

## **Mehanske lastnosti vezljivih zemljin v odvisnosti od količine vode in mineralne sestave**

### **Mechanical properties of cohesive soils in dependence on the water quantity and mineralogical composition**

Bojana DOLINAR & Ludvik TRAUNER  
Univerza Maribor, Fakulteta za gradbeništvo, Smetanova ulica 17, 2000 Maribor, Slovenija

*Ključne besede:* gline, specifična površina, nedrenirana strižna trdnost  
*Keywords:* clays, specific surface, undrained shear strength

#### **Kratka vsebina**

V prispevku je pojasnjeno razmerje med vsebnostjo vode, mineraloški in mehanskimi lastnostmi zasičenih glin. Ugotovitve, ki temeljijo na teoretični analizi, so bile potrjene eksperimentalno na monomineralnih vzorcih glin. Ugotovljeno je bilo, da je količina medzrnske vode, ki določa nedrenirano strižno trdnost in stisljivost glin, sestavljena iz proste porne vode in trdno adsorbirane vode na zunanje površine glinenih zrn. Količina proste porne vode je za različne zasičene gline pri enaki nedrenirani strižni trdnosti in enaki efektivni napetosti po konsolidaciji enaka, prav tako pa tudi debelina vodnega filma okoli glinenih zrn. Celotna količina trdno adsorbirane vode je odvisna od specifične površine glin. Rezultat tega dela je analitično podana odvisnost med vsebnostjo vode in mehanskimi lastnostmi glin ob upoštevanju njihovih mineraloških značilnosti.

#### **Abstract**

This article explains the relationships between the water content, mineralogical properties and mechanical properties of saturated clays. The findings are based on theoretical analysis and were confirmed experimentally on monomineral clay samples. It was found that the quantity of intergrain water, which determines the undrained shear strength and compressibility of clays, consists of free pore water, and the firmly adsorbed water on the external surfaces of the clay grains. The free water quantity is the same for different saturated clays, at the same undrained shear strength, and same effective stress after consolidation and, likewise, the thickness of the water film around the clay grains. The total quantity of firmly adsorbed water depends on the specific surfaces of the clays. The result of this work is a new analytical formulation that gives the relationship between the water content and the mechanical properties of clays, taking into account their mineralogical characteristics.

#### **Uvod**

Mehanske lastnosti zasičenih vezljivih zemljin so odvisne od količine vsebujoče vode, le ta pa od različnih dejavnikov, ki izhajajo iz mineralne sestave in okolja. Ta razmerja doslej niso bila sistematično preiskana, znane so le posamezne ugotovitve.

To je tudi razlog, da v tem času ne moremo na osnovi ugotovljenih mineraloških značilnosti zemljin in pogojev, ki vladajo v okolju, napovedati njihovih mehanskih lastnosti, zato se le te določajo neposredno s pomočjo različnih terenskih in laboratorijskih preiskav. Na tak način preiskane lastnosti so odraz trenutnega stanja in dogajanja v oko-

lju. Ker ni znano, kako posamezni vplivni dejavniki oblikujejo te lastnosti, tudi ni mogoče na tej osnovi preverjati rezultatov preiskav in ne napovedovati obnašanja zemljin v spremenjenih geotehničnih pogojih, kar je pri gradnji objektov ključnega pomena.

Rešitev opisane problematike bo zahtevala, zaradi svoje obsežnosti in kompleksnosti, obširne in sistematične študije, ki pa so tako v svetu kot pri nas praktično šele na začetku. Pomemben prispevek zato predstavljajo rezultati študije, ki jih podajamo v prispevku. Ugotovili smo, kako je pri enaki nedrenirani strižni trdnosti in enakih konsolidacijskih tlakih količina vsebujoče vode povezana z lastnostmi mineralov v sestavi in to odvisnost izrazili v analitični obliki, ki velja za vse vrste zasičenih vezljivih zemljin.

Pri laboratorijskih raziskavah, s katerimi smo preverili veljavnost postavljene teze, smo uporabili monomineralne vzorce glin, ki pripadajo dobro kristaliziranemu kaolinitu (KGa-1), slabo kristaliziranemu kaolinitu (KGa-2) in montmorillonitu s Ca izmenljivim kationom (SAz-1). Gline izhajajo iz nahajališč v ZDA. Njihovo pridobivanje in pripravo vodi združenje Clay Mineral Society v okviru projekta Source Clays, dostopne pa so vsem raziskovalcem. Pri izkopavanju in pripravi glin se uporabljajo takšni postopki, ki zagotavljajo nespremenjene lastnosti teh materialov. Ker se sestava naravnih glin na različnih delih nahajališč nekoliko spreminja, so gline za raziskovalne namene pripravljene tako, da se velike količine materiala predhodno homogenizirajo in shranijo. Tak način omogoča dolgoletne različne raziskave popolnoma enakega materiala in s tem primerjanje in dopolnjevanje rezultatov predhodnih študij. Podatki o kemični sestavi, mineralni sestavi, strukturni zgradbi, kationski izmenjalni kapaciteti, specifični površini in drugih lastnostih so za omenjene gline objavljeni v literaturi (Constanzo & Guggenheim, 2001; Van Olphen & Fripiat, 1979).

Na mehanske lastnosti zemljin vplivajo poleg mineralne sestave tudi dejavniki, ki so pogojeni z okoljem. Mednje prištevamo temperaturo, kemično sestavo vode, organske primesi in predhodni geološki tlak. Prava razmerja med mehanskimi in mineraloški lastnostmi zemljin so vidna le v primeru, ko so ti vplivni dejavniki enaki. Zato smo vse laboratorijske analize vršili na porušeni

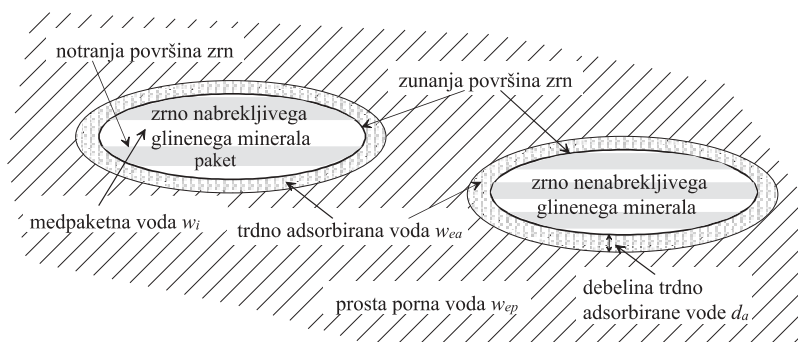
vzorcih glin brez organskih primesi pri temperaturi približno 20°C. Uporabili smo destilirano vodo.

### Teoretične osnove

V vezljivih zemljinah se pojavljajo tako glineni kot negliveni minerali. Znano je, da minerali glin kot tudi voda niso kemično inertni, zato med njimi prihaja do interakcije. Nasprotno pa imajo negliveni minerali precej manjšo sposobnost vezanja vode in manjšo specifično površino, zato je mogoče predpostaviti, da je pretežno vsa voda v zemljinah vezana prav na glinena zrna (Mitchell, 1993). To predpostavko potrjujejo tudi rezultati preiskav podani v delu Seed et al. (1964), ki so pokazali, da je količina vode na meji židkosti pri enakih glinenih mineralih linearno odvisna od količine neglivenih primesi.

Znano je, da imajo vezljive zemljine z različno sestavo pri količini vode na meji židkosti enako nedrenirano strižno trdnost (Cassagrande, 1932) in enako hidravlično prepustnost (Nagaraj et al., 1991), kar pomeni, da mora biti enaka tudi povprečna efektivna velikost por med posameznimi zrnji ali agregati. Pri vsebnosti vode na meji židkosti je enak tudi podtlak vpijanja porne vode (Russell & Mickel, 1970). Glede na podobno strukturno zgradbo različnih glinenih zrn je pričakovati, da so sile interakcije med njihovimi površinami in adsorbirano vodo enake. To pomeni, da je enaka tudi količina adsorbirane vode na enoto površine zrn, ki ustreza podtlaku vpijanja porne vode 6 kPa (Mitchell, 1993). Ker tudi na meji plastičnosti zemljine izkazujejo enako nedrenirano strižno trdnost, smo predpostavili, da imajo prav tako enako povprečno efektivno velikost por med posameznimi zrnji ali agregati in enako količino adsorbirane vode na enoto površine zrn. Pričakovati je, da te predpostavke veljajo tudi za ostale vrednosti nedrenirane strižne trdnosti, ki se pojavljajo pri količinah vode znotraj plastičnega stanja zemljin.

V zemljinah, ki vsebujejo nabreklije glinene minerale se poleg medzrnske vode pojavlja tudi medpaketna voda. Adsorbirana je na notranje površine glinenih zrn in izmenjalne katione. Kadar so slednji dvo ali več valentni povezujejo pakete med seboj tako



Slika 1. Razporeditve vode v glinah.

Fig. 1. Disposition of water in clays.

močno, da njihova cepitev ni mogoča in tako tudi ne iztiskanje ali dodatno adsorbiranje medpaketne vode. Njena vsebnost je ne glede na količino medzrnske vode stalna (Madsen & Vonmoos, 1989). Iz podanih dejstev sklepamo, da medpaketna voda ne more vplivati na mehanske lastnosti zemljin. Pri standardizirani metodi določevanja vlažnosti zemljin se, zaradi sušenja pri temperaturi 105° C, vedno določa skupna količina tako medzrnske kot medpaketne vode.

S sintezo naštetih ugotovitev in predpostavk smo postavili naslednje trditve:

– Voda je v vezljivih zemljinah vezana samo na glinena zrna.

– Mehanske lastnosti zasičenih zemljin so odvisne samo od količine medzrnske vode.

– Skupna količina medzrnske vode je sestavljena iz deleža, ki je adsorbiran na glinena zrna in deleža proste porne vode.

– Količina proste porne vode je pri enaki nedrenirani strižni trdnosti in enaki efektivni napetosti po konsolidaciji različnih zemljin glede na delež glinenih zrn enaka. Njena količina se spreminja linearno z deležem ne-glinenih primesi.

– Debelina plasti trdno adsorbirane vode na glinena zrna je pri enaki nedrenirani strižni trdnosti in enaki efektivni napetosti po konsolidaciji različnih zemljin enaka, skupna količina adsorbirane vode pa odvisna od površine glinenih zrn v sestavi zemljin.

Podane trditve je mogoče izraziti v analitični obliki

$$w_e = p (w_{ep} + d_a A_{SeC}) \quad (1)$$

kjer je  $w_e$  [ $\text{cm}^3$  vode /  $\text{g}$  suhe gline] količina medzrnske vode pri enaki nedrenirani strižni trdnosti in enaki efektivni napetosti po konsolidaciji različnih zasičenih vezljivih zem-

ljin,  $p$  je masni delež glinenih zrn v sestavi zemljin ( $0 \leq p \leq 1$ ),  $w_{ep}$  [ $\text{cm}^3$  vode /  $\text{g}$  suhe gline] je količina proste porne vode,  $d_a$  [ $\text{nm} = 10^{-7}$  cm] je debelina plasti trdno adsorbirane vode in  $A_{SeC}$  [ $\text{m}^2/\text{g}$  suhe gline =  $10^4$   $\text{cm}^2/\text{g}$ ] je specifična površina glinenih zrn ( $A_{SeC} = A_{Se}/p$ ,  $A_{Se}$  je specifična površina zemljine). Ker sta  $w_{ep}$  in  $d_a$  v izrazu (1) konstanti, je na tak način opredeljena odvisnost med količino medzrnske  $w_e$  vode in tistimi lastnostmi mineralov (količina  $p$  in specifična površina glinenih zrn)  $A_{SeC}$ , ki jo določajo. Razporeditev vode v glinah je ponazorjena na sliki 1.

### Preizkus veljavnosti teze

Veljavnost teze, zapisane v obliki izraza (1), smo preverili eksperimentalno z določitvijo odvisnosti med nedrenirano strižno trdnostjo in količino medzrnske vode ter količino medzrnske vode po konsolidaciji in efektivno napetostjo. Vsebnost medzrnske vode, ki se je pri različnih glinah pojavila pri enakih vrednostih nedrenirane strižne trdnosti in enakih efektivnih napetostih smo razdelili v posamezne deleže tako, da je veljala enačba (1). Zaradi predpostavke, da so mehanske lastnosti odvisne samo od količine medzrnske vode, je bilo potrebno v primeru Ca-montmorillonita celotno merjeno količino vode zmanjšati za delež medpaketne vode. Opis postopka izračuna medzrnske vode in medpaketne vode je za omenjeni mineral prikazan v prispevku avtorice Dolinar (2002). Pri kaolinitih je količina medzrnske vode enaka celotni vsebnosti vode, določene po standardiziranem postopku.

Nedrenirano strižno trdnost izbranih vzorcev glin smo določili s pomočjo preiskave s konusnim penetrometrom. Slednje omogoča ugotovitev (Hansbo, 1957), da je ne-

drenirana strižna trdnost zemljin obratno sorazmerna kvadratu globine penetracije.

$$c_u = K \frac{W}{h^2} \quad (2)$$

V izrazu (2) je  $K$  konstanta, odvisna od vrste uporabljenega konusa,  $W$  pa je masa konusa. V primeru Britanskega konusa je teoretično določena vrednost konstante  $K = 1.33$  (K o u m o t o & H o u l s b y, 2001) in masa konusa  $W = 80$  g. Količino medzrnske vode smo pri vseh vzorcih določili pri enakih ugrezkah konusa, ki ustrezajo nedreniranim strižnim trdnostim  $c_u = 2.66$  kPa, 10.6 kPa, 42.5 kPa in 266 kPa. Vsebnost medzrnske vode smo nato računsko razdelili na delež proste porne vode in delež trdno adsorbirane vode tako, da sta bili pri različnih glinah in enaki nedrenirani strižni trdnosti  $d_a$  in  $w_{ep}$  konstanti. Rezultati izračunov v preglednici 1 kažejo, da je skupno količino medzrnske vode res mogoče razdeliti v posamezne deleže tako, da velja izraz (1).

Iz rezultatov v preglednici 1 je razvidno, da se tako količina proste porne vode  $w_{ep}$  [%] kot tudi debelina plasti trdno adsorbirane vode  $d_a$  [nm] spreminjata v odvisnosti od vrednosti nedrenirane strižne trdnosti  $c_u$  [kPa]. Slika 2 kaže, da sta ti razmerji linearni, kadar sta spremenljivki prikazani v logaritmskem merilu, zato veljata izraza (3) in (4)

$$w_{ep} = f_p c_u^{-g_p} [\%] \quad f_p = 34.34 \text{ in } g_p = 0.07 \quad (3)$$

$$d_a = f_a c_u^{-g_a} [\text{nm}] \quad f_a = 10.42 \text{ in } g_a = 0.23. \quad (4)$$

Z izrazi (1), (3) in (4) je na tak način opredeljeno razmerje med količino medzrnske

vode  $w_e$  [%], nedrenirano strižno trdnostjo  $c_u$  [kPa] in deležem  $p$  ter specifično površino glinenih zrn  $A_{SeC}$  [m<sup>2</sup>/g]. V primeru preiskovanih vzorcev je delež glinenih mineralov  $p = 1$ .

$$w_e = p (34.34 c_u^{-0.07} + 1.042 c_u^{-0.23} A_{SeC}) [\%] \quad (5)$$

Po enakem postopku smo, skladno z (1), količino proste porne vode in debelino plasti trdno adsorbirane vode izračunali tudi iz količine medzrnske vode po konsolidaciji zemljin pri efektivnih osnih napetostih  $\sigma' = 50$  kPa, 100 kPa in 200 kPa. Preiskave smo vršili v edometru. Ker v nabreklih mineralih medpaketne vode pri običajnih obremenitvah zemljin ni mogoče iztisniti (Madsen & Vonmoos, 1989) in je zato pomembna samo količina medzrnske vode, je bilo potrebno v primeru Ca-montmorillonita celotno merjeno količino vode  $w$  zmanjšati za delež medpaketne vode  $w_i$ . Količina medzrnske vode  $w_e$  ter rezultati izračuna deležev proste porne vode  $w_{ep}$  in debelini plasti trdno adsorbirane vode  $d_a$  so podani v preglednici 2.

Ker sta tudi v tem primeru razmerji med količino proste porne vode  $w_{ep}$  [%] in efektivno napetostjo  $\sigma'$  [kPa] ter debelino plasti trdno adsorbirane vode  $d_a$  [nm] in efektivno napetostjo  $\sigma'$  [kPa] v logaritmskem merilu linearni (slika 2), je to odvisnosti mogoče izraziti s funkcijama (6) in (7)

$$w_{ep} = k_p \sigma'^{-l_p} [\%] \quad k_p = 36.06, \quad l_p = 0.07 \quad (6)$$

$$d_a = k_a \sigma'^{-l_a} [\text{nm}] \quad k_a = 14.39, \quad l_a = 0.22, \quad (7)$$

razmerje med količino medzrnske vode  $w_e$  [%], efektivno napetostjo  $\sigma'$  [kPa], deležem  $p$

Preglednica 1. Deleži proste porne vode in adsorbirane vode pri enakih nedreniranih strižnih trdnostih.

Table 1. Portions of free pore water and adsorbed water at equal undrained shear strengths.

Vzorec	KGa-1				KGa-2				SAz-1			
$A_{SeC}$ [m <sup>2</sup> /g]	10.05				23.50				97.42			
$c_u$ [kPa]	2.66	10.6	42.5	266	2.66	10.6	42.5	266	2.66	10.6	42.5	266
$w_e$ [%]	40.0	35.0	30.8	25.8	50.9	43.3	36.8	29.8	110.8	87.2	68.7	50.0
$w_{ep}$ [%]	31.9	29.1	26.5	23.1	31.9	29.3	26.7	23.3	31.9	29.1	26.9	23.1
$d_a$ [nm]	8.1	5.9	4.3	2.7	8.1	5.9	4.3	2.7	8.1	5.9	4.3	2.7
$w_{ea}$ [%]	8.1	5.9	4.3	2.7	19.0	14.0	10.1	6.5	78.9	58.1	41.8	26.9

Opomba:  $w_{ep}$  in  $w_e$  [%] =  $100 \times \text{cm}^3 \text{ vode/g suhe gline}$

$$w_{ea} [\%] = 100 \times (d_a [10^{-7} \text{ cm}] \times A_{SeC} [10^4 \text{ cm}^2/\text{g suhe gline}])$$

Preglednica 2. Deleži proste porne vode in adsorbirane vode po konsolidaciji zemljin pri enakih efektivnih napetostih.

Table 2. Portions of free pore water and adsorbed water after consolidation at equal effective stresses.

Vzorec	KGa-1			KGa-2			SAz-1		
$A_{SeC}$ [m <sup>2</sup> /g]	10.05			23.50			97.42		
$c_u$ [kPa]	50	100	200	50	100	200	50	100	200
$\sigma'$ [%]	33.3	31.1	29.2	41.3	38.1	35.1	86.2	76.6	67.8
$w_e$ [%]	27.2	25.9	24.7	27.1	25.9	24.7	27.2	25.9	24.5
$d_a$ [nm]	6.05	5.20	4.45	6.05	5.20	4.45	6.05	5.20	4.45
$w_{ea} = d_a A_{SeC}$ [%]	6.1	5.2	4.5	14.2	12.2	10.4	58.9	50.7	43.3

ter specifično površino glinenih zrn  $A_{SeC}$  [m<sup>2</sup>/g] pa z izrazom (8).

$$w_e = p (36.06 \sigma'^{-0.07} + 1.439 \sigma'^{-0.22} A_{SeC}) \text{ [%]} \quad (8)$$

Iz izrazov (3) in (6), ki kažeta razmerje med količino proste porne vode in nedrenirano strižno trdnostjo oziroma efektivno napetostjo je razvidno, da je naklon obeh premic enak. To lahko trdimo tudi za odvisnost, izraženo s (4) in (7). Zelo majhno odstopanje je v tem primeru najverjetneje posledica napak pri praktičnih preizkusih.

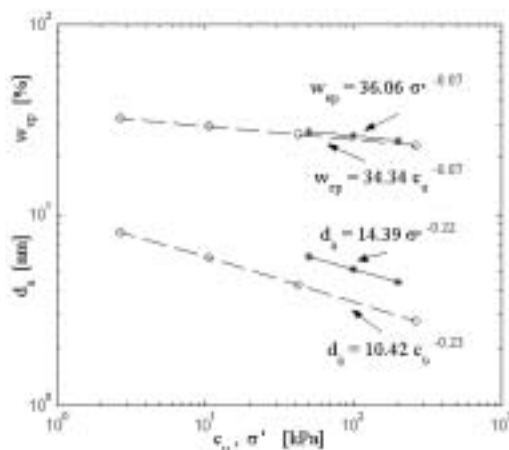
### Zaključek

V prispevku je pojasnjeno, zakaj in na kakšen način so mehanske lastnosti zasičenih vezljivih zemljin odvisne od lastnosti mineralov v sestavi. Na osnovi teoretičnih dognanj in praktičnih preizkusov smo ugotovili, da na mehanske lastnosti vezljivih zemljin vpliva samo delež medzrnske vode medtem ko medpaketna voda v nabreklih mineralih z omejenim nabrekanjem pri tem ni pomembna. Pri enaki nedrenirani strižni trdnosti in enaki efektivni napetosti pri konsolidaciji zemljin je količina proste porne vode glede na delež glinenih mineralov enaka, količina adsorbirane vode na površine glinenih zrn pa odvisna od njihove velikosti (enačba (1)). Razmerje med količino proste porne vode in nedrenirano strižno trdnostjo ter efektivno napetostjo pri konsolidaciji je v logaritemskem merilu linearno in se zato lahko izrazi v obliki (3) in (6). Enako velja tudi za debelino filma adsorbirane vode na glinena zrna (enačbe (4) in (7)).

Vpliv količine glinenih mineralov na preiskane fizikalno mehanske lastnosti zemljin

smo določili na osnovi citiranih ugotovitev drugih raziskovalcev. Nismo pa jih potrdili eksperimentalno, saj so bili v študiji uporabljeni samo monomineralni vzorci glin, kjer je  $p = 1$ . V nadaljevanju raziskav bo zato potrebno preveriti veljavnost izrazov (1), (5) in (8) v primerih manjših deležev glinenih mineralov v zemljinah ( $0 < p < 1$ ).

Razdelitev skupne količine medzrnske vode v delež proste porne vode in delež adsorbirane vode pri enakih nedreniranih strižnih trdnostih in enakih efektivnih napetostih smo določili računsko. Potrebno bi bilo poiskati ustrezen način, s katerim bi tako določene vrednosti potrdili še eksperimentalno.



Slika 2. Količina proste porne vode  $w_{ep}$  in debelina plasti trdno adsorbirane vode  $d_a$  kot funkciji nedrenirane strižne trdnosti  $c_u$  in efektivne napetosti  $\sigma'$ .

Fig. 2. The free pore water quantity  $w_{ep}$  and the firmly adsorbed water thickness  $d_a$  as a function of undrained shear strength  $c_u$  and effective stress  $\sigma'$ .

Raziskave so bile izvedene z majhnim številom vzorcev. Razlog je v težavnosti pridobitve čistih mineralnih substanc, ki bi v celoti izpolnjevale željene pogoje. Kljub temu pa je bil dosežen osnovni namen raziskav. Dokazana je bila pravilnost postavljene teze, kar daje dobra izhodišča za nadaljne raziskave na tem področju.

### Literatura

- Casagrande, A. 1932: Research on the Atterberg limits of soils - Public Roads.
- Constanzo, P.M. & Gugenheim, S. 2001: Clay minerals Society Source Clays. - Clays and Clay minerals, Vol. 49, No. 5, 371-453, Aurora.
- Dolinar, B. 2002: Vloga mineralogije v mehaniki zemljin - Geologija 45/2, 347-352, Ljubljana.
- Hansbo, S. 1957: A new approach to the determination of the shear strength of clay by the fall-cone test - R. Swedish Geotech. Inst. Proc. No.14, 7-47.
- T. Koumoto, T. & Houlsby, G.T. 2001: Theory and practice of the fall cone test - Geotechnique, Vol. LI, No. 8, 701-712, London.
- Madsen, F.T. & Müller-Vonmoos M. 1989: The swelling behaviour of clays - Applied Clay Science, 4, 143-156, Zürich.
- Mitchell, J.K. 1993: Fundamentals of Soil Behaviour, 2<sup>nd</sup> ed., Wiley Interscience, 437 pp., New York.
- Nagaraj, T.S, Pandian, N.S. & Narasimha Raju, P.S.R. 1991: An approach for prediction of compressibility and permeability behaviour of sand-bentonite mixes - Indian Geotechnical Journal, 21, No.3, 271-282, Mumbai.
- Russell, E.R. & Mickle, J.L. 1970: Liquid limit values of soil moisture tension - Journal of soil mechanics and Foundations Division, A.S.C.E., 96, 967-987, Reston.
- Seed, H.B., Woodward, R.J. & Lundgren, R. 1964: Clay mineralogical aspects of Atterberg limits. - Journal of Soil Mechanics and Foundations Division, A.S.C.E., Vol. 90, No. SM 4, 107-131, Reston.
- Van Olphen, H. & Fripiat, J. J. 1979: Data handbook for clay minerals and other nonmetallic materials, Pergamon press, 346 pp.