# Usporedba granice tečenja određene različitim metodama ispitivanja u laboratoriju

**Kolarek, Miljenka**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

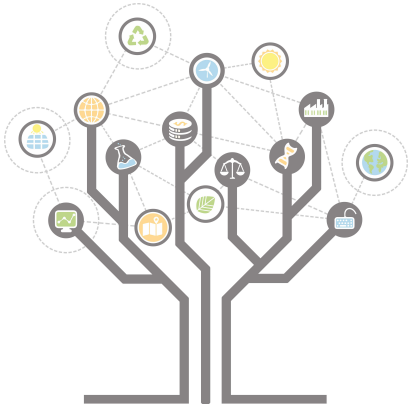
**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:261132

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-03-29**



*Repository / Repozitorij:*

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering - Theses and Dissertations

zir.nsk.hr

dabar
DIGITALNI AKADEMSKI ARHIVI I REPOZITORIJI

# Usporedba granice tečenja određene različitim metodama ispitivanja u laboratoriju

**Kolarek, Miljenka**

**Undergraduate thesis / Završni rad**

**2017**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Geotechnical Engineering / Sveučilište u Zagrebu, Geotehnički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:130:261132

*Rights / Prava:* In copyright

*Download date / Datum preuzimanja:* **2020-11-05**

*Repository / Repozitorij:*

Repository of Faculty of Geotechnical Engineering









SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

MILJENKA KOLAREK

# USPOREDBA GRANICE TEČENJA ODREĐENE RAZLIČITIM METODAMA ISPITIVANJA U LABORATORIJU

ZAVRŠNI RAD

VARAŽDIN, 2017.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

GEOTEHNIČKI FAKULTET

ZAVRŠNI RAD

# USPOREDBA GRANICE TEČENJA ODREĐENE RAZLIČITIM METODAMA ISPITIVANJA U LABORATORIJU

KANDIDAT:
Miljenka Kolarek

MENTOR :
izv. prof. dr. sc. Stjepan Strelec

NEPOSREDNI VODITELJ:
Damir Štuhec, dipl. ing. geotehnike

VARAŽDIN, 2017.

## IZJAVA O AKADEMSKOJ ČESTITOSTI

Izjavljujem i svojim potpisom potvrđujem da je završni rad pod naslovom

USPOREDBA GRANICE TEČENJA ODREĐENE RAZLIČITIM METODAMA ISPITIVANJA U LABORATORIJU

(naslov završnog rada)

rezultat mog vlastitog rada koji se temelji na istraživanjima te objavljenoj i citiranoj literaturi te je izrađen pod mentorstvom izv. prof. dr. sc. Stjepana Streleca.

Izjavljujem da nijedan dio rada nije napisan na nedozvoljen način, odnosno da je prepisan iz necitiranog rada te da nijedan dio rada ne krši bilo čija autorska prava. Izjavljujem također, da nijedan dio rada nije iskorišten za bilo koji drugi rad u bilo kojoj drugoj visokoškolskoj, znanstvenoj ili obrazovnoj ustanovi.

U Varaždinu, 20. 6. 2017.

Miljenka Kolarek

(Ime i prezime)

Miljenka Kolarek

(Vlastoručni potpis)

Sažetak:

Miljenka Kolarek, Usporedba granice tečenja određene različitim metodama u laboratoriju

Ispitivanjima uzoraka tla u laboratoriju dolazi se do bitnih parametara tla neophodnih u geotehničkoj praksi. Ispitivanja uobičajeno uključuju identifikaciju i klasifikaciju tla. Važan parametar tla je vlažnost na granici tečenja. Danas su u primjeni dvije metode ispitivanja: Casagrande – ov aparat i padajući šiljak. Usporedna ispitivanja granice tečenja pomoću obje metode u rasponu od 25 % do 80 % te analiza rezultata mjerenja jasno pokazuju postojanje vrlo velike statističke povezanosti između jedne i druge metode u širokom rasponu vrijednosti granice tečenja. To je jedan od razloga ravnopravnog korištenja ovih metoda ispitivanja širom svijeta.

Ključne riječi: granica tečenja, padajući šiljak, Casagrande - ov aparat, koeficijent korelacije

# SADRŽAJ

1. Uvod ..... 1
2. Tlo ..... 1
2.1. Trofazni karakter tla ..... 5
2.2. Granulometrijski sastav ..... 6
2.2.1. Sijanje ..... 6
2.2.2. Areometriranje ..... 8
2.2.3. Kombinirana analiza ..... 9
2.3. Indeksni pokazatelji ..... 9
2.3.1. Relativna gustoća ..... 10
2.3.2. Granice konzistencije (Atterbergove granice) ..... 10
3. Praktični dio ..... 15
3.1. Određivanje granice tečenja padajućim šiljkom ..... 15
3.2. Određivanje granice tečenja Casagrande – ovim aparatom ..... 19
3.3. Interpretacija dobivenih podataka ..... 22
3.3.1. Analiza podataka granice tečenja do 35 % ..... 24
3.3.2. Analiza podataka granice tečenja 35 % - 60 % ..... 26
3.3.3. Analiza podataka granice tečenja 60 % - 80 % ..... 27
3.3.4. Analiza podataka granice tečenja za umjetne materijale (glinamol) ..... 28
3.4. Usporedba granice tečenja određena padajućim šiljkom i Casagrande – ovim aparatom ..... 29
4. Zaključak ..... 32
5. Literatura ..... 34

# 1.Uvod

Geotehnika je interdisciplinarna tehnička disciplina od neprocjenjive važnosti koja se bavi projektiranjem i izvedbom zahvata u tlu i na stijeni. Svoje mjesto je tu našla mehanika tla, tj. primijenjena znanost koja proučava i opisuje fizikalna i mehanička svojstva tla kao inženjerskog materijala na/u kojem gradimo ili ga koristimo kao građevni materijal. Obje proučavaju teoretske modele naprezanja, deformacija i slično radi predviđanja ponašanja geotehničkih objekata. Pri tome su potrebna znanja prirodnih znanosti (geologija i mineralogija) i tehničkih znanosti (inženjerska geologija, mehanika tla, mehanika stijena). Za projektiranje geotehničkih objekata rade se terenski istražni radovi i laboratorijska ispitivanja da bi se dobili podaci o sastavu i uslojenosti temeljnog tla na predmetnoj lokaciji i fizičko-mehaničkim karakteristikama slojeva tla te pojavi i razini podzemne vode. S obzirom na prirodu terenskog istraživanja, u laboratorij dolaze poremećeni i neporemećeni uzorci tla. Uzorak tla određuje vrstu ispitivanja. Na poremećenim uzorcima se izvodi klasifikacija, određuje vlažnost i gustoća. Za razliku od njih na neporemećenim uzorcima, se uz navedena ispitivanja još određuju svojstva tla vezana za deformaciju, stišljivost i parametre čvrstoće posmikom, edomatarskim pokusom i triaksijalnim pokusom. Jedan od osnovnih klasifikacijskih testova je određivanje granica konzistentnih stanja, tj. granice plastičnosti, granice tečenja i granice stezanja. U ovom radu bit će određena granica tečenja 12 uzoraka na 2 načina, padajućim šiljkom i Casagrade - ovim aparatom. [1], [2], [3]

# 2. Tlo

Tlo je površinski rahli dio Zemljine kamene kore, tj. materijal koji je stvorila priroda tijekom dugog vremenskog razdoblja djelovanjem različitih mehaničkih ( tektonske sile, voda, led, abrazija, vegetacija), fizikalnih (gravitacija, voda, vjetar) i kemijskih (oksidacija, karbonizacija, hidratacija, desilikacija, otapanje) čimbenika.

Mehanički čimbenici:
Tektonske sile uzrokuju pojave bora i rasjeda. To su pukotine koje omeđuju velike blokove u stijenskoj masi. Tako je omogućeno djelovanje ostalih čimbenika i daljnje usitnjavanje stijene.

Led je najrazorniji u prvoj fazi otvaranja pukotina. Voda ulazi u pukotine i povećava volumen čime razara i otvara zatvorene pukotine.

Abrazija je usitnjavanje komadića osnovne stijene u procesu premještanja. Tada se komadići sudaraju, lome i tako usitnjavaju. Taj proces se događa bez obzira na koji se način prenosi.

Nakon rastrožbe slijedi prijenos sitnijih čestica stijene gdje se ubrajaju fizikalni čimbenici. Na kraju procesa prijenosa dolazi do sedimentacije. Najprije se talože najkrupnije čestice, a na kraju u mirnoj vodi suspendirane čestice. Konačni proizvod je tlo koje ima svoj granulometrijski sastav. [2]

Posljedica svih tih procesa je raznolikost tla. Sadrži slojeve i proslojke različita prostiranja, debljine, sastava, osobina, čvrstoće. Zbog toga se svojstva takvog materijala ne mogu definirati jednostavnim odnosima i izrazima. Tlo se upotrebljava kao građevinski materijal, ali i materijal na kojem se gradi i od kojeg se gradi. Neki se zahvati izvode u tlu, čime je narušena prirodna ravnoteža. Za potrebe projektiranja, potrebno je izraditi geotehnički model tla koji se kasnije koristi za proračune stabilnosti, uporabivosti, otpornosti, čvrstoće, a on se ne može osloniti na pretpostavkama da je tlo homogeno i linearno elastično, već heterogeno, anizotropno i plastično. Geotehnički model tla obuhvaća prostorni raspored slojeva sličnih mehaničkih svojstava, parametre tla u svim slojevima sa zakonitostima na koje se ti parametri odnose u uvjetima i pretpostavkama pod kojima prihvatljivo opisuju ponašanje tla u rasponu koji je relevantan za planirani zahvat i rubne uvjete koji mogu utjecati na geotehnički model i koji se mogu javiti tijekom zahvata i kasnije tijekom eksploatacije objekta. [1]

Osnovna podjela tla je u dvije skupine:

- krupnozrnata ili nekoherentna tla - sadrže preko 50% zrna većih od 0,060 mm, tj. vidljiva su golim okom. Osnovno svojstvo im je da između zrna nema kohezije, već sile gravitacije. Osnovni predstavnici su pijesak i šljunak.

- sitnozrnata ili koherentna tla – sadrže više od 50% zrna manjih od 0,060 mm, tj. nisu vidljiva golim okom. Kod njih je sila kohezije između čestica bitna. Osnovni predstavnici su prah i glina.

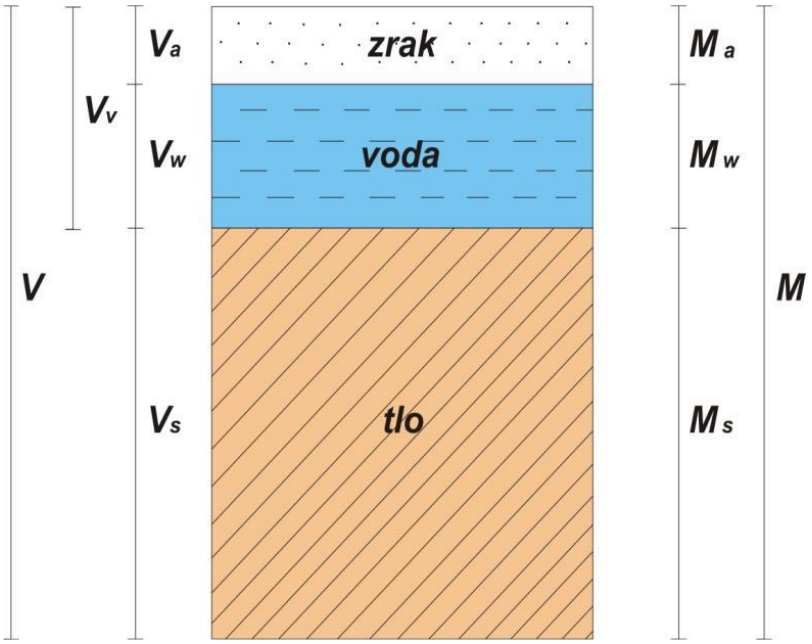
Svrha klasifikacije je svrstati raznolike vrste tla u klase sa sličnim svojstvima radi lakšeg opisivanja, sporazumijevanja, proučavanja i usporedbe rezultata iz različitih laboratorija. Prvu značajniju ACS klasifikaciju ("airfield classification system") razvio je Arthur Casagrande, a 1952. njenom modifikacijom nastaje USCS klasifikacija ("Unifield soil classification system") koja se danas najviše koristi a prikazana je u tablici 1. Za klasifikaciju se koriste rezultati analiza granulometrijskog sastava i granice konzistencije koherentnih tla što će oboje biti objašnjeno u nastavku. [2]

Tablica 1. USCS klasifikacija

<table>
<tr><th colspan="3">GLAVNA PODJELA</th><th>GRUPA SIMBOLA</th><th>UOBIČAJENI NAZIVI</th><th colspan="2">KLASIFOKACIJSKI KRITERIJ ZA KRUPNOZRNATA TLA</th></tr>
<tr><td rowspan="10">Krupnozrnata tla (više od polovice materijala s zrncima većim od 0.06 mm)</td><td rowspan="2">Šljunak ( više od polovice krupnih frakcija s zrnima većim od 2 mm)</td><td>Čisti šljunak (malo ili ništa sitnih frakcija)</td><td>GW</td><td>Dobro graduirani šljuncim, Mješavina šljunka i pijeska, Malo ili ništa sitnih čestica</td><td colspan="2">$C_u = D_{60}/D_{10} >4$<br>$C_c= 1< D3_0^2/ (D_{10} *D6_0)<3$</td></tr>
<tr><td>GP</td><td>Slabo graduirani šljunci, Mješavina šljunka i pijeska Malo ili ništa sitnih čestica</td><td colspan="2">Sve gradacije koje ne zadovoljavaju kriterija za GW</td></tr>
<tr><td rowspan="8">Pijesak (više od polovicekrupnih frakcija s zrnima manjim od 2 mm)</td><td rowspan="2">Šljunak sa sitnim česticama</td><td>GM</td><td>Prašinasti šljunci, mješavina šljunka, pijeska i praha</td><td>Atterbergove granice ispod A-linije ili Ip</td><td rowspan="2">Iznad A-linije sa 4<Ip<7 i zahtijevaju uporabu dvojih simbola</td></tr>
<tr><td>GC</td><td>Glinoviti šljunci, mješavina šljunka, pijeska i mulja</td><td>Atterbergove granice iznad A-linije ili Ip>7</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Čisti pijesak (malo ili ništa sitnih čestica)</td><td>SW</td><td>Dobro graduirani pijesci, šljunkoviti pijesci, malo ili ništa sitnih čestica</td><td colspan="2">$C_u=D_{60}/D_{10} >6$<br>$C_c=1 <D_{30}^2/(D_{10}*D_{60})<3$</td></tr>
<tr><td>SP</td><td>Slabo graduirani pijesci, šljunkoviti pijesci, malo ili ništa sitnih čestica</td><td colspan="2">Sve gradacije koje ne dozvoljavaju kriterije za SW</td></tr>
<tr><td rowspan="2">Pijesak sa sitnim česticama</td><td>SM</td><td>Prašinasti pijesci, mješavina pijeska i praha</td><td>Atterbergove granice ispod A-linije ili Ip<4</td><td rowspan="2">Iscrtane granice u zoni vrijednosti s 4<Ip <7 i zahtijevaju uporabu dvojnih simbola</td></tr>
<tr><td>SC</td><td>Glinoviti pijesci, mješavina pijeska i praha</td><td>Atterbergove granice iznad A-linije ili Ip>7</td></tr>
<tr><td rowspan="10">Sitnozrnata tla (više od polovice materijala s zrnima manjim od 0.06 mm)</td><td colspan="2" rowspan="4">Prašina i glina (granica tečenja < 50)</td><td>ML</td><td>Neorganski prah i vrlo fini pijesci, kameno brašno, prašinasti i glinoviti pijesci ili glinovite prašine niske plastičnosti</td><td colspan="2" rowspan="4">- odrediti postotke pijeska i šljunka iz granulometrijske krivulje - u ovisnosti o postotcima sitnih čestica (frakcije <0,06 mm); krupnozrnata tla su klasificirana:<br><br>- Manje od 5% : GW, GP, SW, SP - Od 5% do 12% : granični slučajevi koji zahtjevaju uporabu dvojnih simbola</td></tr>
<tr><td>CL</td><td>Neorganske gline niske do srednje plastičnosti, šljunkovite gline, pjeskovite gline, muljevite gline, mršave gline</td></tr>
<tr><td>OL</td><td>Organski prah i organske prašinaste gline niske plastičnost</td></tr>
<tr><td rowspan="3">Prašina i glina (granica tečenja > 50)</td><td>MH</td><td>Neorganski prah, tinjčasti i dijatomejski materijali</td></tr>
<tr><td>CH</td><td>Neorganske gline visoke plastičnosti, masna glina</td></tr>
<tr><td>OH</td><td>Organske gline srednje do visoke plastičnosti, organski prah</td></tr>
<tr><td colspan="2">prah</td><td>Pt</td><td>Treset i druga visoko organska tla</td></tr>
</table>

## 2.1. Trofazni karakter tla

Složenost nastanka tla očituje se i u njegovoj građi. Ukupni volumen tla sastoji se od čvrstih čestica i međuprostora – pora (mogu biti ispunjene zrakom i vodom). Ovisno o građi tla, ovise i njegova svojstva. S obzirom na to, tlo se sastoji od tri faze: čvrstih čestica, vode i zraka (slika 1.). [2], [5]




Slika 1. Trofazni sustav tla [6]

Oznake: M - ukupna masa

$M_s$ – masa čvrstih čestica

$M_w$ - masa vode

$M_a$ - masa zraka = 0

V - ukupni volumen

$V_s$ - volumen čvrstih čestica

$V_w$ - volumen vode

$V_a$ - volumen zraka

$V_v$ - volumen pora

## 2.2. Granulometrijski sastav

Granulometrijski sastav je zbroj svih razreda promjera zrna i njihovih postotaka masa, tj. sadržaj zrna različite veličine u određenoj količini tla izražen u postotku težine. Već se samo na temelju granulometrijskog sastava mogu odrediti neke fizičke karakteristike tla bitne za njegovu primjenu u geotehničkim zahvatima:

- vodopropusnost
- stišljivost
- kapilarnost
- filtarska svojstva
- nosivost

Osnovni koraci u određivanju granulometrijskog sastava su odabiranje reprezentativnog uzorka (prema promjeru najvećeg zrna), dispergiranje agregata na konačne čestice i mjerenje masa pojedinih frakcija. Postoje 3 tipa određivanja granulometrijskog sastava:

- sijanje
- areometriranje
- kombinirana analiza [4], [5]

### 2.2.1. Sijanje

Provodi se suhim ili mokrim postupkom za zrna veća od 0,060 mm. Koristi se niz sita standardnih dimenzija čiji se otvori smanjuju na svakom sljedećem situ. Nađe se i izmjeri najveće zrno, izvaže se količina materijala koja će se sijati, zatim se sipa u najgrublje sito koje je dio niza sita i stavlja na tresilicu gdje se uzorak i sita tresu 10-15 min. Nakon toga se izvaže ostatak na svakom situ i ostatak koji je uhvaćen u zdjeli (prošao je kroz najfinije sito). [6]

Zatim se računa postotak ukupnog uzorka između 2 promjera sita prema izrazu :

$$N_i = \frac{\sum_i m_i}{\sum_n m_i} \times 100 \ [\ \% \ ] \qquad \text{(izraz 1.)}$$

gdje je $m_i$ masa ostatka na situ $i$.

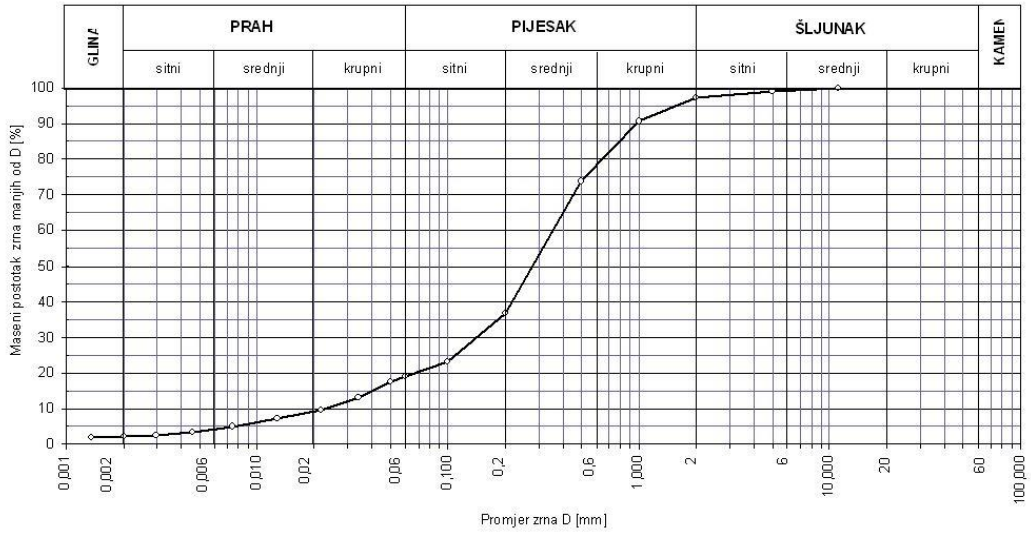
Najčešće se crtaju kumulativni granulometrijski dijagrami, kod kojih se jedni postoci pribrajaju drugima. Za crtanje takvog dijagrama je potrebno odrediti:

$$N_{Di} = 100 \ - \sum_1^i N_i \quad [\ \%] \qquad \text{(izraz 2.)}$$

Gdje je: $N_{Di}$ – koeficijent prolaska mase [%] kroz sito (linearno mjerilo)

$D$ – promjer zrna [mm] (logaritamsko mjerilo)

Postupak za mokro sijanje je isti, samo se materijal na svakom situ ispire vodom, suši i važe, a proračun se ponavlja. Granulometrijski dijagram je prikazan na slici 2. [5]




Slika 2. Granulometrijski dijagram [6]

Na granulometrijskom dijagramu se dobije granulometrijska krivulja, iz koje se može očitati efektivni promjer zrna ($D_{10}$), koeficijent jednolikosti ($C_u$) i koeficijent zakrivljenosti ($C_c$) na temelju kojih se klasificira graduiranost nekoherentnog tla.

Koeficijent jednolikosti i koeficijet zakrivljenosti računaju se prema sljedećim formulama:

koeficijent jednolikosti : $$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} \qquad \text{(izraz 3.)}$$

koeficijent zakrivljenosti: $$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{60 \times D_{10}}} \qquad \text{(izraz 4.)}$$

Preme vrijednostima koefcijenta jednolikosti i koeficijenta zakrivljenosti nekoherentna tla dobivaju dodatne klasifikacijske oznake što je prikazano u tablici 2. , s time da ako se radi o šljunku, dobivaju oznaku G (gravel) ili pijesku S (sand). [4], [5]

Tablica 2. Klasifikacija nekoherentnog tla prema graduiranosti

| | UVJETI | | SIMBOL |
|---|---|---|---|
| GRADUIRANOST | $C_u$ | $C_c$ | |
| DOBRO GRADUIRANI PIJESAK | $C_u > 6$ | $C_c > 3$ | SW |
| DOBRO GRADUIRANI ŠLJUNAK | $C_u > 4$ | $1 < C_c > 3$ | GW |
| LOŠE GRADUIRANI PIJESAK /ŠLJUNAK | UKOLIKO NIJE ZADOVOLJEN JEDAN ILI OBA UVJETA | | SP / GP |

### 2.2.2. Areometriranje

Areometriranje je metoda određivanja granulometrijskog sastava tla za materijal koji sadrži zrna manja od 0,06 mm. Takve čestice nisu vidljive okom pa se veličina i postotak pojedinih frakcija određuju indirektno, tj. mjerenjem gustoće u određenim vremenskim intervalima primjenjujući Stockesov zakon. Stockesovim zakonom se definira brzina padanja zrnaca u mirnoj tekućini koja je veća što su čestice krupnije. Sam pokus nije previše zahtjevan. Prema jednom od postupka ispitivanja, iz uzorka se mokrim postupkom sijanja izdvoje čestice veće od 0,2 mm. Čestice manje od 0,2 mm dispergiraju se u destiliranoj vodi i ta suzpenzija ide na areometriranje. Za areometriranje se stavlja suzpenzija u menzuru od 1000 ML, prethodno se dodaje antikoagulans da se ponište električni naboji čestica tla, homogenizira se i mjeri se promjena gustoće areometrom. Areometar mjeri gustoću gdje pluta njegovo težište, a gustoća se očitava na mjestu gdje vrat areometra izviruje iz suspenzije (slika 3.), (slika 4.). [5]



Slika 3. Areometar [7]




Slika 4. Areometar u suspenziji [8]

2.2.3. Kombinirana analiza

U slučaju da materijal sadrži krupne i sitne frakcije, koriste se obje metode. Faktor koji to određuje je postotak prolaza kroz sito s otvorom 0,06 mm, tj. ako je više od 10 % provodi se kombinirana analiza. [5]

2.3. Indeksni pokazatelji

Svojstva tla mijenjaju se s promjenom poroziteta i vlažnosti pa se za klasifikaciju uz granulometrijski sastav, koriste i indeksni pokazatelji. To su:

- relativna gustoća za nekoherntne materijale
- granice konzistencije za koherentne materijale [4], [5]

### 2.3.1. Relativna gustoća

Indeks relativne gustoće je odnos između razlike maksimalno mogućeg i stvarnog koeficijenta pora i razlike maksimalnog i minimalnog mogućeg koeficijenta pora, a izračunava se prema sljedećem izrazu:

$$I_D = \frac{e\max - e_0}{e_{max} - e_{min}} \qquad \text{(izraz 5.)}$$

gdje su : $e_0$ – koeficijent pora u prirodnom stanju

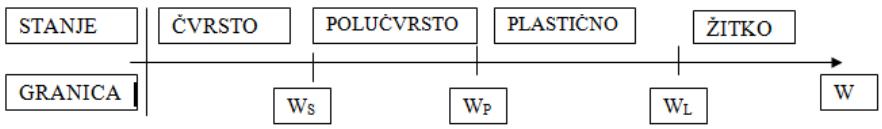
$e_{max}$ – koeficijent pora u najgušćem stanju

$e_{min}$ – koeficijent pora u najrahlijem stanju [4], [5]

### 2.3.2. Granice konzistencije (Atterbergove granice)

Fizička svojstva koherentnih tla mijenjaju se s promjenom sadržaja vode. Suho koherentno tlo može biti čvrsto i kruto, a s porastom vode postaje plastično, meko,a zatim tekuće, tj. žitko. Granice između tih stanja definirao je Albert Atterberg početkom dvadesetog stoljeća pa se stoga zovu i Atterbergove granice. One se određuju relativno jednostavnim ispitivanjima u laboratoriju i prikazane su u tablici 3.

Tablica 3. Atterbergove granice [5]




gdje su: $W_S$ – granica stezanja

$W_P$ – granica plastičnosti

$W_L$ – granica tečenja

#### 2.3.2.1 Granica stezanja

Granica stezanja je ona vlažnost kod koje se sušenjem volumen uzorka ne mijenja, tj. uzorak se steže do kad čestice ne dođu u tako zbijenu strukturu da ih sile više ne mogu zbijati. Granica stezanja u laboratoriju se određuje sušenjem zasićenog uzorka u posudi poznatog volumena, s time da se svakim sušenjem određuje vlažnost i volumen sve do kad se sušenjem volumen ne promijeni. [5], [6]

#### 2.3.2.2. Granica plastičnosti

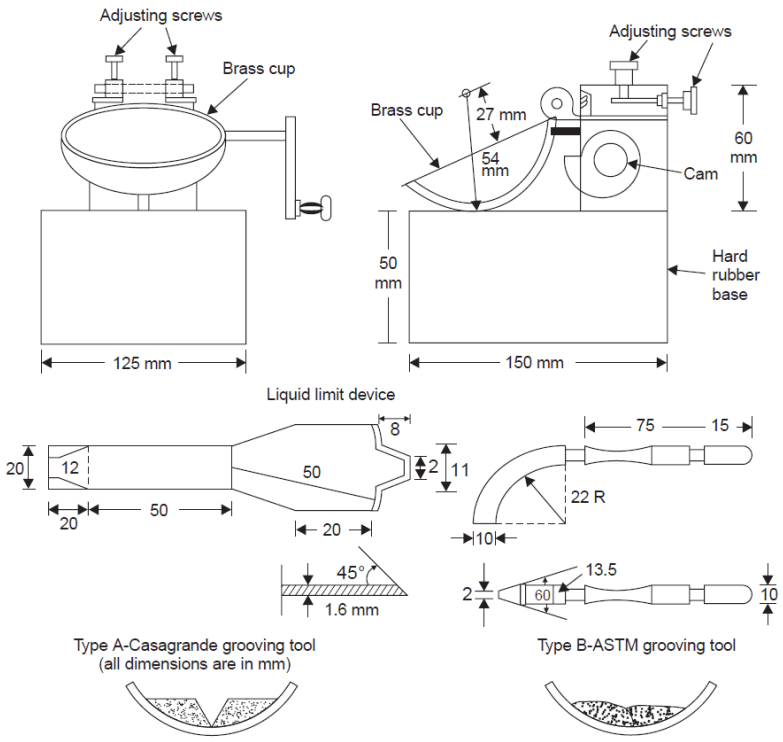
Granica plastičnosti je ona vlažnost kod koje valjčić uzorka tla promjera 3 mm počinje imati plastične deformacije (trajne pukotine). Njegovo određivanje je već navedeno u definiciji, tj. rade se valjčići promjera 3 mm sve do kad počnu pucati i zatim idu na sušenje i vaganje da se odredi ta vlažnost. Taj test mnogo ovisi o ispitivaču, ali za sada nema druge metode za određivanje granice plastičnosti. [2]

#### 2.3.2.3. Granica tečenja

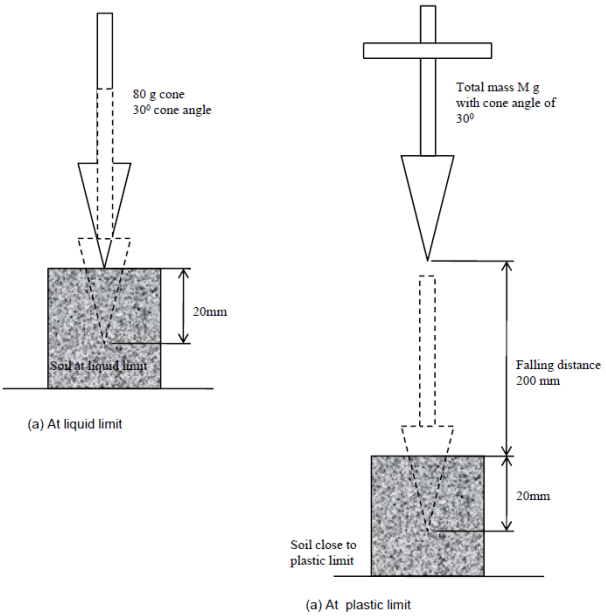
Granica tečenja je ona vlažnost kod koje se pri malom poremećaju tlo počne ponašati kao žitka masa. Za određivanje ove granice koristi se Casagrande - ov aparat i padajući šiljak. Određivanje granice tečenja pomoću obje metode će biti objašnjene u praktičnom dijelu. Na slici 5. su prikazana oba aparata, a na slici 6. i 7. pojedine dimenzije. [2]



Slika 5. Aparati za određivanje granice tečenja (desno: Casagrandeov aparat, lijevo: padajući šiljak) [9]




Slika 6. Dimenzije pojedinih dijelova Casagradeova aparata [10]




Slika 7. Dimenezije padajućeg šiljka [11]

Unutar dviju Atterbergovih granica materijal ima određeno konzistentno stanje.

Konzistentno stanje može biti:

- čvrsto - od potpuno suhog materijala do granice stezanja; materijal se prilikom gnječenja raspada u sitnije grudice
- polučvrsto - od granice stezanja do granice plastičnosti; materijal se može prignječiti
- plastično - od granice plastičnosti do granice tečenja; materijal se može prignječiti, ali se ne može više preoblikovati
- žitko - iznad granice tečenja; materijal se ponaša kao žitka tekućina [2]

Na temelju navedenih granica, određuje se indeks plastičnosti, indeks konzistencije i indeks tečenja prema sljedećim formulama:

Indeks plastičnosti: $$I_P = W_L - W_P$$ (izraz 6.)

Indeks konzistencije: $$I_C = \frac{W_L - W_0}{I_P}$$ (izraz 7.)

Kada indeks konzistencije iznosi 0, materijal je u prirodnom stanju na granici tečenja, a kada je jednak 1, materijal je u prirodnom stanju na granici plastičnosti.

Indeks tečenja: $$I_L = \frac{W_0 - W_P}{I_P}$$ (izraz 8.)

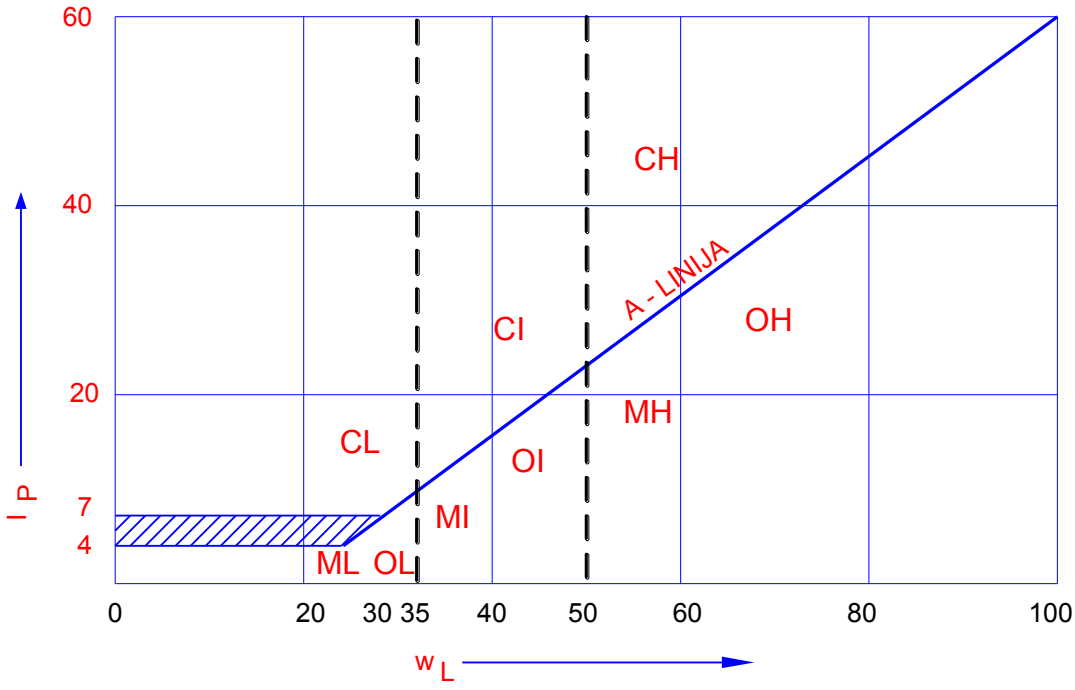
Njegova vrijednost iznosi 0 kada je prirodna vlažnost tla na granici plastičnosti te 1 na granici tečenja. Može biti i negativan za izrazito suho tlo i veći od 1 za tla kod kojih vrijedi $w_0 > w_L$ (jako rijetka tla). [2]

2.3.2.4. Dijagram plastičnosti

A. Casagrande predložio je da se vlage na granici tečenja i indeks plastičnosti prikažu na dijagramu plastičnosti gdje se na apscisi nalazi indeks plastičnosti, a na ordinati granica tečenja. Proučavanjem je ustanovio da postoji kosi A pravac čija je jednadžba:

$$I_P = 0{,}73 \times (W_L - 20)\ .$$ (izraz 9.)

On dijeli područje dijagrama na 2 zone: iznad A-linije gdje se nalaze glinoviti materijali i ispod A-linije prahoviti materijali i organske gline. Mora se uzeti u obzir i kada je granica tečenja ispod 50%, materijal je niskoplastičan (oznaka L), a kada je više od 50% visokoplastičan (oznaka H). Materijali koji se nalaze u dijagramu na istim točkama imaju slična svojstva pa stoga je to dobar način za klasifikaciju koherentnih tla. Dijagram je prikazan slici 8. [5]



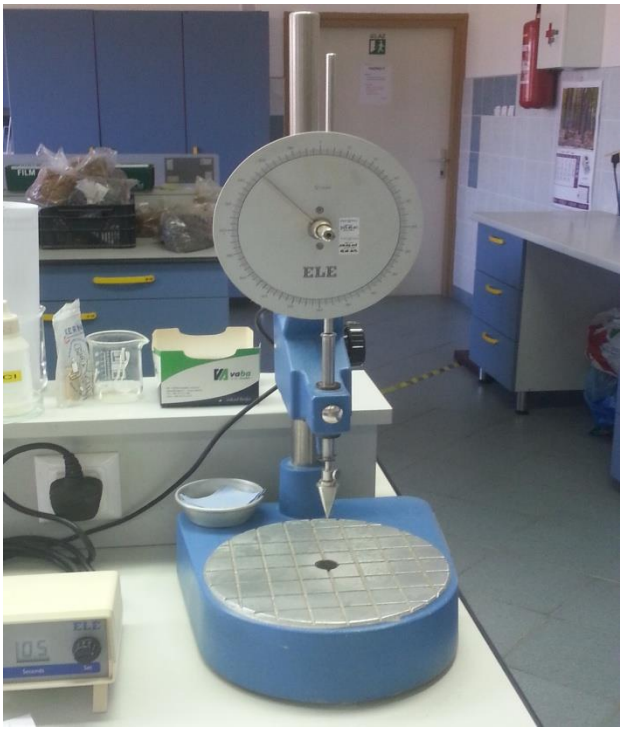

Slika 8. Dijagram plastičnosti [5]

## 3. Praktični dio

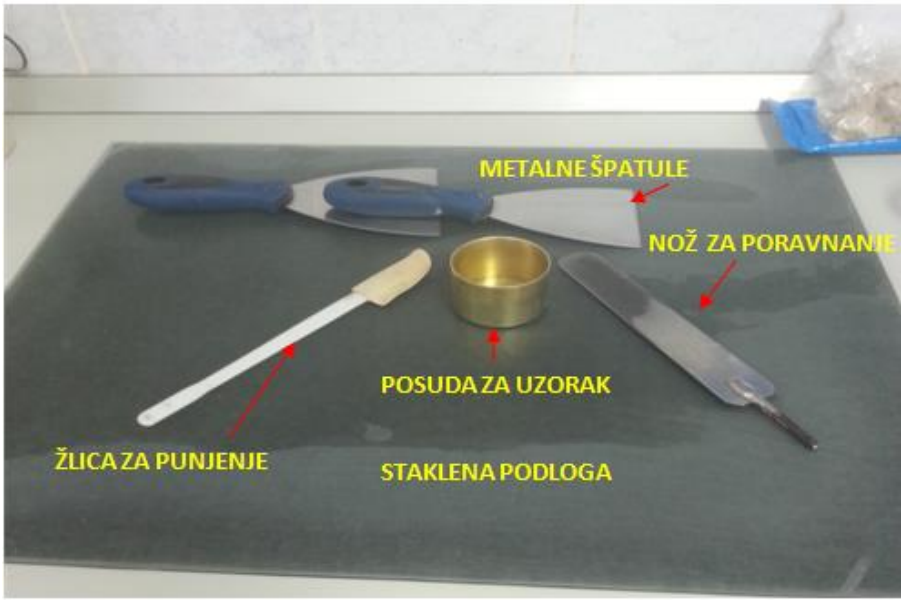
Praktični dio sastojao se od određivanja granice tečenja u rasponu 25 % - 80 % 11 poremećenih uzoraka i umjetnom materijalu na dva načina: padajućim šiljkom i Casagrande - ovim aparatom.

### 3.1. Određivanje granice tečenja padajućim šiljkom

Ispitivanje je izvođeno prema normi BS 1337, Part 2 („ British Stadards“). Oprema koja je potrebna je padajući šiljak sa automatskom štopericom, posuda za uzorak, žlica za punjenje posudice, nož za poravnanje uzorka, staklena podloga i metalne špatule. Pribor je prikazan na slikama 9. i 10.




Slika 9. Padajući šiljak




Slika 10. Oprema za određivaje granice tečenja padajućim šiljkom

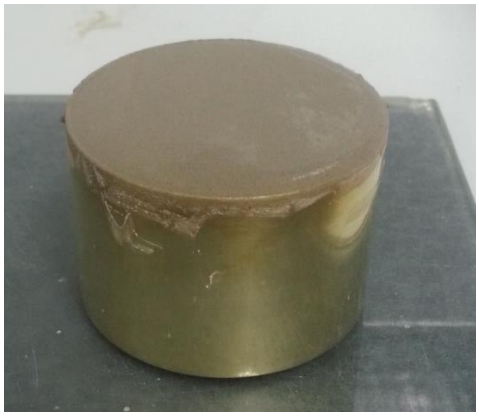
Postupak određivanja granice tečenja padajućim šiljkom:

1. Uzorak tla sije se kroz sito otvora veličine 0,425 mm da se uklone kamenčići, zatim se uzorak miješa destiliranom vodom i homogenizira metalnim špatulama s ciljem da cijeli uzorak ima istu vlagu (slika 11.).



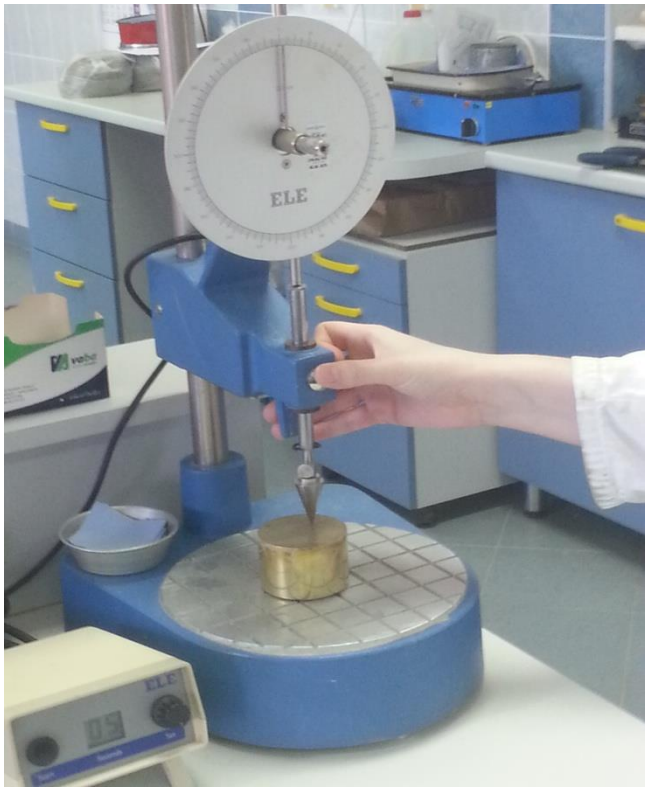
Slika 11. Homogeniziranje uzorka

2. Žlicom se puni posudica, a pritom se pazi da nema mjehurića zraka i na kraju se višak uzme nožem da površina bude glatka i ravna (slika 12.).



Slika 12. Posuda sa uzorkom

3. Padajući šiljak se zakoči i podigne, pusti se potporni sklop tako da vrh stošca jedva dodiruje površinu tla u čaši. Spusti se cijev mjernog brojila tako da se ostvari dodir s osovinom šiljka i da se dobije očitavanje (slika 13.). Uključi se automatska štoperica namještena na 5 sekundi.




Slika 13. Položaj prije početka mjerenja

4. Nakon 5 sekundi prodiranja u glatku površinu tla, zakoči se šiljak na novoj poziciji, spusti se cijev mjernog brojila da dođe u dodir s osovinom šiljka, te se zabilježi novo očitavanje do točnosti 0,1 mm.

5. Šiljak se podigne i očisti, i ponovi se mjerenje na istom uzorku. Ako je razlika manja od 0,5 mm, uzima se srednja vrijednost dubine prodiranja šiljka. U slučaju da je razlika veća od 0,5 mm, uzorak se vadi iz posude, ponovo se homogenizira i mjerenje se ponavlja do kad razlika između 2 mjerenja nije prihvatljiva (0,5 mm).

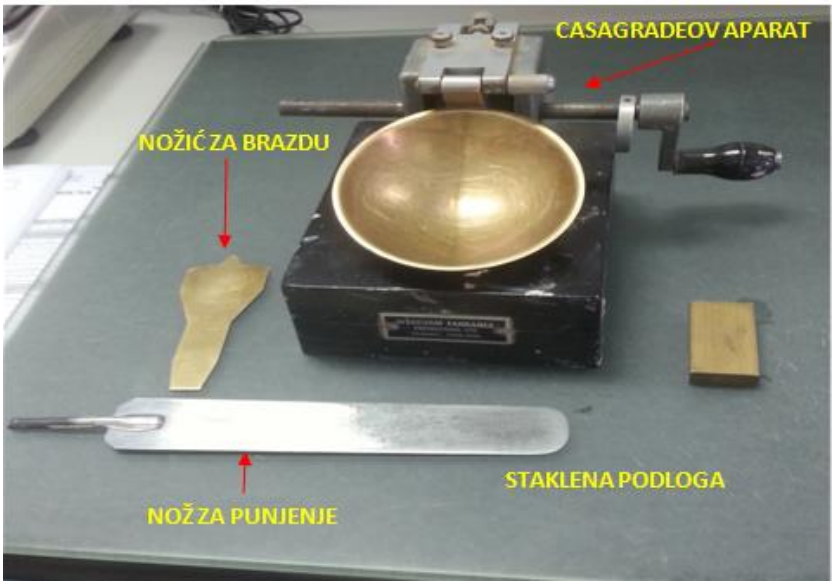
6. Nakon zapisivanja rezultata u obrazac, uzima se posudica za vaganje, važe se prazna, a zatim se u nju stavlja mali dio ispitivanog uzorka. To se važe i stavlja u sušionik na sušenje.

7. Trebaju se dobiti 3 točke tako da je prodiranje šiljka između 15 – 25 mm. To se dobije tako da se istom uzorku dodaje različita količina destilirane vode čime se mijenja stanje od sušeg prema vlažnijem. Ako je uzorak sušiji, prodiranje je manje, a u vlažnijem uzorku je prodiranje veće. Granica tečenja je pogođena, ako je prodiranje šiljka 20 mm za 5 sekundi.

8. Nakon svakog uklanjanja uzorka iz posude, posuda i stožac se moraju temeljito oprati i očistiti da bi sljedeća očitanja bila reprezentativna.

3.2. Određivanje granice tečenja Casagrande – ovim aparatom

Norma prema kojoj je izvođeno ispitivanje je ASTM D 4318 („American society of testing materials“). Oprema koja se koristi je: Casagrande – ov aparat, nožić za urezivanje brazde, nožić za punjenje i poravnanje , metalne špatule za homogeniziranje uzorka i staklena podloga (slika 14.).




Slika 14. Dio opreme za određivanje granice tečenja Casagrande – ovim aparatom

Postupak za određivanje granice tečenja Casagrande – ovim aparatom:

1. Uzorak tla/materijala sije se kroz sito otvora veličine 0,425 mm da se uklone kamenčići, zatim se uzorak miješa destiliranom vodom i homogenizira metalnim špatulama s ciljem da cijeli uzorak ima istu vlagu.

2. U zdjelicu se razmaže homogeniziran uzorak tla, koji se mora dobro pritisnuti u posudu da bi se eliminirali eventualni mjehurići zraka. Uzorak u posudi mora biti horizontalan (slika 15.).



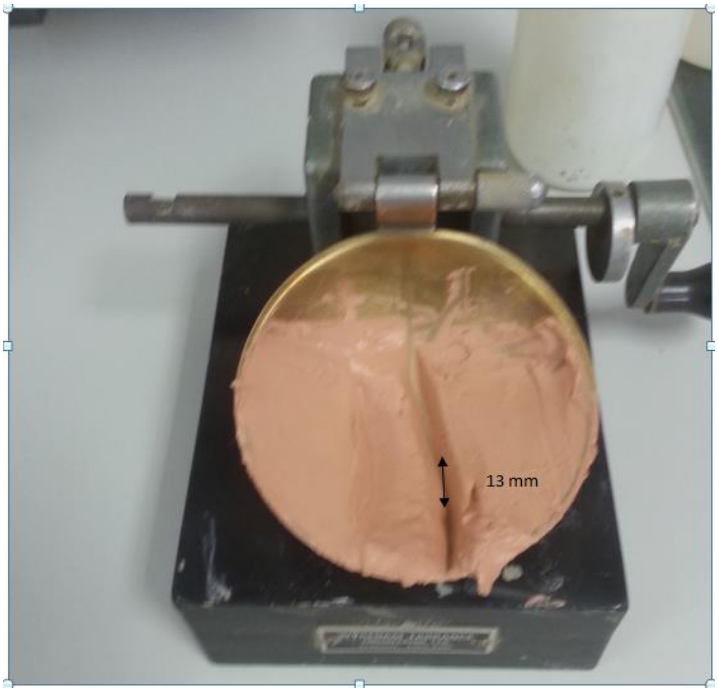

Slika 15. Posuda s uzorkom

3. Uzorku se po sredini zareže normiran žlijeb nožem posebna oblika, pri čemu nož treba držati okomito na dno zdjelice, tako da širina žlijeba na dnu stalno iznosi 2 mm. Potrebno je pripaziti da se uzorak ne pomiče prilikom urezivanja brazde, tako je uzorak u mjedenoj zdjelici podijeljen na dvije polovice (slika 16.).




Slika 16. Uzorak podijeljen na 2 dijela nožićem za brazdu

4. Tada se okreće ručka aparata takvom brzinom da zdjelica pada dva puta u sekundi, čime se žlijeb urezan u masu postepeno zatvara sve do dok se žlijeb na dnu zdjelice ne zatvori u duljini od 12 do 13 mm (slika 17.). Ako broj udaraca prođe 50, tada se ne zapisuje broj udaraca, nego se uzorku dodaju destilirana voda, homogenizira se i ponavlja postupak.




Slika 17. Spojeni uzorak za određen broj udaraca

5. Nožem se uzme uzorak na mjestu gdje se spojio, to se stavlja u unaprijed izvaganu posudu za vaganje, važe zajedno sa uzorkom i stavlja na sušenje u sušionik. Preostali dio uzorka se izvadi iz posude aparata te se posuda očisti i osuši.

6. Cijeli uzorak se pomiješa, dodaje se mala količina destilirane vode da bi se povećala vlažnost s ciljem smanjenja broja udaraca. Znači da što je uzorak vlažniji, broj udaraca je manji, a što je suši broj udaraca je veći.

7. Postupak se ponavlja još 2 puta s različitim sadržajem vode, tako da se kod svakog ispitivanja dobije različit broj udaraca. Za dobar raspon vrijednosti kod grafičkog rješenja trebalo bi imati broj udaraca ispod 20, oko 20 i iznad 20. Granica tečenja je pogođena ako se žlijeb u uzorku spoji na dužini 12 do 13 mm na 25 – om udarcu.

## 3.3. Interpretacija dobivenih podataka

Nakon sušenja do stalne mase , uzorci se ponovo važu i podaci se zapisuju u tablicu 4. (za granicu tečenja određenu padajućim šiljkom) i tablicu 5. (kada je granica tečenja određena Casagrande - ovim aparatom).

Tablica 4. Rezultati ispitivanja granice tečenja padajućim šiljkom

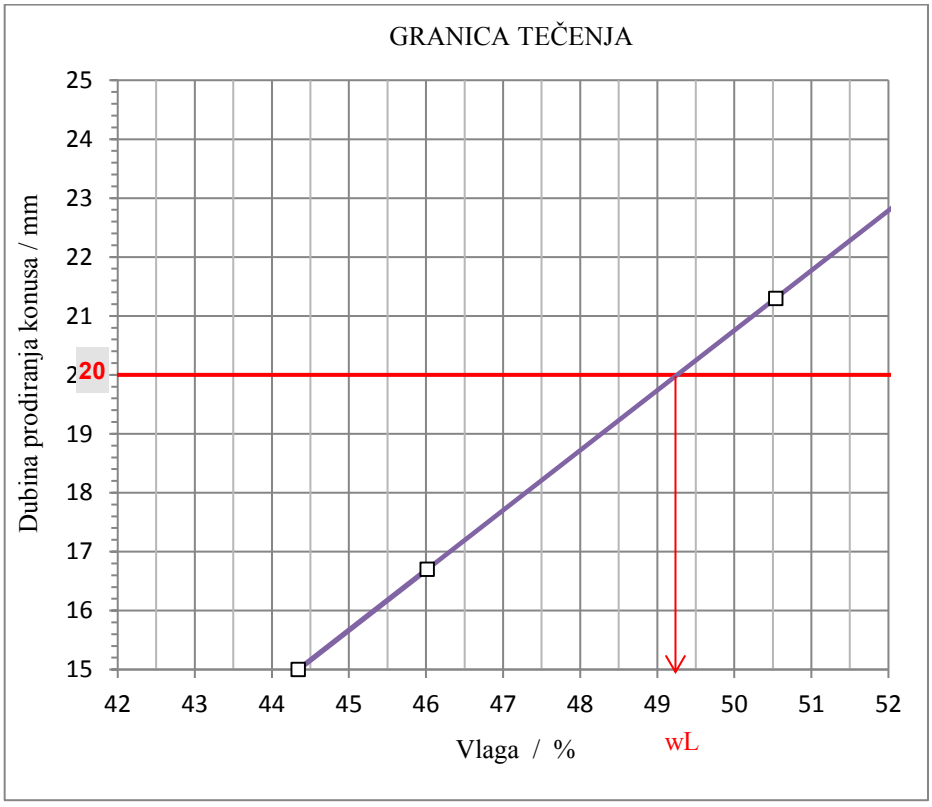
| | Granica tečenja $w_L$ | | |
|---|---|---|---|
| Oznaka posude | | | |
| Masa posude $M_p$ [g] | | | |
| Masa posude i vlažnog uzorka $M_{p1}$ [g] | | | |
| Masa posude i suhog uzorka $M_{p2}$ [g] | | | |
| Masa vode $M_w = M_{p2} – M_{p1}$ | | | |
| Masa suhog uzorka $M_d = M_{p2} - M_p$ [g] | | | |
| Vlaga $W_0 = (M_W/M_d) *100$ [%] | | | |
| Dubina prodiranja šiljka | | | |

Tablica 5. Rezultati ispitivanja granice tečenja Casagrande – ovim aparatom

| | Granica tečenja $w_L$ | | |
|---|---|---|---|
| Oznaka posude | | | |
| Masa posude $M_p$ [g] | | | |
| Masa posude i vlažnog uzorka $M_{p1}$ [g] | | | |
| Masa posude i suhog uzorka $M_{p2}$ [g] | | | |
| Masa vode $M_w = M_{p2} – M_{p1}$ | | | |
| Masa suhog uzorka $M_d = M_{p2} - M_p$ [g] | | | |
| Vlaga $W_0 = (M_W/M_d) *100$ [%] | | | |
| Broj udaraca | | | |

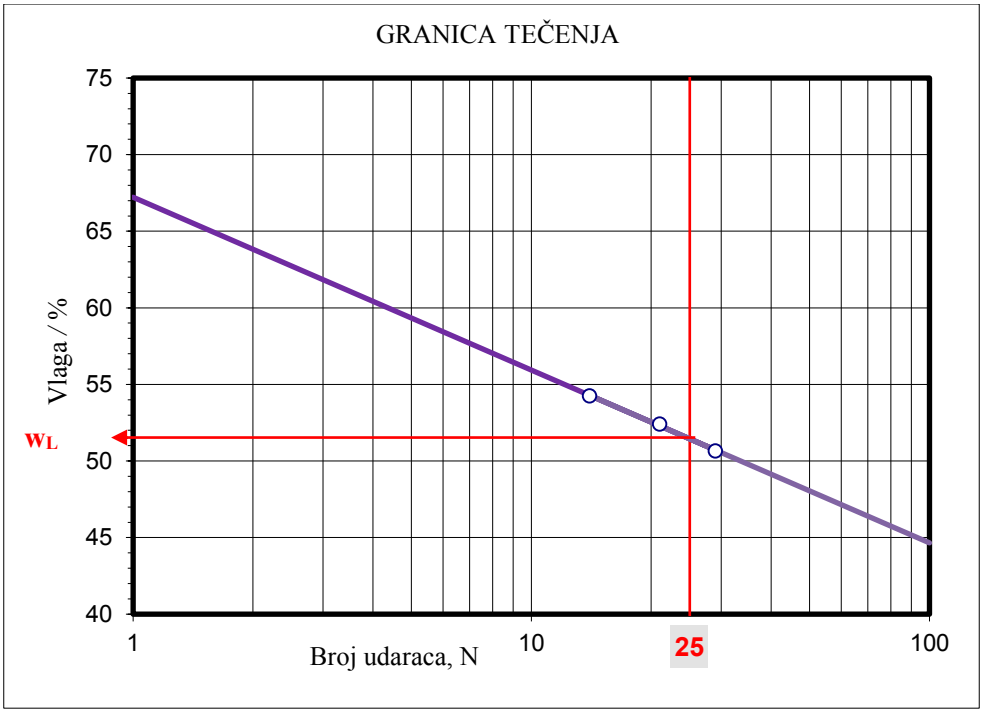
Nakon zapisivanja podatka u tablice, crtaju se dijagrami na temelju izračunatih podataka. Kod ispitivanja padajućim šiljkom na os apscise nanosi se vlažnost pri pojedinom prodiranju šiljka izražena u % u linearnom mjerilu, a na os ordinatu dubina prodiranja šiljka izražena u mm, također u linearnom mjerilu. Kada se ucrtaju točke (najmanje 3), kroz njih se crta regresijski pravac i grafički se određuje granica tečenja za prodiranje šiljka u uzorak pri 20 mm, što je prikazano u dijagramu 1.

Dijagram 1. Granica tečenja određena padajućim šiljkom




Kod određivanja granice tečenja Casagrande – ovim aparatom, dijagram i grafičko određivanje je drugačije. Na os apscise nanosi se broj udaraca u logaritamskom mjerilu, a na os ordinatu vlaga kod pojedinog broja udaraca izražena u % u linearnom mjerilu. Kada se ucrtaju točke (najmanje 3), kroz njih se crta regresijski pravac i grafički se određuje granica tečenja za točno određen broj udaraca, tj. 25, što je prikazano u dijagramu 2.

Dijagram 2. Granica tečenja određena Casagrande – ovim aparatom




### 3.3.1. Analiza podataka granice tečenja do 35 %

Granica tečenja  smanjuje se porastom udjela pijeska u uzorku i to je karakteristika ove grupe materijala. Kod Casagrande – ovog aparata se nije mogla odrediti granica tečenja jer se uzorak spojio već kod 1 ili 2 udarca. Osim toga, uzorak se nije mogao podijeliti na 2 jednaka dijela nožićem za brazdu a da dio uzorka nije izašao van  iz zdjelice (slika 18.).



Slika 18. Problem kod određivanja granice tečenja do 35 %

Iz tog razloga se određivala granica tečenja Casagrande – ovim aparatom s metodom jedne točke.

3.3.1.1. Casagrande – ova metoda s jednom točkom

Ispitivanje se izvodi prema normi ASTM D 4318. Kod metode s jednom točkom postupak određivanja je isti samo što se ne rade ponavljanja, već se radi samo s jednom vlagom i jednim brojem udarca. Tla s granicom tečenja većom od 120 % ne mogu se ispitivati ovom metodom. Točnost ove metode je ± 2 %. Vlažnost na granici tečenja izračunava se prema sljedećem izrazu :

$$w_L = w_N \times \left(\frac{N}{25}\right)^{tg\,\beta} \qquad \text{(izraz 10.)}$$

gdje su : $W_L$ - granica tečenja

$W_N$ - vlaga pri N udaraca

N - broj udarca potreban da se uzorak spoji na duljini 12 – 13 mm

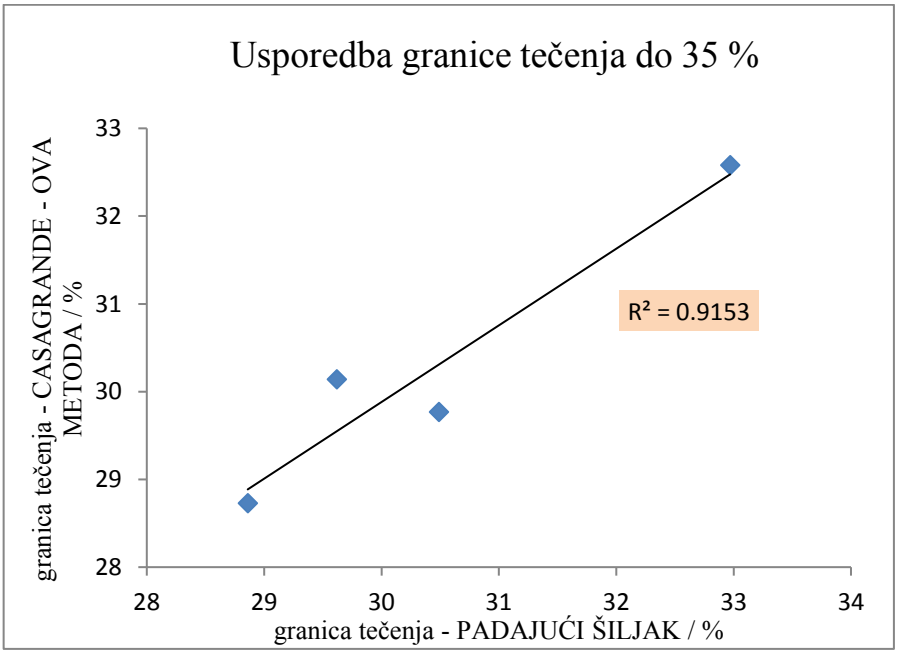
tg β - empirijski koeficijent koji iznosi 0,121 [12]

Granice tečenja određena po obje metode prikazan je u tablici 6. i dijagramu 3.

Tablica 6. Granica tečenja do 35 % određena padajućim šiljkom s 3 točke i metodom s jednom točkom

| **GRANICA TEČENJA** | |
|---|---|
| **PADAJUĆI ŠILJAK/ %** | **METODA S JEDNOM TOČKOM / %** |
| 29,62 | 30,14 |
| 28,86 | 28,73 |
| 30,49 | 29,77 |
| 32,97 | 32,58 |

Dijagram 3. Usporedba granice tečenja do 35 % određena padajućim šiljkom i Casagrande – ovom metodom




Na temelju koeficijenta korelacije, koji iznosi 0,95, može se zaključiti velika linearna zavisnost.

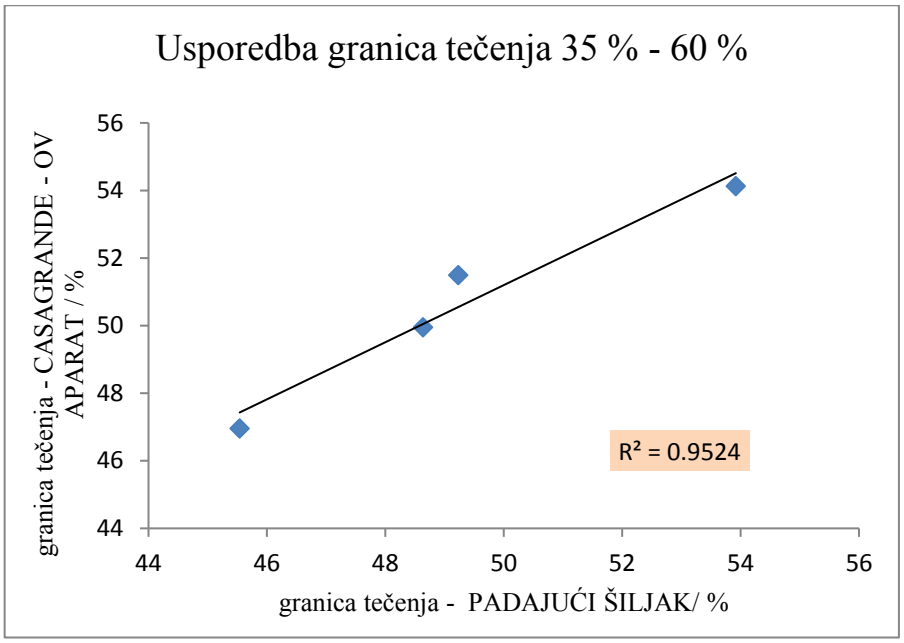
3.3.2. Analiza podataka granice tečenja 35 % - 60 %

Granica tečenja u ovom rasponu se za sve uzorke mogla odrediti padajućim šiljkom i Casagrande – ovim aparatom te su podaci prikazani u tablici 7. i dijagramom 4.

Tablica 7. Granica tečenja u rasponu 35 % - 60 % određena padajućim šiljkom i Casagrande – ovim aparatom

| GRANICA TEČENJA | |
|---|---|
| **PADAJUĆI ŠILJAK/ %** | **CASAGRANDE – OV APARAT / %** |
| 53,92 | 54,14 |
| 48,64 | 49,95 |
| 45,54 | 46,96 |
| 49,23 | 51,5 |

Dijagram 4. Usporedba granice tečenja 35 % - 60% određena padajućim šiljkom i Casagrande – ovom metodom




Podudaranje je očito iz dijagrama, a iznos koeficijenta korelacije 0,97 ga potvrđuje.

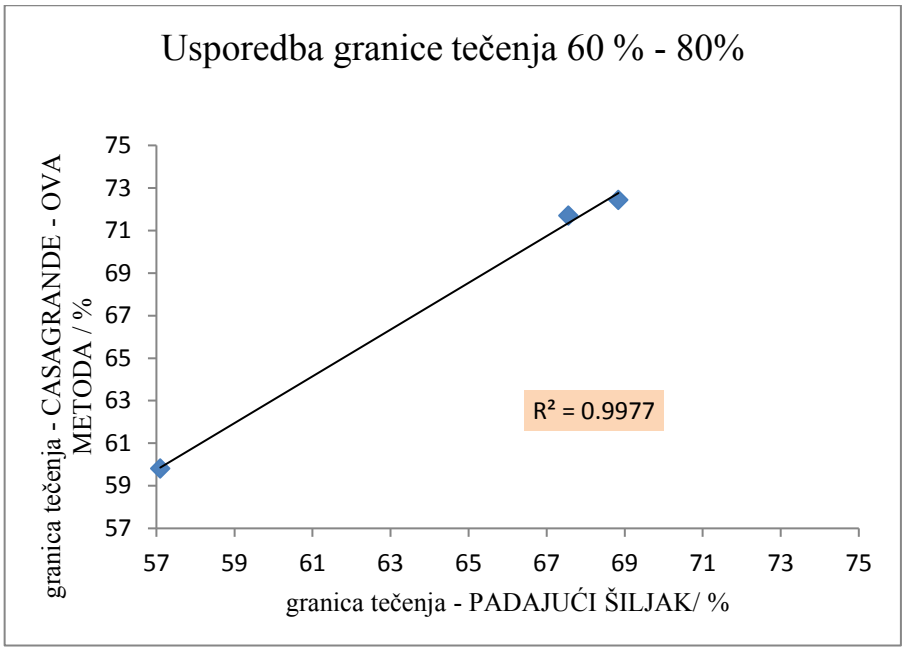
3.3.3. Analiza podataka granice tečenja 60 % - 80 %

Uzorci s tako visokom granicom tečenja sadrže velik udio gline i manje praha. Njihova karakteristika je da su teži za homogeniziranje, za smanjenje vlage treba oduzeti dosta vode (duže homogeniziranje), a za povećanje vlage treba dodati puno vode. Izračunati podaci prikazani su u tablici 8. i dijagramom 5.

Tablica 8. Granica tečenja u rasponu 60 % - 80 % određena padajućim šiljkom i Casagrande – ovim aparatom

| **GRANICA TEČENJA** | |
|---|---|
| **PADAJUĆI ŠILJAK/ %** | **CASAGRANDE – OV APARAT / %** |
| 68,84 | 72,44 |
| 57,10 | 59,82 |
| 67,56 | 71,71 |

Dijagram 5. Usporeba granice tečenja 60 % - 80 % određena padajućim šiljkom i Casagrande – ovom metodom




Koeficijent korelacije iznosi 0,99, što dokazuje poklapanje metoda i u ovom rasponu.

3.3.4. Analiza podataka granice tečenja za umjetne materijale (glinamol)

Granica tečenja za umjetne materijale se mogla odrediti padajućim šiljkom i Casagrande – ovim aparatom te su podaci prikazani u tablici 9.

Tablica 9. Granica tečenja za umjetni materijal određena padajućim šiljkom i Casagrande – ovim aparatom

| PADAJUĆI ŠILJAK/ % | CASAGRANDE – OV APARAT / % |
|---|---|
| 70,75 | 72,92 |

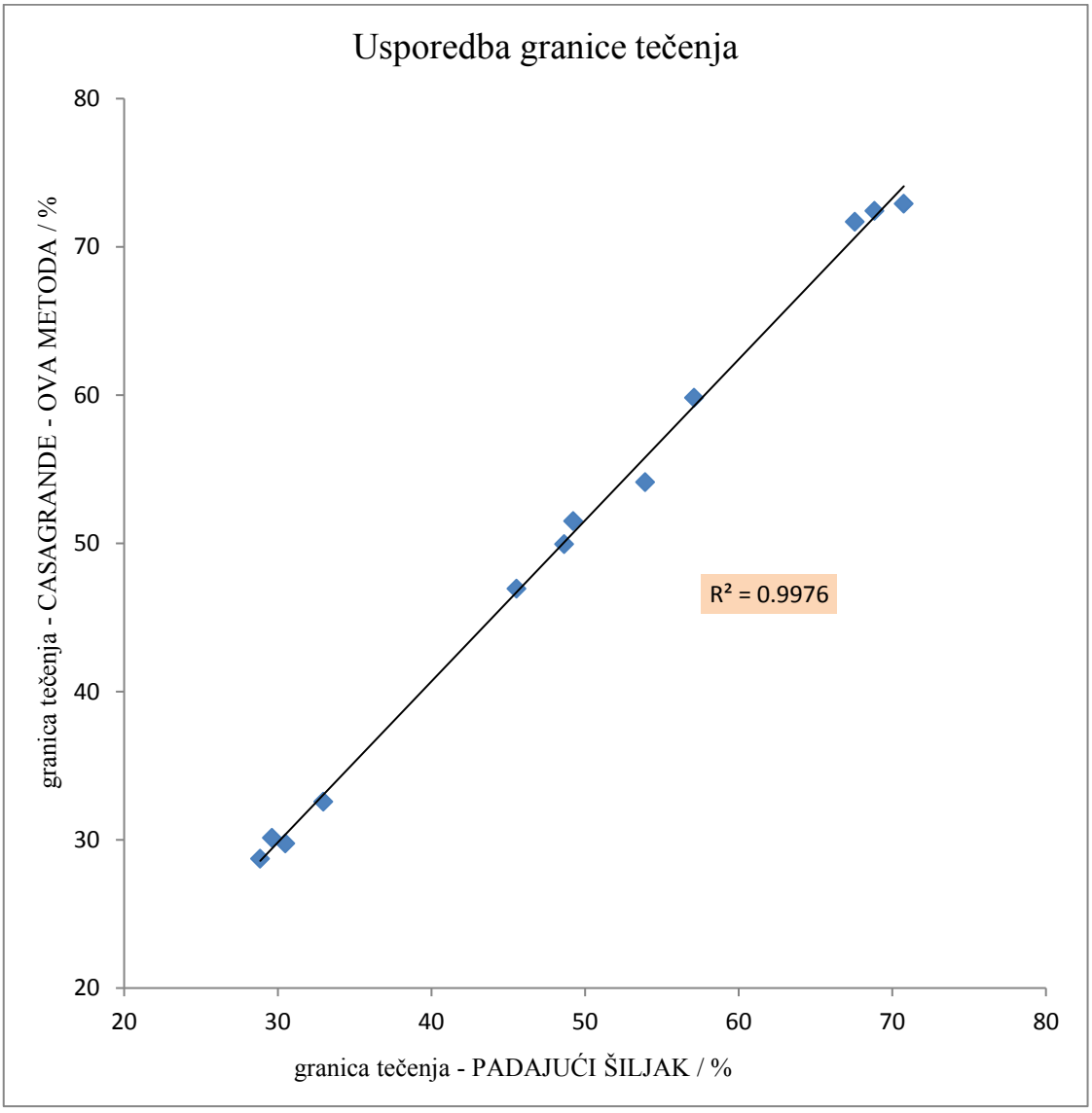
## 3.4. Usporedba granice tečenja određena padajućim šiljkom i Casagrande – ovim aparatom

Svi podaci prikazani su brojčano u tablici 10. i dijagramom 6. s ciljem konačne usporedbe.

Tablica 10. Granice tečenja određene padajućim šiljkom i Casagrande – ovim aparatom

| **GRANICA TEČENJA / %** | |
|---|---|
| **PADAJUĆI ŠILJAK** | **CASAGRANDE – OVA METODA** |
| 29,62 | 30, 14 |
| 28,86 | 28,73 |
| 30,49 | 29,77 |
| 32,97 | 32,58 |
| 53,92 | 54,14 |
| 48,64 | 49,95 |
| 45,54 | 46,96 |
| 49,23 | 51,5 |
| 68,84 | 72,44 |
| 57,10 | 59,82 |
| 67,56 | 71,71 |
| 70,75 | 72,92 |

Dijagram 6. Usporedba granice tečenja određena padajućim šiljkom i Casagrande – ovim aparatom




Upotrebom numeričkih podataka, može se analizirati jedna pojava (u ovom slučaju granica tečenja) određena na različite načine. Za takve potrebe se promatra slučajna varijabla. Ona može biti višedimenzionalna, s obzirom na to da su ovdje 2 različita načina određivanja granice tečenja, dvodimenzionalna je. Dvodimenzionalna slučajna varijabla označuje se uređenim parom (x, y), a njezine vrijednosti su $x_i$ – granica tečenja određena padajućim šiljkom i $y_i$ – granica tečenja određena Casagrande – ovim aparatom. Te točke prikazuju se u dijagramu rasprostiranja. Njezin je graf krivulja

regresije koja je najbolja aproksimacija skupa točaka ($x_i$, $y_i$) i dobiva se metodom najmanje razlike kvadrata. Može biti linearna, logaritamska, eksponencijalna, polifunkcionalna. Najčešće se koristi linearna gdje je krivulja pravac. Iz dijagrama je vidljivo odstupanje nekih točaka, a to određuje parametar r, koeficijent korelacije. Njegov raspon je sljedeći:

$|r| \leq 0{,}5$ nema linearne ovisnosti

$0{,}5 \leq |r| \geq 0{,}7$ linearna ovisnost postoji

$0{,}7 \leq |r|$ linearna ovisnost je jaka

Važnost koeficijenta korelacije je da njegova veličina govori o jakosti linearne veze između obilježja. Također postoji granični raspon jakosti linearne veze između obilježja prema tablici 11. na temelju iznosa koeficijenta korelacije. [13], [14]

Tablica 11. Granična vrijednost iznosa koeficijenta korelacije [14]

| n | $\alpha = .05$ |
|---|---|
| 8 | .707 |
| 9 | .666 |
| 10 | .632 |
| 11 | .602 |
| 12 | .576 |
| 13 | .533 |
| 14 | .532 |

N je broj uređenih parova (broj uzoraka kojima se određuje granica tečenja) i na temelju tog broja uređenih parova očitava se granična minimalna vrijednost koeficijenta korelacije da bi postojala linearna ovisnost. Ovdje se granica tečenja određivala na 12 uzoraka pa bi minimalna granična vrijednost koeficijenta korelacije trebala iznositi 0.576, a iznosi 0,9988 što pokazuje skoro potpuno podudaranje rezultata i vrlo visoku linearnu povezanost.

# 4. Zaključak

Promjenom vlažnosti uzorka, mijenjaju se i njegova svojstva. To vrijedi i za konzistentno stanje materijala koje se određuje pomoću granice tečenja, granice plastičnosti i granice stezanja. Granice konzistentnih stanja služe i za klasifikaciju koherentnih tla. Povećanjem sadržaja vode, povećava se i njegova vlažnost. Za visoko plastično materijale, treba više vode da se stanje promijeni, tj. čestice tla su sitne i treba im više vode da za njihovu pokretljivost. Za razliku do toga, nisko plastični materijali ukazuju na veću prisutnost pijeska i praha i veće čestice.

Postoje dvije metode određivanja granice tečenja u laboratoriju: padajući šiljak i Casagrande – ovim aparatom. Danas se u praksi većinom koristi padajući šiljak. Razlozi za to su jednostavnija primjena u smislu zadovoljenja tehničkih uvjeta ispitivanja (manji broj i lakša kontrola), a time i manji utjecaj ispitivača na rezultate te mogućnost provedbe ispitivanja i na materijalima koji sadrže sitni pijesak.

Statističkom obradom i analizom rezultata određivanja granice tečenja pomoću Casagrande – ovog aparata i padajućeg šiljka pokazalo se da obje metode ispitivanja daju vrlo mala odstupanja u rezultatima mjerenja. To je vidljivo u tablici 9. i zbirnom koeficijentu korelacije 0,9988 (dijagram 7.). Analizirana je i statistička povezanost rezultata mjerenja u rasponu granice tečenja manjem od 35 %, između 35 % i 60 % te između 60 % i 80 % (tablica 12.).

Tablica 12. Statistička povezanost rezultata mjerenja

| Raspon granice tečenja [%] | Koeficijent determinacije $R^2$ | Koeficijent korelacije r |
|---|---|---|
| <35 | 0,9153 | 0,9567 |
| 35 - 60 | 0,9524 | 0,9759 |
| 60 - 80 | 0,9977 | 0,9998 |
| ZBIRNO | 0,9976 | 0,9988 |

Najbolja povezanost rezultata mjerenja je pri granici tečenja između 60 % i 80 %, a najmanja kod granice tečenja manjoj od 35 %. Razlog tomu su problemi vezani za ispitivanje materijala sa sadržajem krupnijih čestica (krupni prah, sitni pijesak) pomoću Casagrande – ova aparata. Međutim, gotovo potpuna linearna zavisnost rezultata mjerenja potvrđuje da se obje metode određivanja granice tečenja mogu ravnopravno koristiti u praksi.

# 5. Literatura


[1] Kavur B., nastavni materijal za kolegij Geotehničko – ekološki zahvati

[2] Roje-Bonacci, T. *Mehanika tla*. 3. izd. Split: Sveučilište u Splitu, Građevinsko-arhitektonski fakultet; 2007.

[3] Dostupno na: http://www.ag-projekti.hr/geotehnicki-projekti-elaborati-istrazni-radovi.php Datum pristupa: [13.5.2017.]

[4] Nonveiller, E. *Mehanika tla i temeljenje građevina*. Sveučilište u Zagrebu, Školska knjiga, Zagreb, 1979.

[5] Kvasnička P., Domitrović, D. *Mehanika tla*. Sveučilište u Zagrebu, Rudarsko-geološko-naftni fakultet; 2007.

[6] Dostupno na: http://be.convdocs.org/docs/index-35933.html?page=3 Datum pristupa: [13.5.2017.]

[7] Dostupno na: https://www.google.hr/search?q=areometriranje&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjDi7T9k8_TAhVCOBoKHQ5xB7MQ_AUICigB&biw=1366&bih=662#tbm=isch&q=areometar&imgrc=8D3aCZqVfJ3NPM Datum pristupa: [15.5.2107.]

[8] Dostupno na: https://www.google.hr/search?q=areometriranje&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjDi7T9k8_TAhVCOBoKHQ5xB7MQ_AUICigB&biw=1366&bih=662#tbm=isch&q=areometar&imgrc=FX7Foo40ldHKOM Datum pristupa: [15.5.2017.]

[9] Dostupno na: https://www.google.hr/search?q=casagrandeov+aparat&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjApM-OwdvTAhXlCMAKHcgdBr8Q_AUICigB&biw=1366&bih=662#tbm=isch&q=liquid+limit+&imgrc=plXdPcg45RlXSM Datum pristupa: [16.5.2017.]

[10] Dostupno na: https://www.google.hr/search?q=casagrandeov+aparat&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjApM-

OwdvTAhXlCMAKHcgdBr8Q_AUICigB&biw=1366&bih=662#tbm=isch&q=liquid+limit+&imgrc=G5ZxMeUm1rVYNM Datum pristupa: [16.5.2017.]

[11] Dostupno na: https://www.google.hr/search?q=casagrandeov+aparat&source=lnms&tbm=isch&sa=X&ved=0ahUKEwjApM-OwdvTAhXlCMAKHcgdBr8Q_AUICigB&biw=1366&bih=662#tbm=isch&q=liquid+limit+cone+penetration+&imgrc=0ssN0r5TANBgmM Datum pristupa: [17.5.2017.]

[12] Bowles, J. E. *Engineering properties of soils and their measurment* . Fong & Sons Printers Pte Ltd, Singapore, 1986.

[13] Pfaff, S. *Osnove statistike*.1. izd. Sveučilište u Zagrebu, Element, Zagreb, 2012.

[14] Triola, M. F. *Elementary Statistics*. 4.izd. Dutchess Community College Poughkeepsie, New York, 1989.

6. Popis slika

Slika 1. Trofazni sustav tla

Slika 2. Granulometrijski dijagram

Slika 3. Areometar

Slika 4. Areometar u suspenziji

Slika 5. Aparatura za određivanje granice tečenja (desno: Casagrandeov aparat, lijevo:padajući šiljak)

Slika 6. Dimnezije pojednih dijelova Casagradeova aparata

Slika 7. Dimnezije padajućeg šiljka

Slika 8. Dijagram plastičnosti

Slika 9. Padajući šiljak

Slika 10. Oprema za određivaje granice tečenja padajućim šiljkom

Slika 11. Homogeniziranje uzorka

Slika 12. Posuda sa uzorkom

Slika 13. Položaj prije početka mjerenja

Slika 14. Dio opreme za određivanje granice tečenja Casagrande – ovim aparatom

Slika 15. Posuda s uzorkom

Slika 16. Uzorak podijeljen na 2 dijela nožićem za brazdu

Slika 17. Spojeni uzorak za određen broj udaraca

Slika 18. Problem kod određivanja granice tečenja do 35 %

7. Popis tablica

Tablica 1. USCS klasifikacija

Tablica 2. Klasifikacija nekoherentog tla prema graduiranosti

Tablica 3. Atterbergove granice

Tablica 4. Rezultati ispitivanja granice tečenja padajućim šiljkom

Tablica 5. Rezultati ispitivanja granice tečenja Casagrande – ovim aparatom

Tablica 6. Granica tečenja do 35 % određena padajućim šiljkom i metodom s jednom točkom

Tablica 7. Granica tečenja u rasponu 35 % - 60 % određena padajućim šiljkom i Casagrande – ovim aparatom

Tablica 8.. Granica tečenja u rasponu 60 % - 80 % određena padajućim šiljkom i Casagrande – ovim aparatom

Tablica 9. Granica tečenja za umjetne materijale određena padajućim šiljkom i Casagrande – ovim aparatom

Tablica 10. Granice tečenja određene padajućim šiljkom i Casagrande – ovim aparatom

Tablica 11. Granična vrijednost iznosa koeficijenta korelacije

Tablica 12. Statistička povezanost rezultata mjerenja