj uzglobljavanja zrna na ukupnu smičuću čvrstoću.



Tejlorov model primjenjen na opis efekta dilatancije

Rad na deformaciji uzorka $Tdx - Ndy$. Ako se rad spoljnih sila izjednači sa radom potrošenim na trenje pri konstantnoj zapremini, može se napisati da je:

$$Tdx - Ndy = \mu Ndx$$

ili

$$\frac{T}{N} = \mu + \frac{dy}{dx}$$

Ako se stavi da je $\frac{dy}{dx} = 0$ tada je:

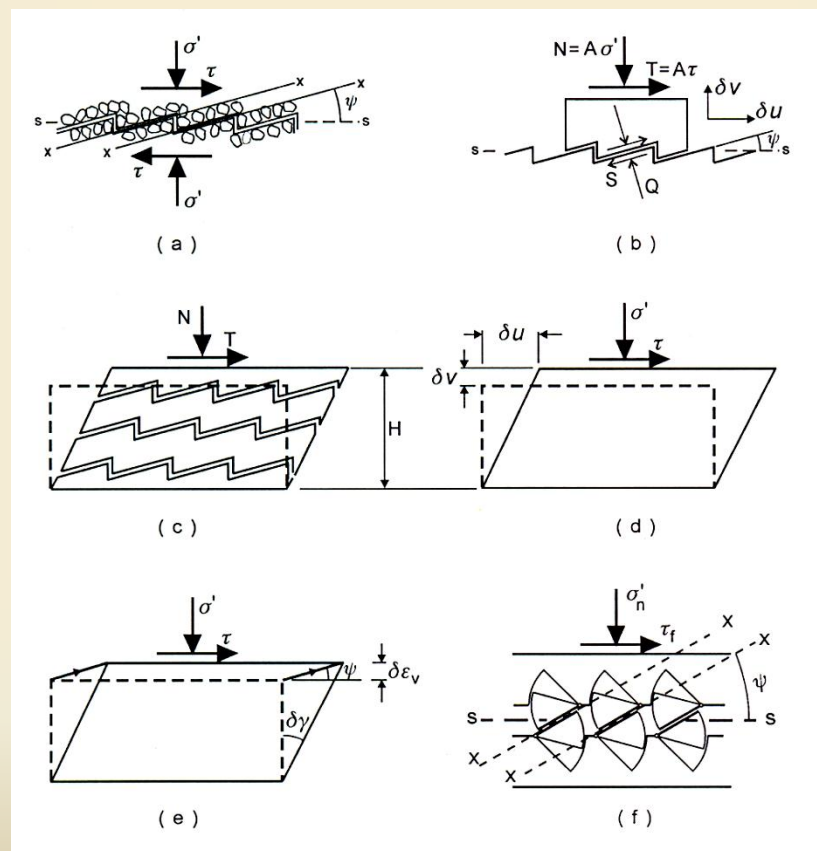
$$\frac{T}{N} = \mu = \tan \phi'_{cv}$$

Pri deformaciji koja odgovara vršnoj čvrstoći, tačka A, odnos T / N ima maksimalnu vrijednost, tako da je:

$$\left(\frac{T}{N}\right)_{\max} = \tan \phi'_{cv} + \left(\frac{dy}{dx}\right)_{\max}$$

ili u konvencionalnom obliku:

$$\tan \phi' = \tan \phi'_{cv} + \tan \psi$$



Testerasti modeli dilatancije

Iz uslova ravnoteže bloka prikazanog na prethodnoj slici pod b) imamo da je:

$$Q = N \cos \psi + T \sin \psi$$

$$S = -N \sin \psi + T \cos \psi$$

U gornji izraz unesemo da je $S = Q \tan \phi'_{cv}$ dobijamo

$$T - N \tan \psi = N \tan \phi'_{cv} + T \tan \phi'_{cv} \tan \psi$$

Pri malom horizontalnom pomjeranju δu blok će se pomjeriti naviše za veličinu δv gdje je $\frac{\delta v}{\delta u} = \tan \psi$ što nakon zamjene i sređivanja daje:

$$\frac{T}{N} = \frac{\tan \phi'_{cv} + \frac{\delta v}{\delta u}}{1 - \frac{\delta v}{\delta u} \tan \phi'_{cv}}$$

$$\frac{\tau}{\sigma} = \frac{\tan \phi'_{cv} + \frac{\delta \varepsilon_v}{\delta \gamma}}{1 - \frac{\delta \varepsilon_v}{\delta \gamma} \tan \phi'_{cv}}$$

$$\tan \phi' = \frac{\tan \phi'_{cv} + \tan \psi}{1 - \tan \psi \tan \phi'_{cv}}$$

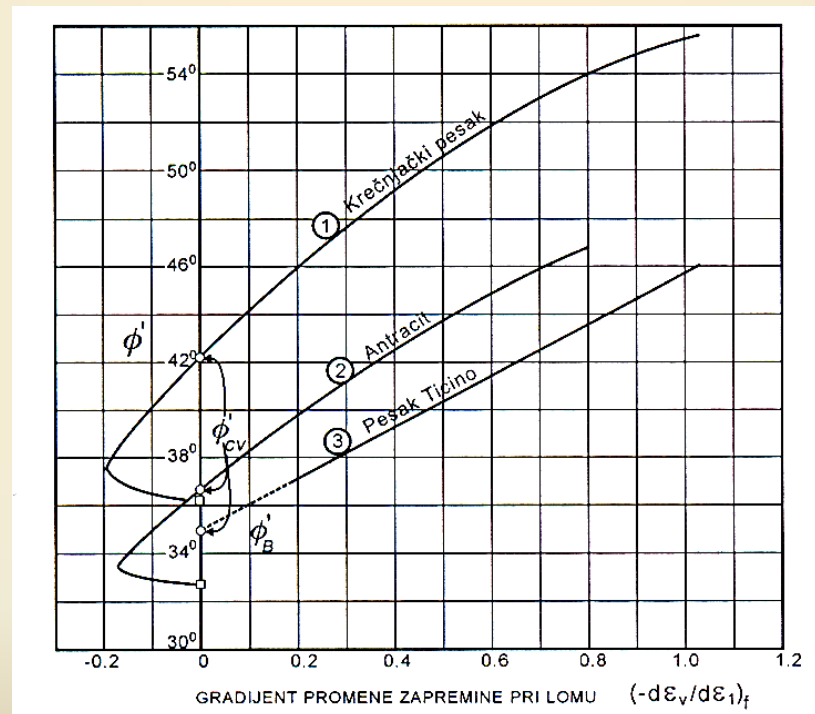
$$\phi'_{\max} = \phi'_{cv} + \psi$$

Rowe (1962) je predložio teoriju koja povezuje odnose glavnih napona pri lomu i gradijent promjene zapremine. Pokazao je da za idealan skup zrna može važiti izraz:

$$\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'} = \frac{1 + \sin \phi'_{cv}}{1 - \sin \phi'_{cv}} \left(1 - \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1} \right)$$

U slučaju zbijenog pijeska vršna čvrstoća normalno odgovara maksimalnom gradijentu dilatancije, tako da prethodni izraz za stanje napona i deformacija u stanju loma postaje:

$$\left(\frac{\sigma_1'}{\sigma_3'} \right)_f = \frac{1 + \sin \phi'_{cv}}{1 - \sin \phi'_{cv}} \left(1 - \frac{d\varepsilon_v}{d\varepsilon_1} \right)_{\max}$$



Određivanje veličine ugla ϕ'_{cv}

Ugao dilatancije ψ se može izraziti ili preko priraštaja maksimalnih i minimalnih dilatacija $d\varepsilon_1$ i $d\varepsilon_3$ ili preko priraštaja volumetrijske deformacije $d\varepsilon_v$ i maksimalnog klizanja $d\gamma$ tako da je u uslovima triaksijalne kompresije:

$$\sin \psi = \frac{d\varepsilon_1 + d\varepsilon_3}{d\varepsilon_1 - d\varepsilon_3} = \frac{d\varepsilon_v}{d\gamma}$$

Bolton (1986) daje empirijsko pojednostavljenje u obliku aproksimativnog izraza:

$$\phi'_{\max} \approx \phi'_{cv} + 0.8 \psi$$

Svaka veličina ugla ukupne smičuće otpornosti tla koja je veća od ugla trenja rastresitog tla, vidi kao geometrijska veličina povećanja zapremine koja je neophodna da bi došlo do smičućeg loma tla.

NELINEARNA ANVELOPA HIPERBOLIČKOG TIPA. Anvelopa napona loma izražena efektivnim naponima može se opisati promjenom ugla smičuće otpornosti sa izrazima hiperboličkog tipa, od kojih će se ovdje navesti tri. Polazeći od stava da zrnasti nevezani materijal nema koheziju, smičuća čvrstoća tla izražena preko efektivnih napona se može opisati kriterijem u obliku izraza:

$$\begin{aligned} \tau_f &= \sigma'_n \tan \phi'(\sigma'_n) \\ \phi'(\sigma'_n) &= \phi'_B + \delta\phi'(\sigma'_n) \\ \delta\phi'(\sigma'_n) &= \frac{\Delta\phi'}{1 + \frac{\sigma'_n}{p_N}} \end{aligned}$$

tako da je ukupan ugao smičuće otpornosti:

$$\phi' = \phi'_B + \frac{\Delta\phi'}{1 + \frac{\sigma'_n}{p_N}}$$

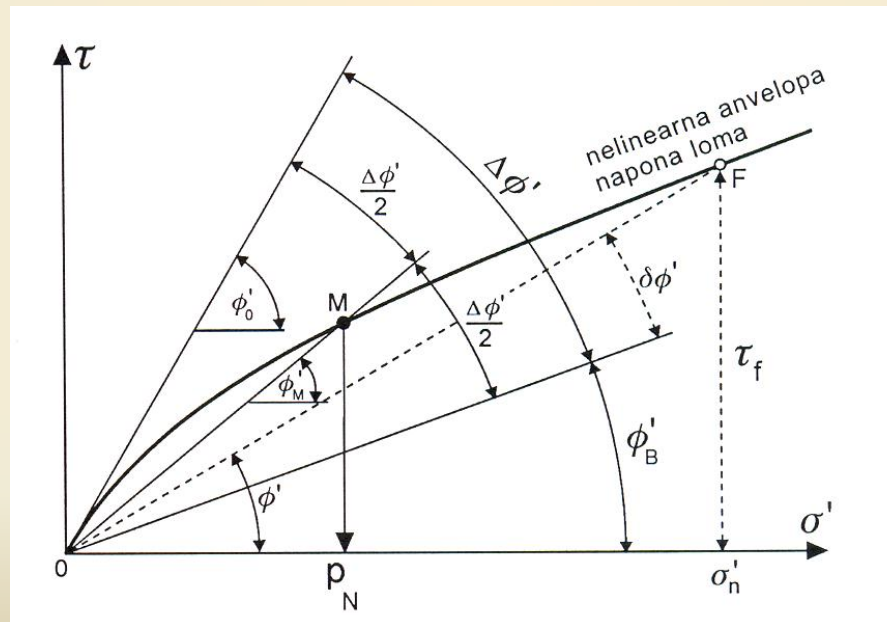
Smičuća čvrstoća je $\tau_f = \sigma'_n \tan \phi'$, tako da je:

$$\tau_f = \sigma'_n \tan \left(\phi'_B + \frac{\Delta\phi'}{1 + \frac{\sigma'_n}{p_N}} \right)$$

ϕ'_B je bazni ugao trenja

$\Delta\phi'$ je maksimalna ugaona razlika $\phi'_0 - \phi'_B$

p_N je normalni napon srednjeg sekantnog ugla.



Nelinearna anvelopa napona loma i parametri

Nagib tangente na Morov krug napona pri lomu:

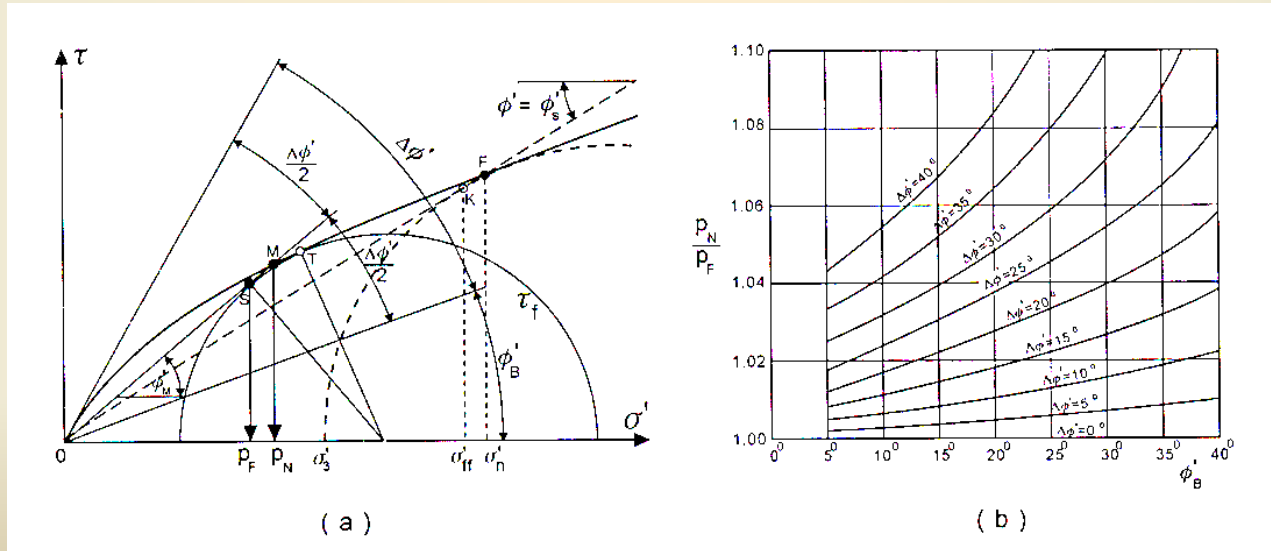
$$\phi'_s = \arcsin \left(\frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)_f}{(\sigma'_1 + \sigma'_3)_f} \right)$$

dok je odgovarajući normalni napon:

$$\sigma'_{ff} = \sigma'_3 (1 + \sin \phi'_s)$$

Promjena ugla tangente na Morove krugove nelinearne anvelope napona loma u funkciji nivoa normalnih napona se sada može napisati u obliku:

$$\phi'_s = \phi'_B + \frac{\Delta \phi'_s}{1 + \frac{\sigma'_{ff}}{p_F}}$$



Nelinearna anvelopa, Morovi krugovi i konverzija parametara

Radi daljeg uopštavanja i poređenja sa prijedlogom Boltona (1986) ovdje će se uvesti još jedan opis ugla smičuće otpornosti u obliku koji uključuje i prosječan nivo napona pri lomu definisan kao:

$$p' = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_2 + \sigma'_3)}{3}$$

$$\phi'_s = \phi'_B + \frac{\Delta\phi'}{1 + \frac{p'}{p_{AV}}}$$

$$p_{AV} = p_F \left(\frac{1}{3} \right) \left(\frac{3 - \sin \phi'_M}{1 - \sin^2 \phi'_M} \right)$$

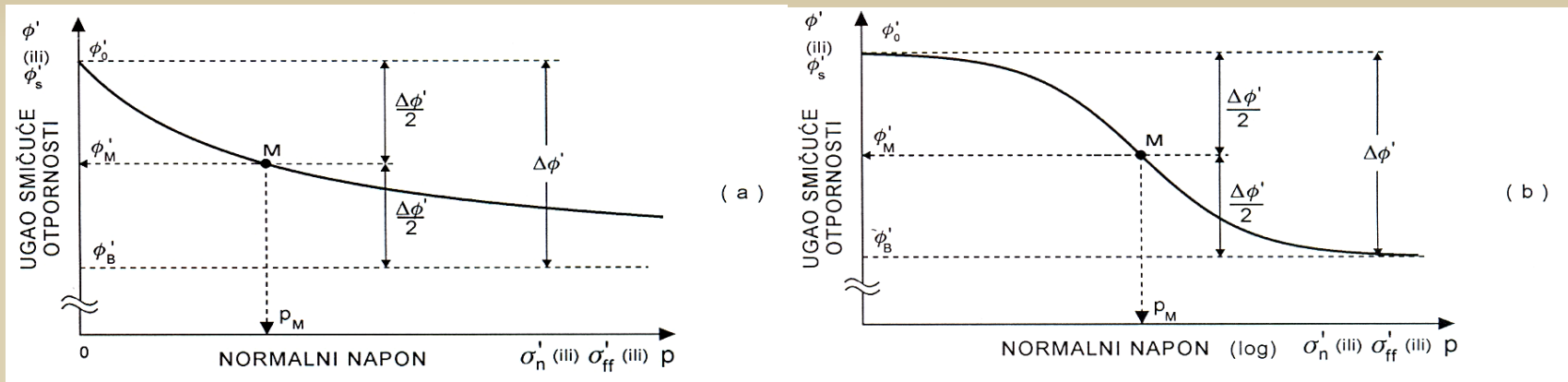
Rezidualna smičuća čvrstoća se takođe može opisati odgovarajućim izrazom, dodavanjem indeksa “ r ” parametrima, tako da anvelopa napona loma i u ovim uslovima ima oblik:

$$\tau_{f,r} = \sigma'_n \tan \left(\phi'_{B,r} + \frac{\Delta\phi'_r}{1 + \frac{\sigma'_n}{p_{N,r}}} \right)$$

ϕ'_B je “ bazni ugao trenja “, ugao smičuće otpornosti koji se mobilise pri visokim nivoima normalnih napona kada nema promjene zapremine ali se odvija i drobljenje zrna pri smicanju.

$\Delta\phi'$ je maksimalna ugaona razlika, -koja se u slučaju tla sa kompaktnim zrnima može nazvati i maksimalnim doprinosom dilatancije i tada odražava zbijenost, zaobljenost i prateće efekte dilatancije, dok tla sa velikim sadržajem pločastih čestica pri velikim deformacijama izražava nesavršenu orijentaciju zrna u odnosu na ravan smicanja kada normalni napon teži nuli.

p_M odnosno p_N ili p_F napon srednjeg ugla odražava stišljivost skeleta tla, čvrstoću zrna ili otpor zrna i skeleta protiv drobljenja, što zavisi od vrste minerala, zbijenosti tla, granulometrijske kompozicije i oblika zrna.

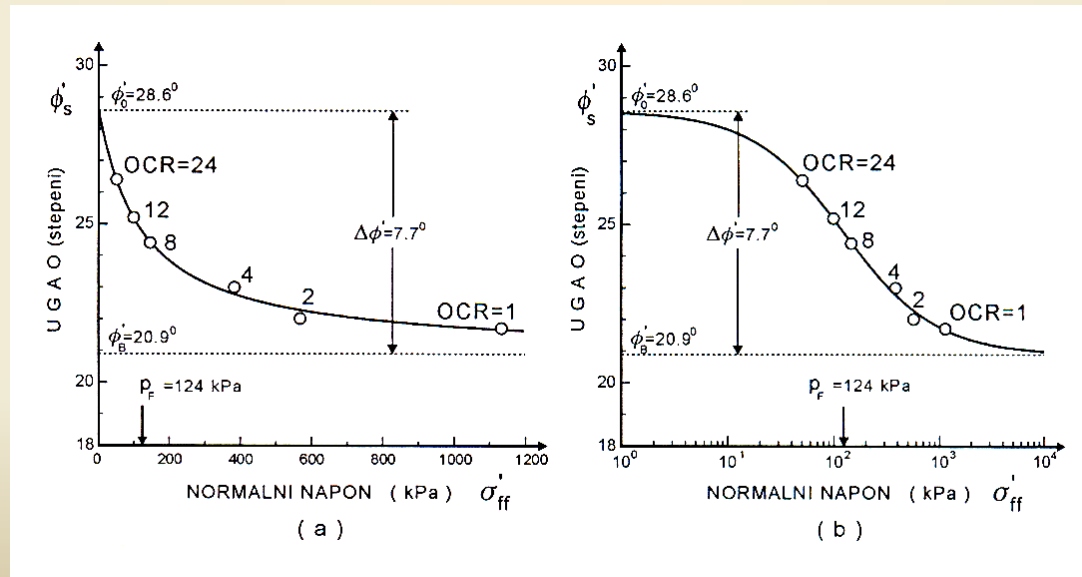


Parametri i funkcije nelinearne anvelope napona loma

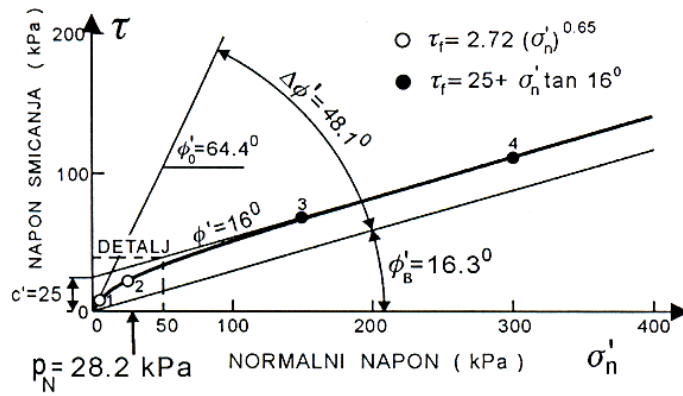
PRIMJERI ANVELOPA HIPERBOLIČNOG TIPA

Primjenljivost oblika anvelope hiperboličkog tipa ilustrirajuće se sa jednim do dva primjera za karakteristične tipove tla.

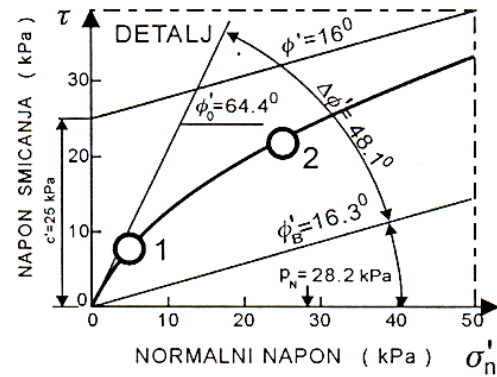
VRŠNA ČVRSTOĆA PREKONSOLIDOVANE ili ZBIJENE GLINE. Zakrivljenost anvelope vršne čvrstoće gline je karakteristična za prekonsolidovane i zbijane materijale, dok je za prerađena normalno konsolidovana tla anvelopa napona loma u opitu triaksijalne kompresije bliska pravoj liniji koja prolazi kroz koordinatni početak σ_n, τ dijagrama pod uglom ϕ_{cv}



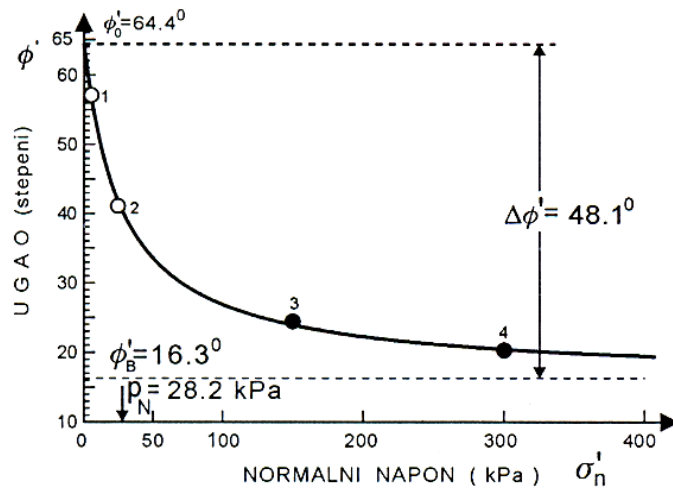
Utjecaj stepena prekonsolidacije na ugao smičuće otpornosti prerađene gline Weald.



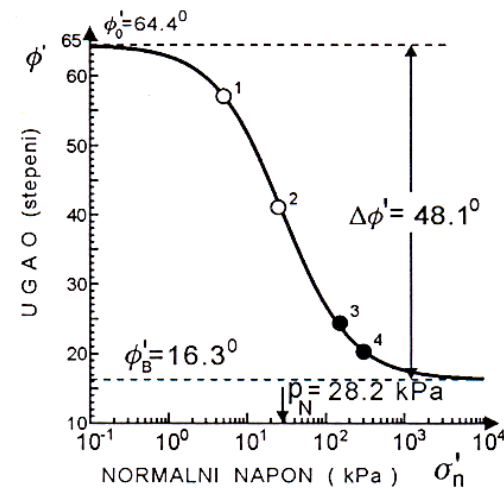
(a)



(b)

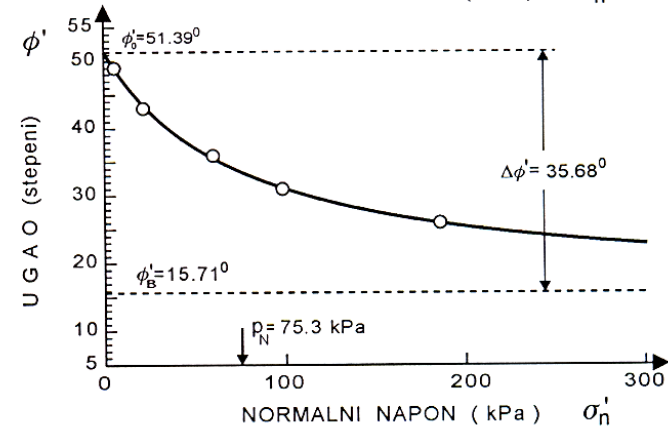
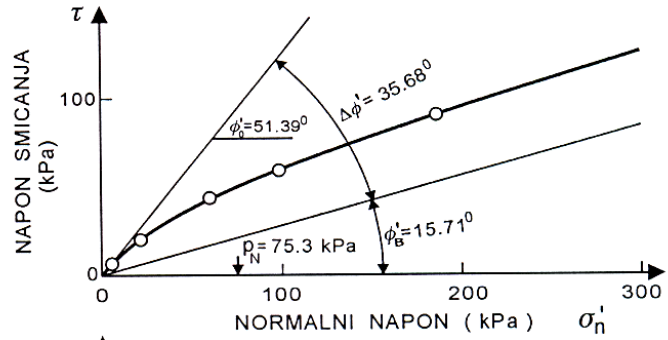


(c)



(d)

*Smičuća čvrstoća zbijene CH gline. (gore): Anvelopa napona loma,
 (dole): Ugao u funkciji od efektivnog normalnog napona*



Čvrstoća zbijene gline. (gore): anvelopa,
 (dole): Ugao u zavisnosti od napona-linerani dijagram

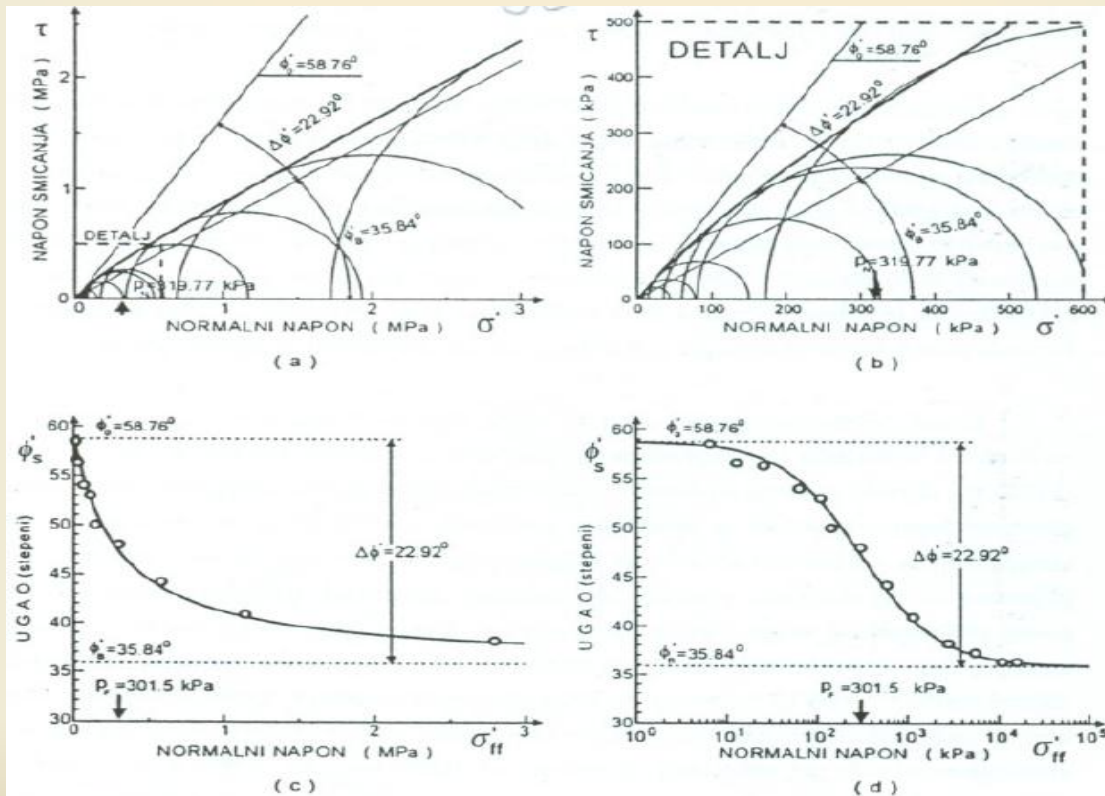
ČVRSTOĆA KRUPNOZRNOG TLA.

Čvrstoća krupnozrnog tla (nastavak SMIČUĆE ČVRSTOĆE TLA)

Smičuća čvrstoća krupnozrnog tla, (pjesak, šljunak I kameni nabačaji), koje se najvećim dijelom sastoji od kompaktnih zrna, zavisi od tipa minerala ili vrste stene od koje su zrna nastala, oblika zrna, graduiranosti I zbijenosti. Za dato krupnozrno tlo, jedina

promenljiva je njegoa gustina koja se opisuje relativnom zbijenošću D_r ili indeksom zbijenosti ID_r

Nelinearnost anvelope napona loma je izrazita za zbijena tla, a zanemarljiva za rastresita.

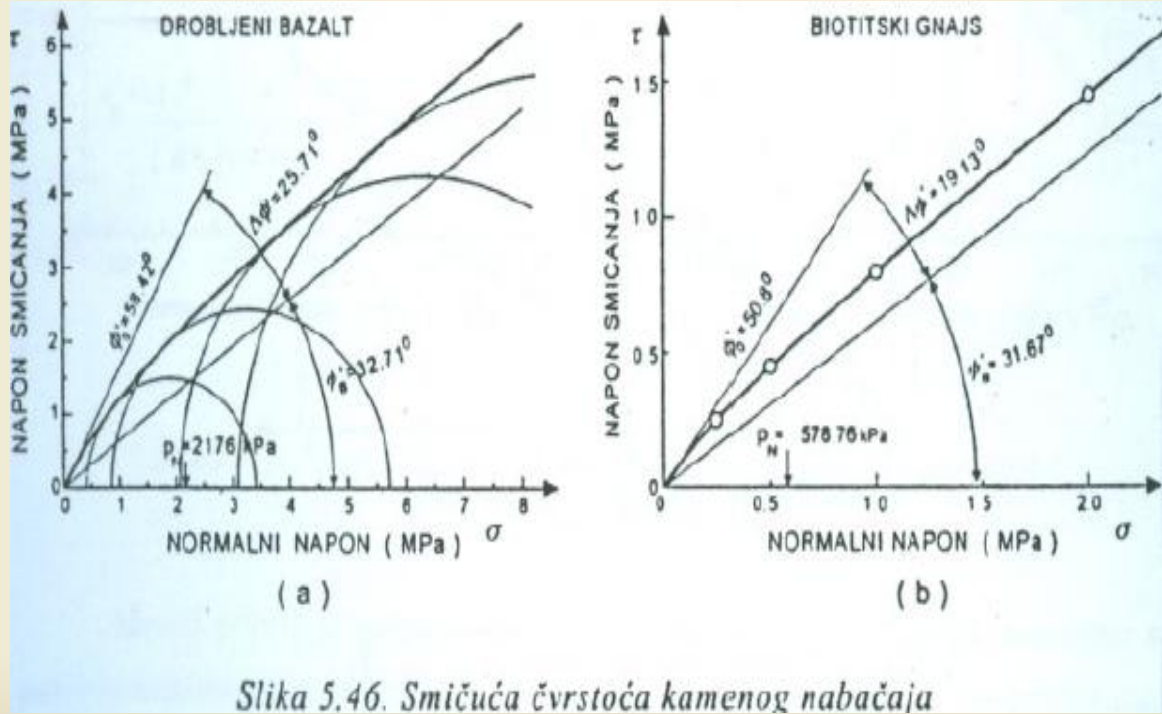


Slika 5.42. Rezultati ispitivanja krečnjačkog peska za $D_r = 100\%$.

(a), (b): Anvelopa napona loma,

(c), (d): Ugao u funkciji od efektivnog normalnog napona

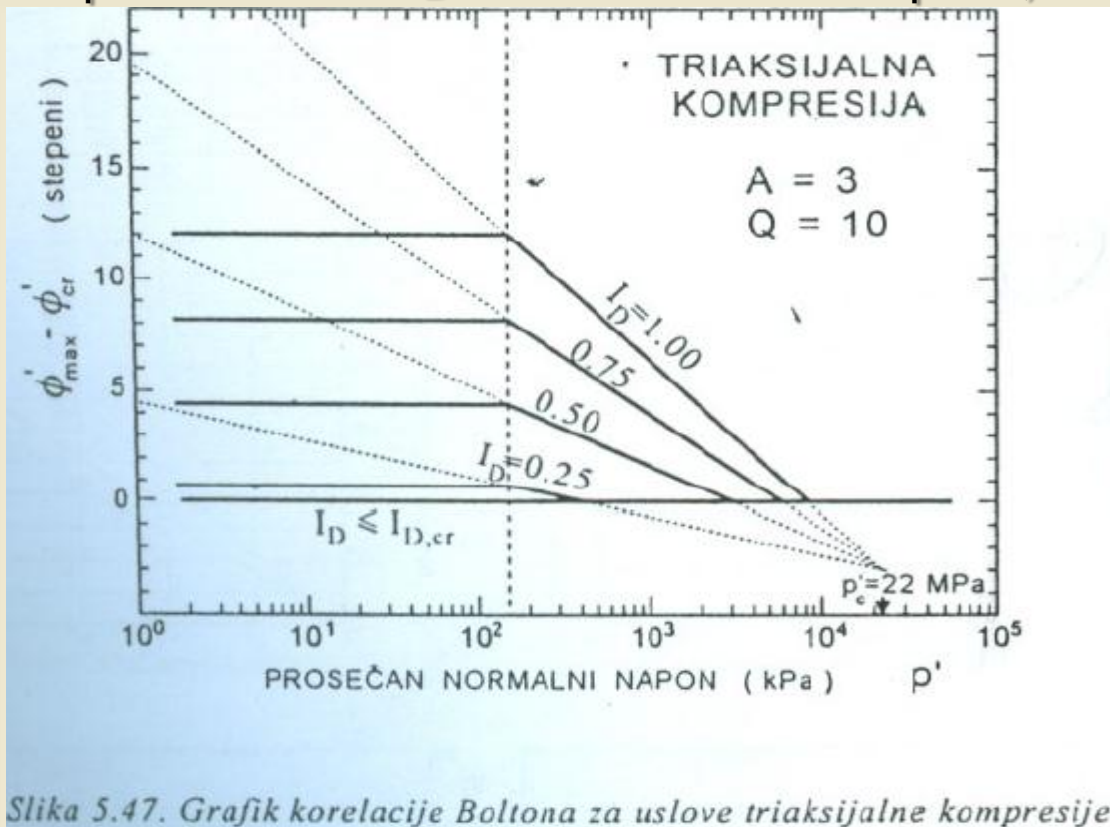
Nasuprot ponašanju zbijenih krupnozrnih materijala, kod kojih se pojavljuje priraštaj čvrstoće usled uzglobljavanja, dilatancije I loma zrna, ispitivanja rastresitih materijala pokazuju da je ugao smičuće otpornosti praktično konstantan kada efekata dilatancije nema. Kameni nabačaj, materijal koji se dobija miniranjem uz eventualno drobljenje u kamenolomima i često se koristi u građenju nasutih objekata, u pogledu smičuće otpornosti ponaša se slično pijeskovima. Jedina začajnija razlika se može uočiti u većoj vrijednosti $\Delta\phi'$ u stanju maksimalne zbijenosti, jer su zrna kamenog nabačaja obično rogljasta sa jasno izdvojenim hrapavim površinama I ostrim ivicama, dilatacija u zbijenom stanju materijala je veća, kotrljanja I rotacija zrna prije loma zanemarljiva, za razliku od aluvijalnih pijeskova kod kojih su zrna poluzaobljena do zaobljena tokom transporta vodom.



Slika 5.46. Smičuća čvrstoća kamenog nabačaja

Zavisnost smičuće čvrstoće od zbijenosti

Prvi konzistentan opis ponašanja peska u opitu triaksijalne kompresije, koji uzima u obzir zbijenost preko indeksa I_D i nivoa normalnih napona, dao je Bolton (1986).



Slika 5.47. Grafik korelacije Boltona za uslove triaksijalne kompresije

Empirijska jednačina kojom se definiše doprinos dilatacije opisuje linearnu vezu u polu-logaritamskom dijagramu u funkciji od prosečnog normalnog napona p' , tako da izraz za ugao nagiba tangente na Morov krug pri lomu ima oblik:

$$\phi'_s = \phi'_{cv} + A \left[I_D (Q - \ln p') - 1 \right]$$

gdje je ϕ'_{cv} ugao smičuće otpornosti pri kritičnoj poroznosti e_c ,

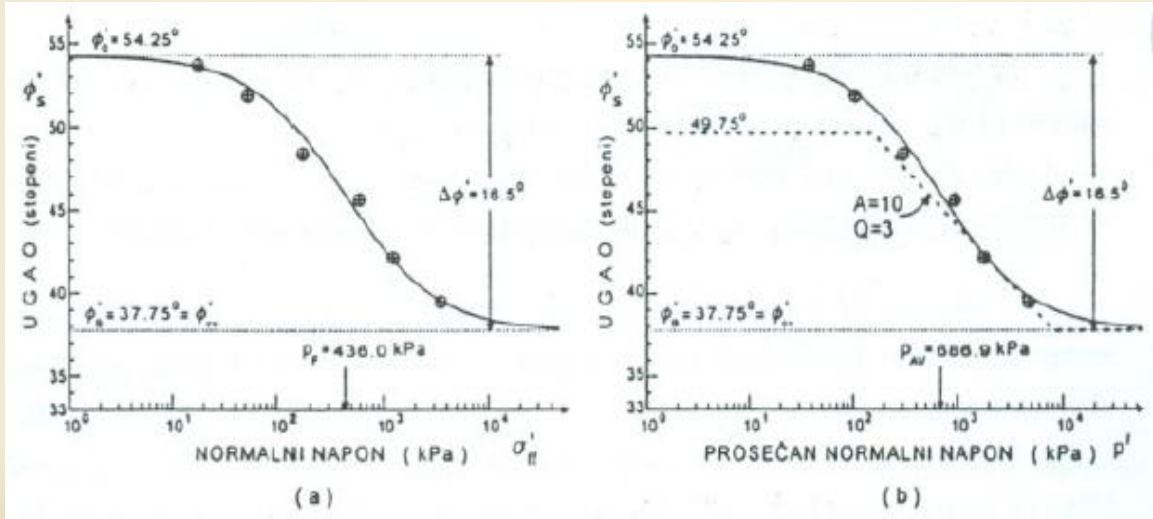
$Q = 10$ empirijska konstanta za kvarcni pijesak,

$A = 3^\circ$ faktor za uslov rotacione simetrije, a za $A = 5^\circ$ za ravnu deformaciju.

Radi uopštavanja rezultata i definisanja okvira za uspostavljanje zavisnosti između ugla vršne smičuće otpornosti, relativne zbijenosti i nivoa napona pogodan je izraz u obliku:

$$\phi' = \phi'_b + \frac{\Delta\phi'(D_r)}{1 + \frac{\sigma'_m}{p'_m}(D_r)}$$

gdje je $\phi'_b = \phi'_{cv}$ za uobičajene nivoe napona, $\Delta\phi'(D_r)$ je funkcija relativne zbijenosti koja odgovara parametru $\Delta\phi'_{cv}$, $p'_m(D_r)$ je funkcija relativne zbijenosti koja odgovara parametru p'_m .

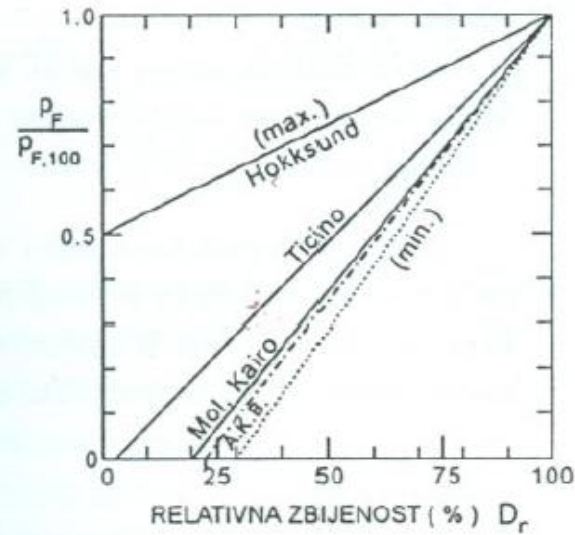


Slika 5.48. Alternativni prikazi ugla smičuće otpornosti jako zbijenog peska u funkciji nivoa napona

Pesak, korelacije i parametri	D_r	$\phi'_B \approx \phi'_{cv}$	$\Delta\phi'_{100}$	$p_{F,100}$
	(%)	(stepeni)		(kPa)
Pesak Ticino	100	35.0	12.8	882
Pesak Hokksund	100	34.0	14.8	1770
Pesak Kairo	100	31.0	15.9	722
Pesak Mol (putanja $p'=\text{const.}$)	100	32.5	16.1	416
Aproks. Konverzija Boltana (A.K.B.)	100	(-)	13.8	614

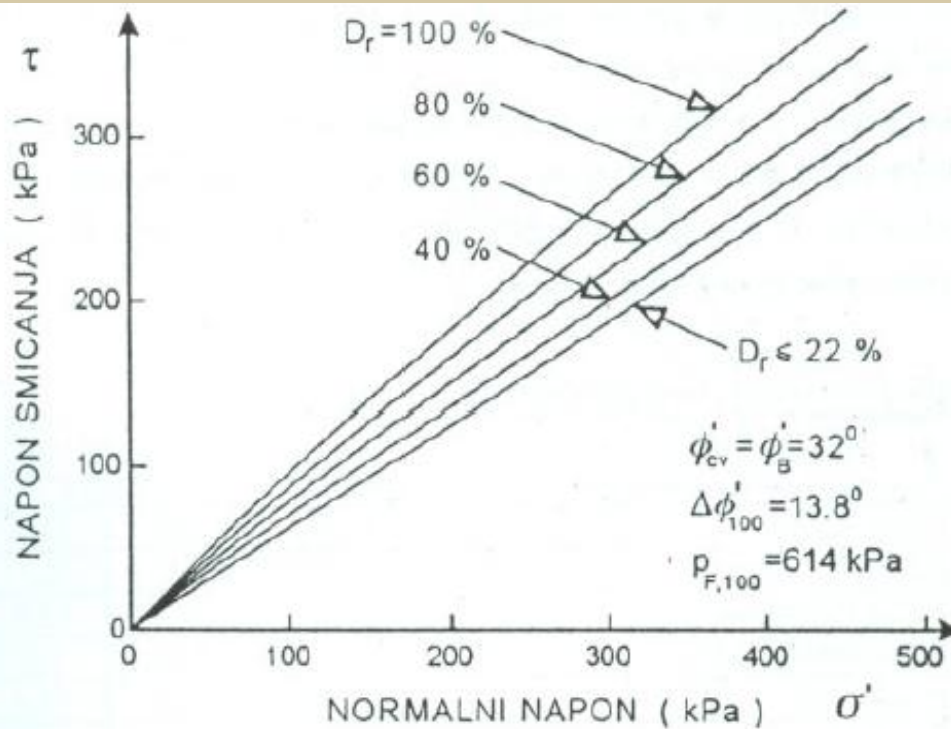


(a)



(b)

Slika 5.51. Karakteristični parametri smičuće čvrstoće peska u funkciji relativne zbijenosti u uslovima triaksijalne kompresije



Slika 5.52. Smičuća čvrstoća u funkciji zbijenosti i normalnih napona. Prosečna donja granica za aluvijalni pesak u uslovima triaksijalne kompresije.

Za datu zbijenost, anvelopa napona loma je blago zakrivljena linija konkavna u odnosu na osu normalnih napona. Uticaj zakrivljenosti nije zanemarljiv, naročito u području relativno malih napona.

S druge strane, u području visokih nivoa napona pri lomu, karakterističnih za opite statičke penetracije i nosivost baze šipa, razlike u uglovima smičuće otpornosti znatno manje zavise od zbijenosti, jer su efekti dilatancije umanjeni a drobljenje zrna izrazitije.

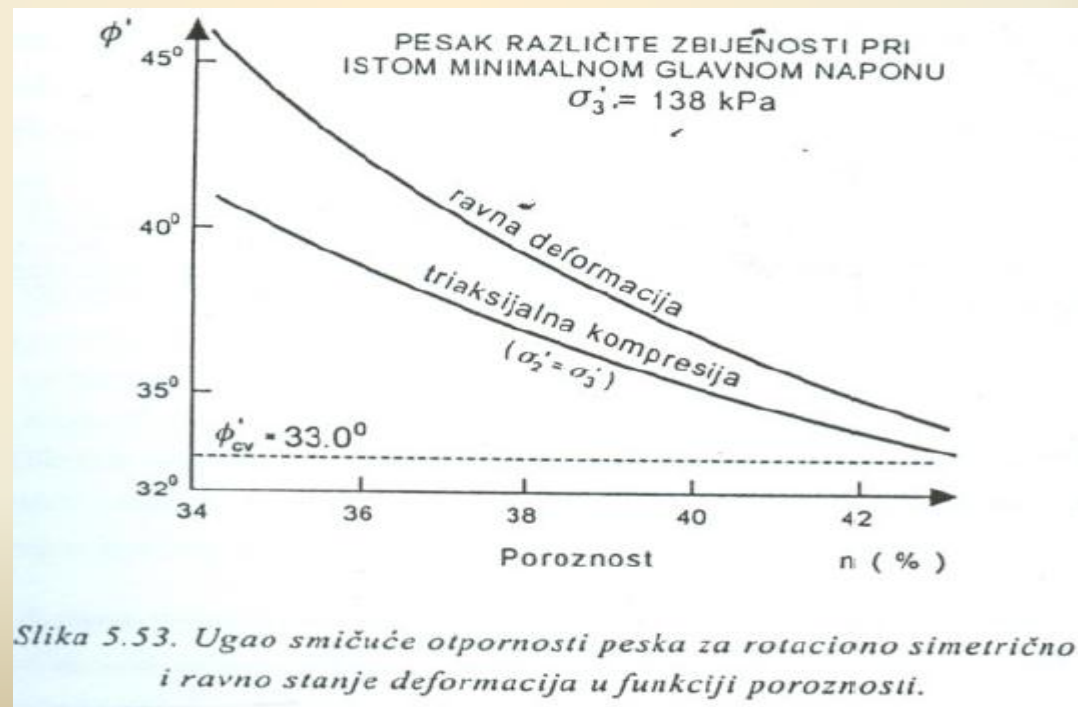
Uticaj srednjeg glavnog napona

Većina praktičnih analiza, jednostavnosti radi, pretpostavlja da vršni ugao smičuće otpornosti u dreniranim uslovima ne zavisi od putanje napona ka lomu i da se tako zanemaruje i uticaj srednjeg efektivnog normalnog napona σ'_2 . Međutim, ovaj uticaj može biti značajan u nekim slučajevima opterećivanja.

Uzimaju se u obzir rezultati ispitivanja provedeni u specijalizovanim istraživačkim centrima koji omogućavaju da se konvencionalna ispitivanja manje ili više koriguju.

Prihvata se stav da konvencionalni opiti triaksijalne kompresije daju parametre vršne čvrstoće za efektivne napone koji su, sa praktične tačke gledišta, na strani sigurnosti u odnosu na parametre koji bi opisivali čvrstoću u uslovima ravne deformacije ili bilo koje drugo naponsko stanje pri lomu

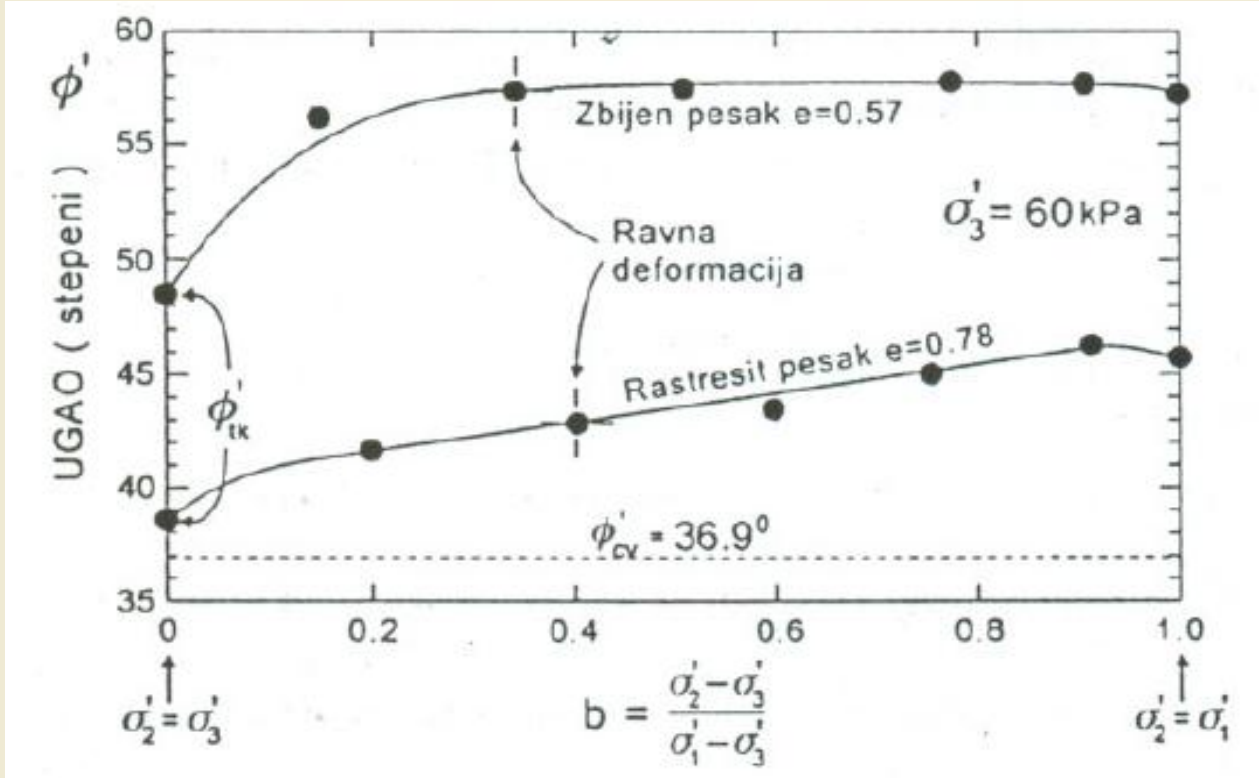
kada je $\sigma'_2 > \sigma'_3$.



Slika 5.53. Ugao smičuće otpornosti peska za rotaciono simetrično i ravno stanje deformacija u funkciji poroznosti.

Radi ocjene uticaja srednjeg efektivnog napona u opštem slučaju definiše se faktor srednjeg glavnog efektivnog napona u obliku:

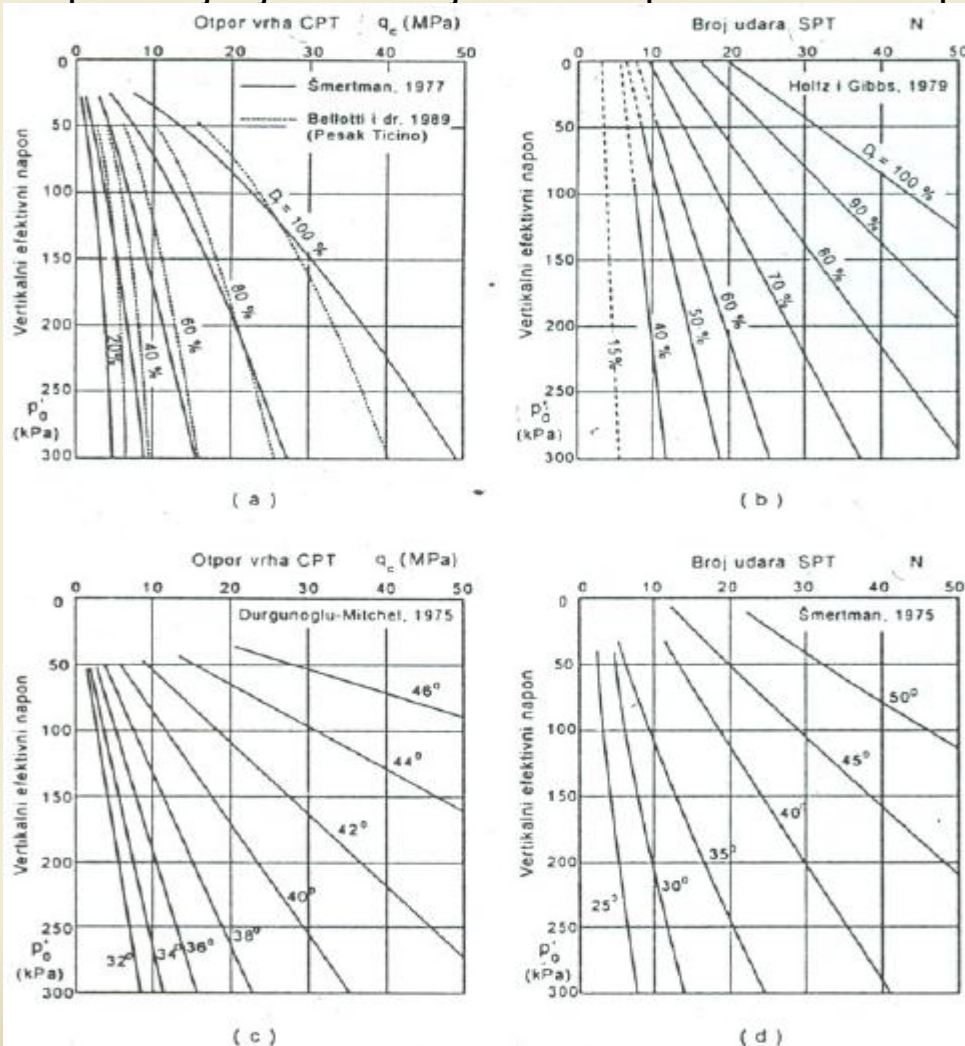
$$b = (\sigma'_2 - \sigma'_3) / (\sigma'_1 - \sigma'_3)$$



Slika 5.55. Uticaj srednjeg glavnog napona na ugao smičuće otpornosti za zbijen i rastresit pesak

Terenska ispitivanja in situ i korelacije

Za određivanje ugla smičuće otpornosti se najšire primjenjuju rezultati penetracionih ispitivanja (CPT i SPT) i razlikuju se dva prilaza: prvi se ograničava na ocjenu relativne zbijenosti, a drugi se orijentiše direktno na uspostavljanje korelacije između penetracione otpornosti i ugla smičuće otpornosti.

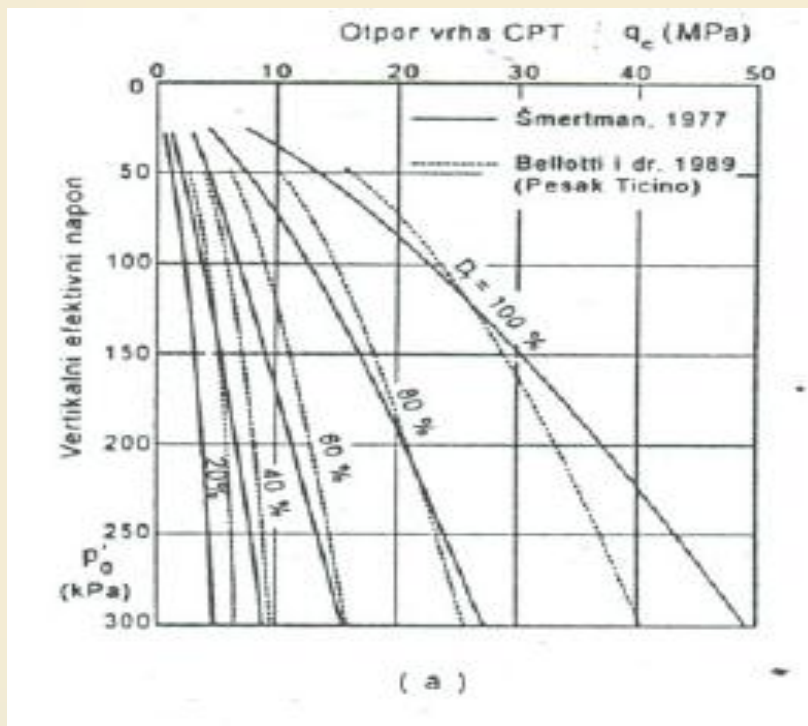


Slika 5.56. Relativna zbijenost i ugao smičuće otpornosti peska prema rezultatima penetracionih opita

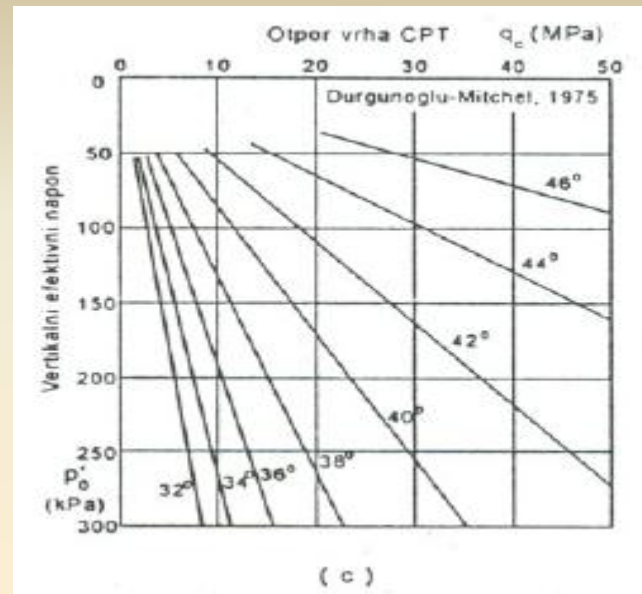
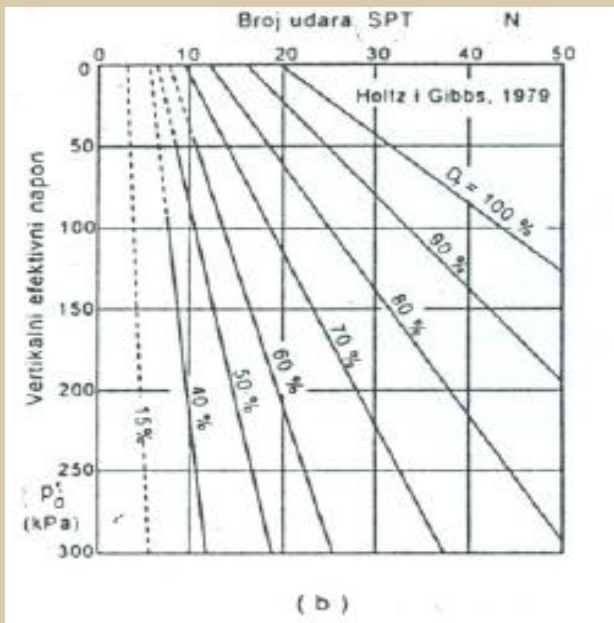
Istraživanja su pokazala da svaka penetraciona otpornost u naponu, tako da korelacije, ako se prikazuju u funkciji samo vertikalnog efektivnog napona, važe za normalno konsolidovano tlo gdje je tipično

$$K_0 = 0.45-0.50.$$

Ako je tlo prekonsolidovano ili zbijeno mehaničkim postupcima pri ugrađivanju, direktna primjena vertikalnog napona, bez korekcije, malo bi precijenila relativnu zbijenost, odnosno ugao smičuće otpornosti



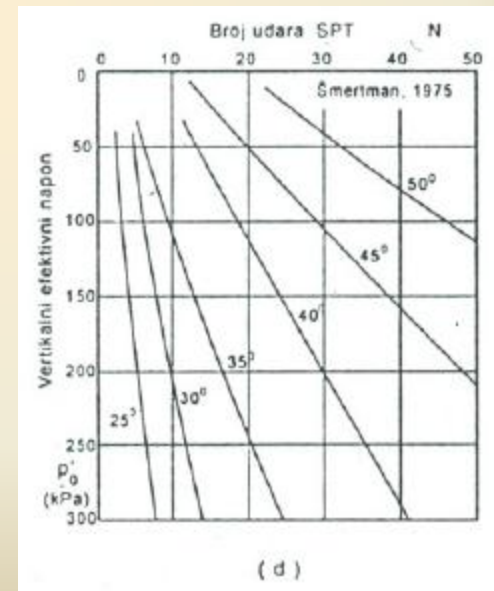
$$D_r = (1/2.38) * \ln[q_c / (248(\sigma'_{h0})^{0.55})] * 100 (\%)$$



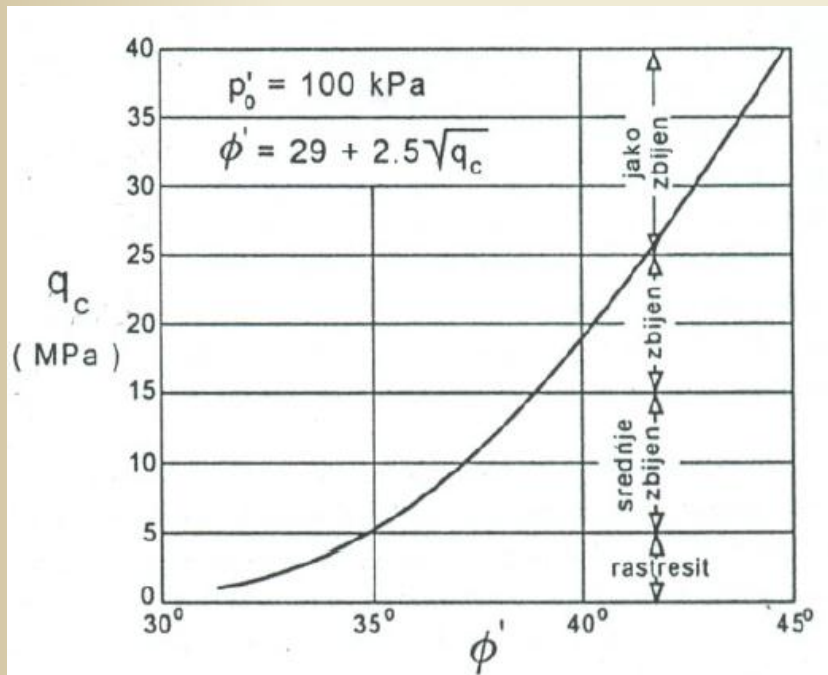
$$\phi' = \arctg [0.1 + 0.38 \log(q_c / p'_0)]$$

(Gibbs i Holtz 1957)

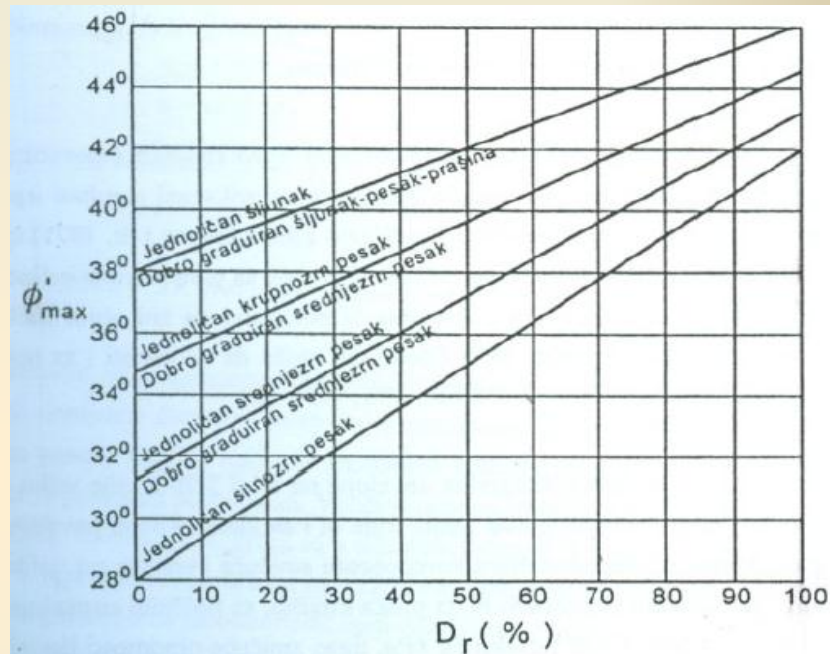
$$D_r = [N / (0.23 p'_0 + 16)]^{0.5} * 100 (\%)$$



$$\phi' = \arctg [N / (12.2 + 20.3 p'_0 / p'_a)]^{0.34}$$



Slika 5.57. Zavisnost između ugla smičuće otpornosti peska i otpora vrha statičkog penetrometra sa opisom zbijenosti



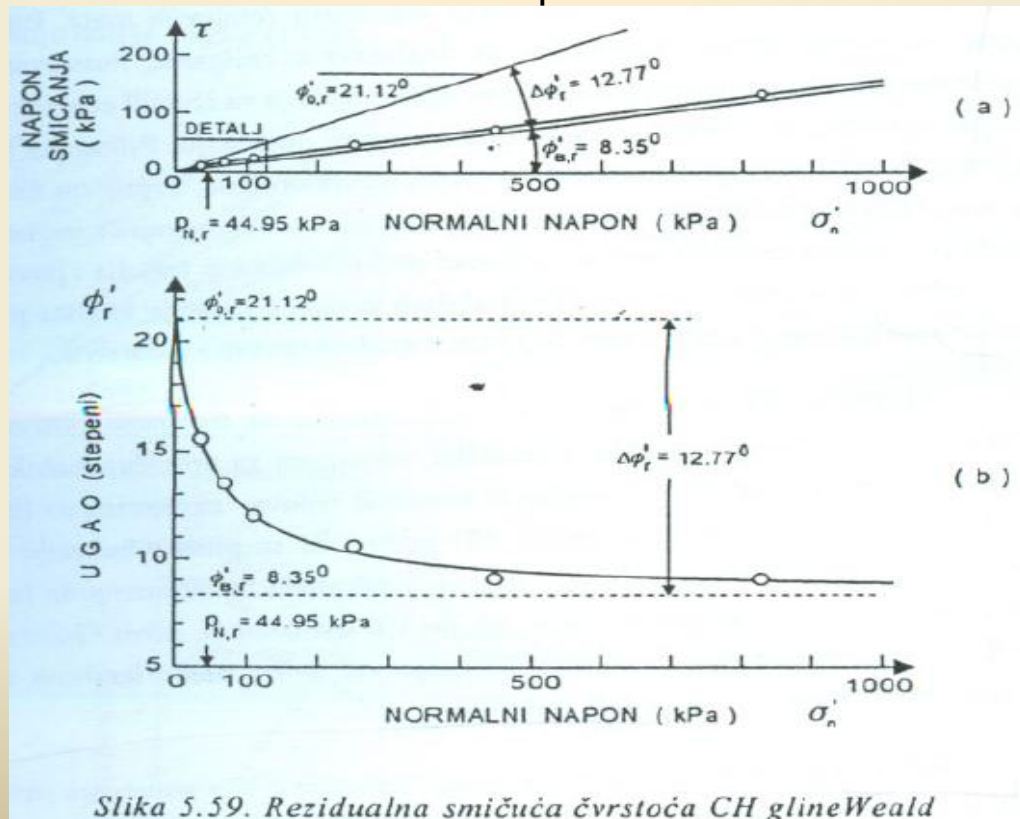
Slika 5.58. Zavisnost između relativne zbijenosti i ugla smičuće otpornosti za krupnozrna tla

Rezidualna čvrstoća gline

Rezidualna smičuća otpornost tla je mjerodavna za ocjenu stabilnosti mase tla ukoliko je prethodno došlo do značajnih pomjeranja po jasno definisanim kliznim površima.

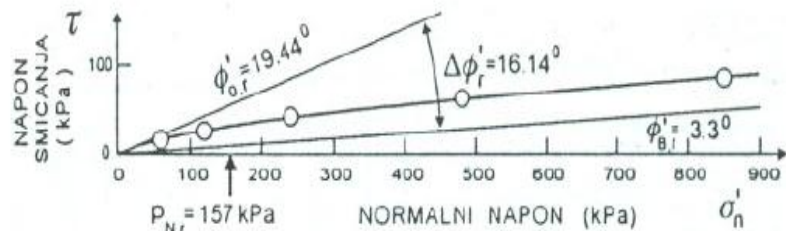
Veličina rezidualne smičuće otpornosti se obično određuje laboratorijskim ispitivanjima, dreniranim reverznim opitom direktnog smicanja i opitom u prstenastom aparatu.

Veličina ugla rezidualne smičuće otpornosti zavisi od sadržaja pločastih minerala gline i tipa minerala. Ukoliko je sadržaj čestica gline $CF > 40\%$, razlika između vršne i rezidualne čvrstoće je posebno značajna, jer u mehanizmu loma predominantan uticaj imaju sitne čestice koje se orijentišu paralelno ravni smicanja. U zavisnosti od nivoa normalnih napona ugao smičuće otpornosti može da se kreće u izuzetno širokom rasponu.

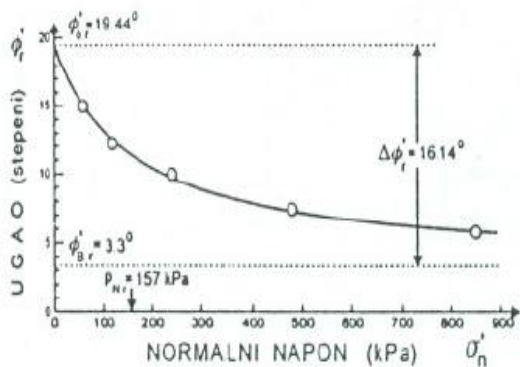


Slika 5.59. Rezidualna smičuća čvrstoća CH gline Weald

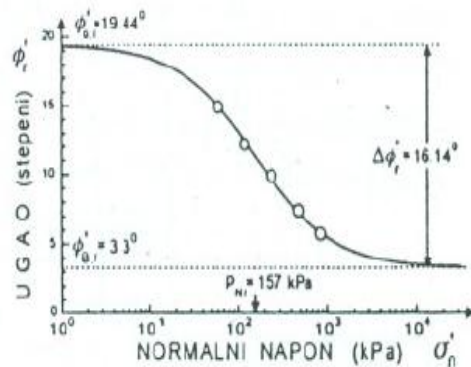
Ustanovljen je orijentacioni trend da obično ugao smičuće otpornosti opada sa povećanjem indeksa plastičnosti, sa povećanjem granice tečenja, i sa povećavanjem nivoa normalnih napona. Nažalost, pokazalo se da sve korelacije imaju ograničenu tačnost i da eventualno važe samo za određeni lokalitet ili razmatranu geološku formaciju.



(a)

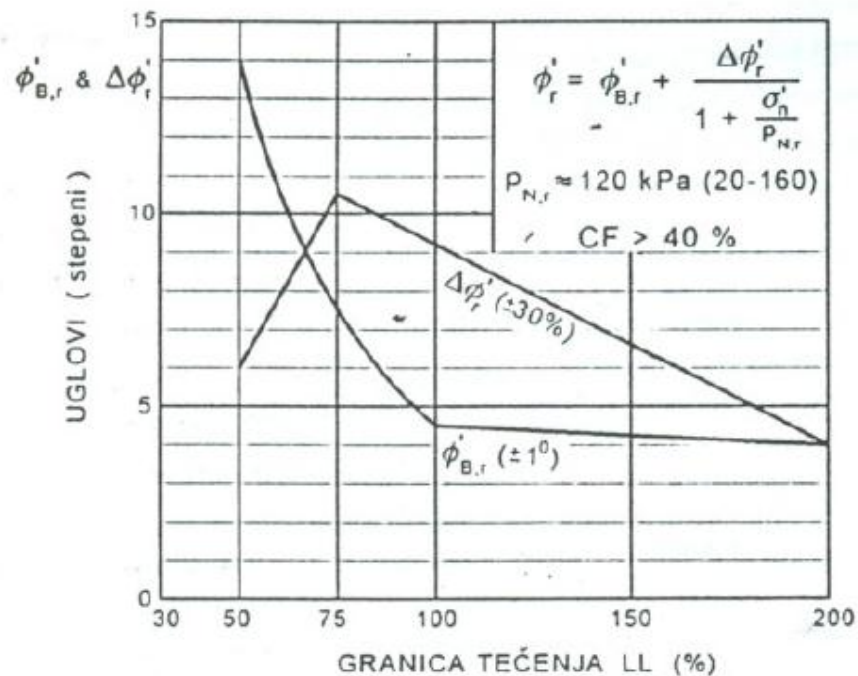


(b)



(c)

Slika 5.60. Rezidualna smičuća čvrstoća bentonitskog tufa



Slika 5.61. Korelacija za parametre nelinearne anvelope rezidualne čvrstoće visoko plastičnih glina

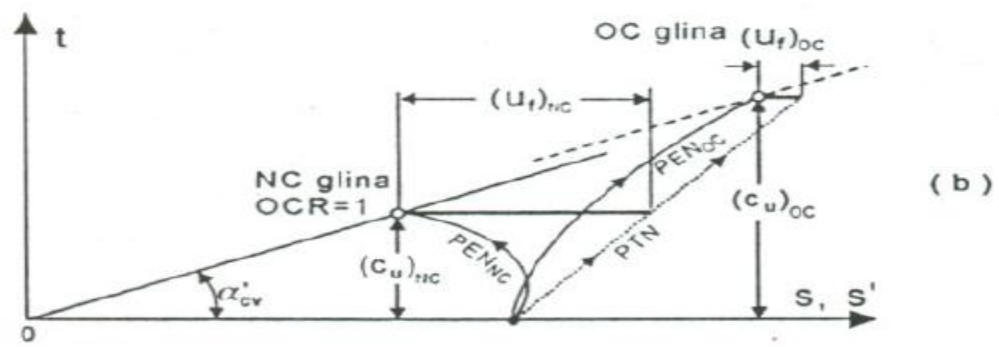
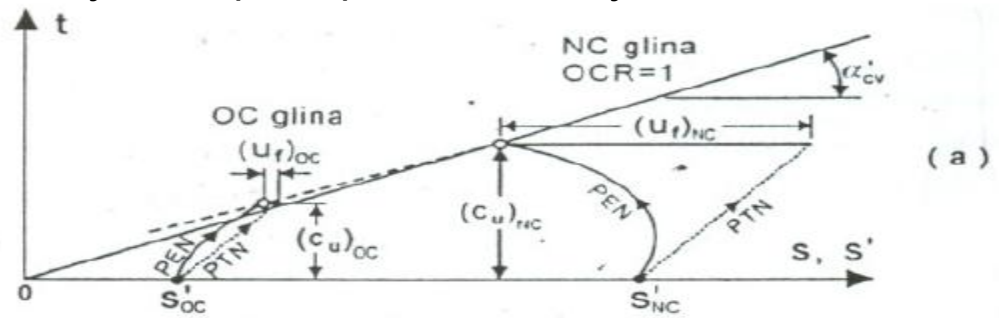
Nedrenirani uslovi – totalni naponi

NEDRENIRANA ČVRSTOĆA SITNOZRNOG TLA.

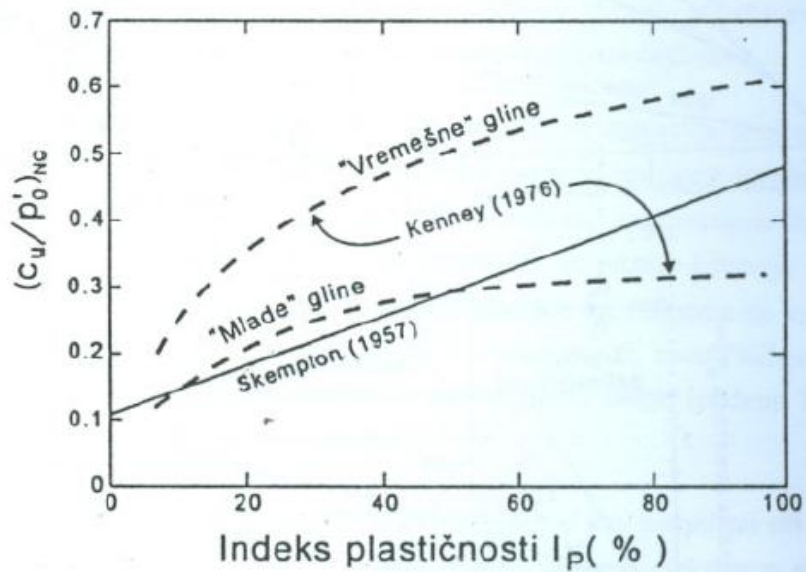
Za razliku od čvrstoće i parametara u dreniranim uslovima koji se opisuju efektivnim naponima, veličina nedrenirane smičuće čvrstoće, prije svega, zavisi od veličine generisanog pornog pritiska pri nedreniranoj deformaciji. Glavni uzrok takvog ponašanja je relativno mala vodopropusnost gline koja je za oko milion puta manja od vodopropusnosti tipičnog krupnozrnog tla.

$$\tau = c_u = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3) \quad \phi = 0$$

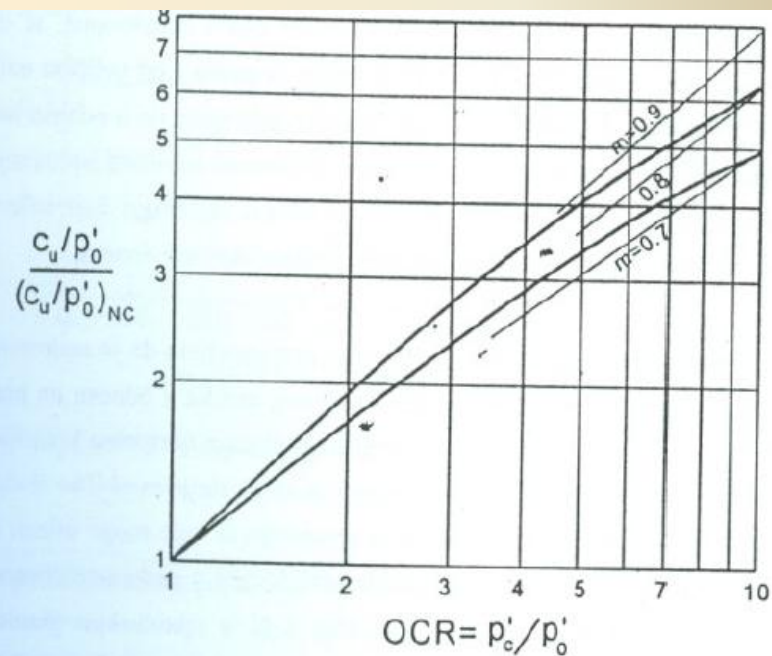
Nedrenirana smičuća čvrstoća zasićene gline je konstantna i nezavisna od normalnog napona, ali zavisi od prethodne istorije opterećenja ili stepena prekonsolidacije, odnosno vlažnosti i putanje napona.



Slika 5.63. Nedrenirana smičuća čvrstoća zavisi od pornih pritisaka koji zavise od stepena prekonsolidacije



Slika 5.64. Korelacije odnosa nedrenirane smičuće čvrstoće, napona konsolidacije i indeksa plastičnosti za normalno konsolidovane gline



Slika 5.65. Orijentaciona zavisnost između nedrenirane smičuće čvrstoće i stepena prekonsolidacije gline

Uzima se da je u nedreniranom opitu smičuća čvrstoća vodom zasićenih glina konstantna i ne zavisi od nivoa normalnih napona. Međutim, kod prekonsolidovanih i ispucalih glina nedrenirana čvrstoća opada sa povećanjem uzorka, pa je u takvim slučajevima potrebno ispitati uzorke različitih veličina da bi se mogla procijeniti nedrenirana smičuća čvrstoća mase tla. Za čvrstoće na granicama indeksa konzistencije mogu se usvojiti srednje vrijednosti na granicama konzistentnih stanja:

$$c_u = 1.5 \cdot 100 I_c \text{ (kPa)}$$

Paralelnim ispitivanjima laboratorijskom krilnom sondom i opitima jednoosijalne kompresije, nedrenirana čvrstoća gline srednje plastičnosti lesoidnog porijekla sa područja Vojvodine dobijena je korelacija koja se može opisati izrazom:

$$c_u = 10(0.8 + 1.2 I_c) \text{ (kPa)}$$

Za konkretne lokacije, za potrebe temeljenja objekata, orijentacioni podaci o nedreniranoj čvrstoći tla se mogu dobiti već u toku izvođenja istražnog bušenja i izvođenja standardnog penetracionog opita. Empirijska relacija:

$$c_u = (4 \text{ do } 20) N \text{ (kPa)}$$

N – broj udara u SPT opitu

Za rezultate statičkog penetracionog opita otpor vrha konusa u zasićenoj glini se može opisati teorijskom zavisnošću u obliku:

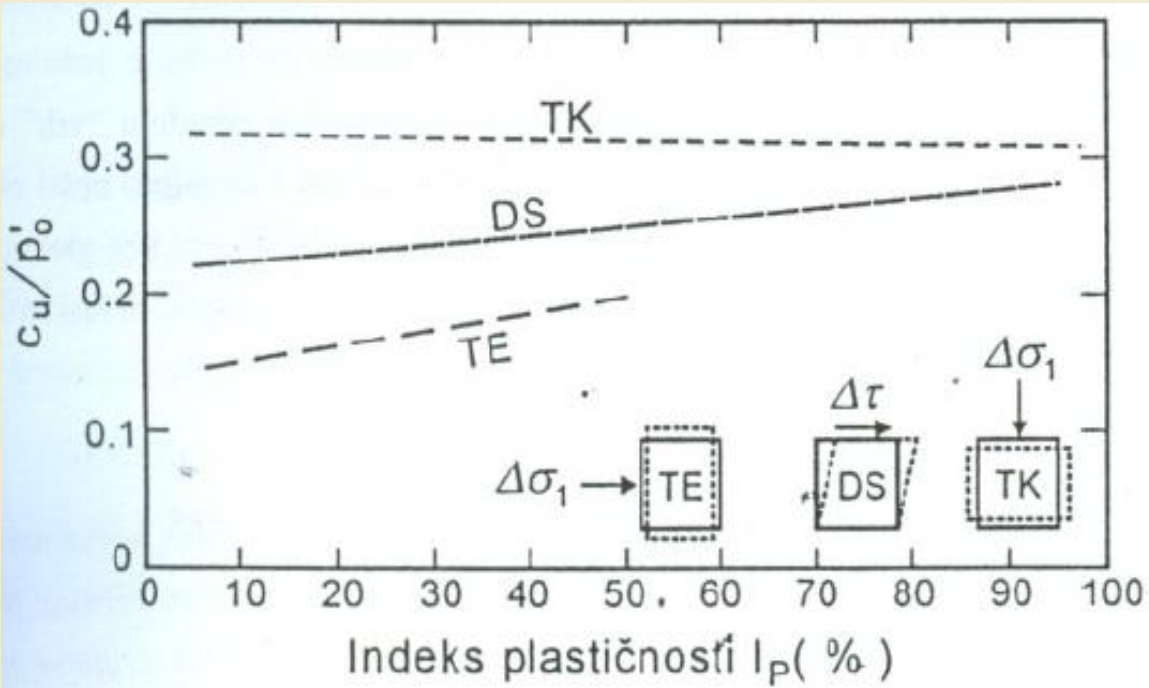
$$q_c = N_k c_u + p_0$$

gdje je N_k faktor nosivosti za konus.

Bez obzira na metod ispitivanja, nedrenirana čvrstoća tla zavisi i od brzine deformacije odnosno od vremena opterećivanja do loma. Ukoliko je opit brži, značajniji su viskozni efekti koji povećavaju čvrstoću, tako da se pri interpretaciji rezultata obično ima u vidu da pri sporijem deformisanju u nedreniranim uslovima, koje odgovara realnim terenskim uslovima opterećivanja u toku građenja, nedrenirana čvrstoća opada za oko 10% za jedan logaritamski ciklus vremena.

Anizotropija

Anizotropija je više naglašena kod materijala sa niskom plastičnošću.



Slika 5.66. Anizotropija nedrenirane smičuće čvrstoće na normalno K_0 konsolidovanim uzorcima gline

REZIME

Glavna komponenta smičuće čvrstoće tla potiče od trenja između zrna. Smičuća čvrstoća tla je nelinearna funkcija efektivnih napona i složena je funkcija mineralnog sastava, veličine, oblika i čvrstoće zrna, zbijenosti, uslova deformisanja, nivoa napona, nivoa deformacija kao i drugih promjenljivih.

U dreniranim uslovima, kada razvoj pornih pritisaka nije nastao zbog deformisanja, vršna smičuća čvrstoća svih tipova tla zavisi i od gradijenta promjene zapremine u području nižih napona, a pri povećanju nivoa napona znatnog uticaja na čvrstoću, osim trenja između zrna, ima i čvrstoća zrna tla.

Sitnozrna tla imaju manju dreniranu smičuću čvrstoću od krupnozrnog tla pri jednakom nivou normalnih napona zbog manjeg trenja između pločastih minerala gline u odnosu na tipične minerale krupnozrnog tla i tendencije pločastih zrna da se lome i mijenjaju orijentaciju u procesu deformisanja. Sitnozrna tla pokazuju znatnu razliku između vršne i rezidualne smičuće čvrstoće. Rezidualna smičuća čvrstoća je znatno manja od vršne čvrstoće zbog pločastog oblika zrna koja pri velikim deformacijama zauzimaju približno paralelnu orijentaciju sa ravni smicanja.

Nedrenirana smičuća čvrstoća je karakteristična za sitnozrna vodom zasićena tla kada se opterećuju relativno brzo u odnosu na mogućnost disipacije pornih pritisaka, tako da se lom događa pri konstantnoj zapremini. Nedrenirana čvrstoća, osim od trenja, u najvećoj mjeri zavisi od veličine pornih pritisaka odnosno od prethodne istorije napona i putanje opterećivanja.