

# DETERMINAREA STRUCTURII SOLURILOR PRIN METODA IMAGISTICII ELECTRICE REZISTIVE

**Monica MORARU<sup>1</sup>**  
monic.geom@yahoo.com

**ABSTRACT:** The use of resistive imaging in groundwater investigations has increased in recent years. RI is a non-destructive method drive which offers an image endlessly. The method is based on the phenomenon of electric of soil vary, temporal moisture heterogeneity of the subterranean strata that may be assessed by the RI. The article shows the method as being less costly, may be done for larger surfaces and it can be performed in a short period of time. In this article it is reported a study that has been conducted recently to determine the relationship of geotechnical properties of a loamy soil with electrical resistivity.

**KEYWORDS:** electrical resistivity, conduction, resistive imaging, geophysical methods

## Introducere

Utilizarea *imagisticii rezistive (IR)* în investigațiile subterane a crescut în ultimii ani. *RI* este o metoda non-distructivă ce oferă o imagine continuă. Bazată pe fenomenul de conducție electrică a solului, variația spațială, temporală de umiditate și eterogenitatea straturilor subterane pot fi evaluate prin metoda *RI*. Corelația dintre *RI* rezultate și proprietățile ingineriei geotehnice a solurilor a devenit o problemă importantă pentru utilizarea riguroasă a acestei metode în studiul solurilor. Cercetările actuale încearcă să dezvolte relații și corelații dintre parametrii geotehnici cu rezistivitatea electrică a solului. Aceste corelații pot fi folosite pentru determinarea proprietăților geotehnice. Probe de sol colectate pentru studiul analizat provin în mare parte dintr-un mediu cu înaltă plasticitate, argila având un index mai mare de 30. Mineralele argiloase sunt dominante în probele de sol,

---

<sup>1</sup> Drd. în inginerie electrică, asistent de cercetare la Institutul de Geodinamică „Sabba S. Ștefănescu” al Academiei Române.

cum ar fi montmorillonit. Prezintă interes studiul influenței umidității, densității, suprafeței porilor, a compoziției ionice, a stării de compactare asupra rezistivității electrice.

Rezultatele testelor [Braga, A. C. O., Dourado, J. C., și Chang, H. K. (1999)] au arătat că rezistivitatea solului a scăzut cu o rată medie de 13.8 Ohm-m prin creșterea umidității de la 10% la 20%, la o unitate dată de greutate. Rezistivitățile solului au variat de la 2.1–2.42 ohmi-m la 50% umiditate. Datorită interacțiunii dintre particulele de argilă și apă și apariției conducției ionice se reduce rezistivitatea electrică odată cu creșterea conținutului de umiditate. Rezultatele testului au indicat de asemenea că rezistivitatea solului scade liniar o dată cu creșterea umidității.

Utilizarea metodelor geofizice de investigare a unui amplasament câștigă o recunoaștere mai mare din partea comunității de inginerie și construcții. În timpul investigației unui amplasament, se iau în considerare mai mulți parametri care sunt studiați de ingineri geologi și geotehnicieni. Metodele geofizice au posibilitatea de a furniza imagini subterane (Fig. nr. 1). Odată cu dezvoltarea de softw-ri noi de interpretare a rezistivității măsurătorilor, 2D și 3D (imagistica resistivă (*RI*)), este utilizată pe o scară foarte largă în domeniul geofizic de investigații.

Geologii au folosit cu succes metoda *RI* pentru a studia proprietățile rocilor și a materialelor subterane. Gray and Wheeler au aplicat rezistivitatea electrică în anul 1720, în domeniul geologiei (Jakosky, 1950; Van Nostrand and Cook, 1966).

Obiectivul studiului lor era de a stabili conductivitatea rocilor. În 1746, Watson constată că subteranul este un bun conducător electric (Van Nostrand și Cook, 1966). Robert W. Fox a realizat un studiu pe un minereu sulfurat, pentru a determina existența conductivității. El a indicat existența unui curent în cadrul unui studiu, utilizând un electrod de cupru (Van Nostrand și Cook, 1966).

Conrad Schlumberger în 1912, a făcut măsurători de rezistivitate electrică în curent continuu și a corelat rezultatele obținute cu compoziția solului. A fost raportat ca fiind unul dintre cel mai de succes experiment abordat în studiul rezistivității electrice (Aizebeokhai, 2010).

În Statele Unite, ideea a fost dezvoltată de Frank Wenner în 1915 (Aizebeokhai, 2010). După aceea, metoda a fost supusă cu îmbunătățire semnificativă în ultimele trei decenii. Pentru a înțelege eterogenitatea și a oferi imaginea exactă a structurii subterane, sau utilizat diferite combinații ale

electrozilor și modele de inversare. Cu avansarea tehnicilor moderne, acum este posibilă obținerea unei imagini subterane într-un timp foarte scurt.

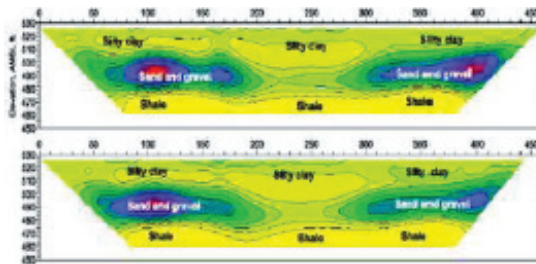


Fig. nr. 1 – Hartă stratigrafică ce reprezintă nisip, lentile de pietriș în argila și șist mediu (Van Nostrand și Cook, 1966).

**RI** este o metodă non-distructivă în investigațiile geologice. Metoda este mai puțin costisitoare și investigațiile subterane pe suprafețe mari, pot fi efectuate într-o perioadă scurtă de timp. Aceste metode de prelucrare a datelor sunt utilizate în mod tradițional pentru explorările subterane. De asemenea, Standard Penetration Test (SPT), Cone Penetration Test (CPT), Vane Shear Test, Dilatometer Test și Pressuremeter Test sunt utilizate pe scară largă în investigațiile geotehnice. Toate aceste metode furnizează informații dintr-un punct situat la adâncimi diferite ale subsolului. În plus, metoda **RI** oferă informații continue în direcția verticală și orizontală a structurii solului. Avantajele acestei metodei **RI** față de celelalte metode convenționale sunt descrise mai jos, aceasta metodă oferind continuu imagini subterane.

- Are capacitatea de a acoperi o zonă mare într-o perioadă scurtă de timp.

- Este mai puțin costisitoare și are capacitatea de a determina eterogenitatea și zona cu o umiditate ridicată.

- Datele pot fi prelucrate într-un timp foarte scurt.

În urma acestor beneficii, utilizarea metodei **RI** a crescut semnificativ. Aceasta fiind una de cele mai convenabile tehnici disponibile pentru investigațiile subterane și studiul geo-hazardului (geofizica de mediu).

### Problema propusă pentru studiu

Utilizarea metodei **RI** de către inginerii geotehnicini s-a răspândit peste tot în lume. Este o metodă convenabilă pentru a evalua variația

spațială și temporală a umidității și a eterogenității subsolului. Studiile au fost efectuate pentru a obține parametri geotehnici folosind *RI*. *Principiul de funcționare a acestei metode se bazează pe fenomenul de conducție a solului*. Metoda *RI* oferă informații calitative privind compoziția și structura subterană.

Cuantificarea proprietăților geotehnice a devenit un aspect important pentru utilizarea riguroasă a metodei *RI*, în aplicații de inginerie. Corelația proprietăților geotehnice diferite ale metodei *RI* va închide golul care există în prezent între ingineria geofizică și ingineria geotehnică. Inginerii geotehnici vor fi capabili să interpreteze datele geofizice și să utilizeze informațiile pentru interpretările lor. Prin urmare, dezvoltarea parametrilor geotehnici prin metoda *RI*, va face ca această metodă să fie mult mai eficientă în investigațiile subterane.

Prezența umidității a produs modificări consistente și de rezistență a solului. Umiditate este de asemenea este un factor important pentru fenomenul de *conducție* a solului. Conductivitatea și rezistivitatea, depind de mineralogia solului, granulometria, indicele de proprietăți, densitatea, porozitatea, gradul de saturație și alți parametri. Pentru o mai bună înțelegere a cauzelor de variație a acestor parametri în funcție de rezistivitate, se pot realiza diferite corelații.

### Obiectivul studiului

Un studiu recent a fost efectuat, pentru a determina relația proprietăților geotehnice ale unui sol argilos cu rezistivitatea electrică. Au fost prelevate probe de sol din Midlothian, Texas. Este important pentru a determina variația de rezistivitatea în funcție de diferiți parametri pentru obținerea unor corelații.

Obiectivele specifice ale studiului sunt prezentate mai jos:

- Pentru a determina tipul de sol, conform cu Unified Soil Classification System (USCS).
- Pentru a determina variația de rezistivitatea a solului umed în funcție de diferite condiții.
- Pentru a identifica relația dintre rezistivitatea solului cu spațiul dintre porii, utilizând scanarea imaginii printr-un microscop electronic (SEM).
- Pentru a identifica relația ionică a solului argilos cu rezistivitatea electrică, folosind investigațiile cu raze X.

- Pentru a dezvolta corelația dintre compactare și rezistivitatea solului.
- Pentru a determina variația de rezistivitatea a solului cu dimensiunile particulelor, în funcție de limita conținutului de lichid, indicelui de plasticitate și suprafața specifică.

### Literatura revizuită. Conducția electrică în solul argilos

Conducția electrică are loc în medii poroase precum solul, în general, prin deplasare de ioni prin pori (Bryson, 2005). Ioni pot fi deplasați, sub aplicarea unui potențial electric prin pori în prezența apei electrolitice.

G.E. Archie a stabilit o formula empirică pentru a corela masa rezistivității solului saturat cu rezistivitatea fluidului din pori și porozitatea în 1942. Dacă rezistivitatea solului este  $\rho$ , rezistivitatea fluidului din pori este  $\rho_w$  și porozitatea este  $n$ , atunci formula lui Archie este:

$$\rho = a \cdot \rho_w \cdot n^{-m}$$

iar,  $a$  este un parametru de montare și  $m$  este factor de cimentare.

Valoarea lui  $m$  depinde de interconectivitatea porilor de rețea și tortuozitate. În nisip și pietriș,  $m$  are o variație între 1,4 la 2.2. Cu toate acestea, s-a presupus, conducția poate să apară datorită prezenței lichidului în pori. Cu toate că poate avea loc o schimbare a gradului de saturație și rezistivitatea solului se modifică.

Shah și Singh (2005) au descris o formă mai generalizată a relației lui Archie. Potrivit autorilor, efectul de suprafață a conductivității a fost inclus în factorul cimentării. Prin urmare, nu este necesar să se introducă în conductivitate matricea solului în formula lui Archie.

### Factorii care pot influența rezistivitatea solului. Umiditatea

Cantitatea de apă din sol este factorul cel mai important, unde inginerul geotehnic trebuie să cunoască parametrii. Măsurarea conținutului de umiditate în greutatea de referință este cunoscută ca umiditate gravimetrică. În greutatea de referință, raportul dintre cantitatea de apă prezentă din pori și masa de solide este cunoscută sub numele de umiditate. Ecuația pentru calculul conținutului de umiditate gravimetrică este exprimată ca:

$$W = \frac{W_w}{W_s} \times 100\%$$

unde,  $W_w$  = greutatea apei,  $W_s$  = masa de solide din sol.

Mai multe studii au arătat că conținutul de umiditate este factorul dominant care influențează rezistivitatea electrică a solului. Există o mulțitudine de studii care arată că umiditatea este factorul dominant care influențează rezistivitatea electrică a solului. Conductivitatea electrică apare în principal datorită deplasării ionilor în apă din porii rocilor. Când umiditatea crește de la uscat (porii umpluți cu aer) la saturație completă, sunt eliberați ionii absorbiți în particulele de solid. Astfel, mobilitatea sarcinilor electrice crește odată cu creșterea umidității. Sarcinile electrice libere determină descreșterea rezistivității electrice sub aplicarea unui câmp electric. S-a observat ca rezistivitatea electrică a solului descrește rapid la creșterea umidității mai mult de 15% (Samouelian et al., 2007). În zona filmului de apă (ecranări) Van der Waals puterea crește. Ca rezultat, rezistivitatea electrică scade mai puțin brusc în zona (ecranată), filmul de apă. Când este atinsă grosimea maximă a peliculei de apă, apa trece în fisuri. În zona pelicular-capilară cantitatea relativă de apă peliculară descrește în favoarea apei capilare. Forța de atracție moleculară este mai mare decât forța capilară din această zonă. Prin urmare, rezistivitatea electrică scade mai puțin dramatic în filmul capilar și în zona de apă capilară. În zona apei gravitaționale mobilitatea sarcinilor electrice devine independentă de mișcarea ionilor moleculelor de apă. Astfel, rezistivitatea electrică este aproape independentă de conținutul de apă în această zonă.

### **Formațiunea geologică și poziționarea solului solid**

În general, rezistivitatea electrică a solului poate avea o gamă largă de valori. Rezistivitatea solului este scăzută în cazul solurilor de coastă (neconsolidate) și mare în cazul rocilor. Studiile au demonstrat și că rezistivitatea solului variază în funcție de formațiunea geologică. Cercetările întreprinse de Gao et al.(2002) au indicat faptul că prezența microfosilelor de diatomite alternează, modifică substanțial proprietățile geotehnice ale argilelor. Acest tip de modificare a structurii afectează, de asemenea, proprietățile electrice ale argilei. Robain et al., (1996) a prezentat variația rezistivității în funcție de structura materialelor pedologice. Potrivit autorilor, valorile rezistivităților joase și înalte sunt legate de macro și meso porozitatea solului. Geometria porilor determină proporția de apă și aer din sol. Aerul este considerat ca material dielectric. Dacă porii solului sunt umpluți cu apă se poate modifica conductivitatea electrică. De obicei, solul argilos este mai conductiv decât un sol nisipos. Din cauza acestor factori,

suprapunerea valorilor de rezistivitate se observă pentru diferite tipuri de soluri (Fig. nr. 2).

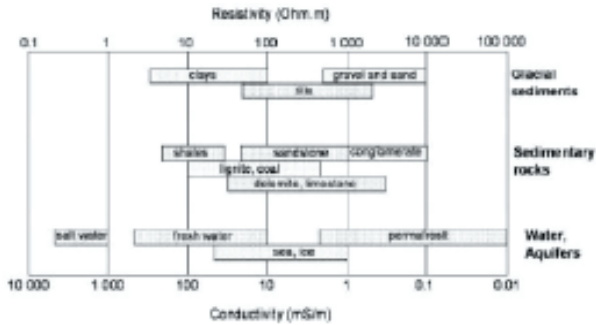


Fig. nr. 2 – Valori de rezistivitate ale diferitelor tipuri de soluri

Centrul de cercetare, care măsoară rezistivitatea solului din argile naturale în întreaga lume a fost inițiat de către Coreea și Japonia. Obiectivul cercetării a fost de a stabili o bază de date pentru rezistivitatea solului argilos. S-a observat că rezistivitatea argilelor studiate au variat într-un interval mic. Datele înregistrate ale rezistivităților electrice ale solului argilos sunt prezentate în (Fig. nr. 3).

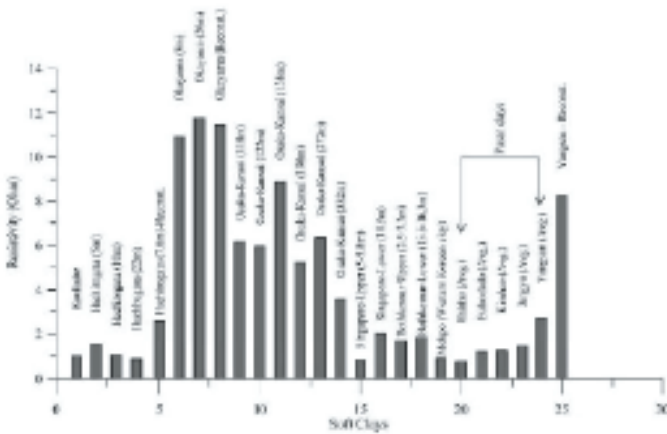


Fig. nr. 3 – Rezistivitatea electrică ale diferitelor argile în lume (Giao et al., 2003).

Potrivit studiului, probe care conțin sodiu au arătat cea mai mare conductivitate, urmată de magneziu și potasiu. Cu toate acestea, diferența de conductivitate nu a fost cauza mobilității numai a unor ioni din electroliți. Efectele combinate ale ionilor mobili, absorbția și structura solului erau responsabile pentru diferitele conductivități ale solului.

Solul organic este compus din materiale putrede. Materialele descompuse sunt amestecate cu mineralele din sol și împreună formează o textură distinctă în solul organic. În aceste condiții se pot reține o proporție mai mare de apă și electroliți. Astfel, conductivitatea solului organic este mare.

Ekwue și Bartolomeu (2010) au raportat efectul de conductivitate a turbii în unele soluri din Trinidad. Ei au observat creșterea conținutului de turbă a crescut conductivitatea constantă a conținutului de apă și densitatea solului (Fig. nr. 4).

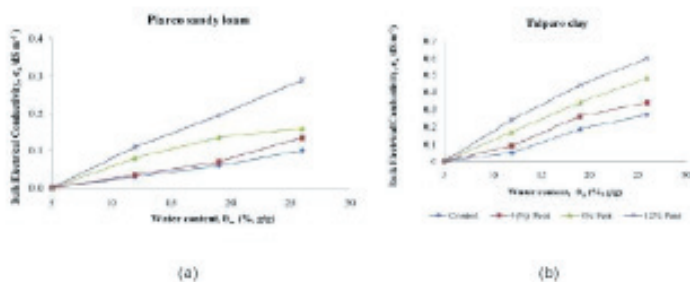


Fig. nr. 4 – Conductivitatea electrică aparentă în diferite conținuturi de turbă, (a) pământ roditor (b) argila din Talparo (Ekwue și Bartolomeu, 2010).

### Determinarea parametrilor geotehnici. Limitele Atterberg

Limitele Atterberg reprezintă cantitatea de umiditate a solului atunci când acesta își schimbă starea și comportamentul. Odată cu creșterea conținutului de apă, starea solului se modifică de la solid casant la solid plastic și apoi la fluid vâscos. *Proprietățile index* sunt utilizate de inginerii geotehnicieni pentru a identifica comportamentul solurilor ca răspuns la umiditate. Au fost efectuate cercetari pentru a pune în evidență legătura dintre limitele Atterberg și rezistivitate. Abu Hassanein et al., (1996) au evaluat variația rezistivității electrice cu limitele Atterberg. Au fost compactate probe de pamânturi utilizând metoda Standard Proctor și reprezentând pe un grafic valoarea umidității optime de compactare, căreia îi corespunde greutatea volumică în stare uscată maximă. S-a observat ca



pământurile cu LL (limita de lichid) și PI (indicele de plasticitate) mai mari, au o rezistivitate mai scăzută (Fig. nr. 5).

Soluri cu 47% cu o fracțiune grosieră au arătat înalta rezistivitate. Tendința de scădere a rezistivității odată cu creșterea LL și PI a fost, de asemenea, compatibilă cu mineralogia probelor. Probe de argilă au o mai mare cantitate de Diocthaedral, au mai mare LL și PI. Aceste soluri sunt mai active și prezintă o conductivitate pe o suprafață mai mare. LL și PI care conțin argilă sunt puternic influențate de difuzia dublu strat. Conductivitatea suprafeței alcătuită din argilă depinde în mare măsură de difuzia dublului strat. Prin urmare, rezistivitatea electrică depinde de limitele Atterberg a solurilor.

### **Cuantificarea umidității solului**

Cuantificarea de umiditate în sol este foarte important în Ingineria geotehnică. Convențional, umiditatea solului este determinată printr-un test de laborator sau instalarea unui senzor de umiditate în domeniu. Cu toate acestea, rezistivitatea electrică pot fi utilizată pentru a determina stările de umiditate subterane.

Rezistivitatea scade odată cu creșterea umidității solului. Acest fenomen a dus la mai multe studii pentru a cuantifica conținutul de umiditate a solului prin măsurători de rezistivitate la scară de laborator și câmp. Crony et al., (1950) a descris o metodologie pentru a determina umiditatea solului folosind metoda măsurătorilor de rezistență electrică. Măsurarea se bazează pe trei relații:

- 1) aspirarea apei conținute în absorbant și determinarea umidității absorbite,
- 2) determinarea conținutului de absorbant de umiditate și măsurarea rezistenței etalonului,
- 3) aspirarea apei conținute în sol și măsurarea umidității solului.

Ipsosul de la Paris și alumină ciment au fost folosite ca materiale absorbante. Electrozii au fost realizați din cupru. S-a observat că rezistența electrică măsurată se poate folosi pentru a determina capacitatea de absorbție a solului și umiditatea solului. Precizia de măsurare a rezistenței electrice a fost adecvată, pentru utilizarea în inginerie civilă. Potrivit studiului, calibrarea manometrelor electrice au fost importante pentru a obține rezultate precise. Evaluarea corectă a conținutului de aspirație și de umiditate absorbită, a fost identificată ca o problemă majoră în această metodă.

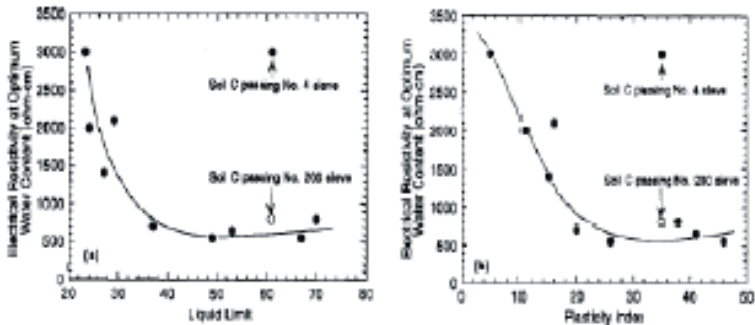


Fig. nr. 5 – Relația dintre rezistivitatea electrică și limitele Atterberg la conținutul optim de apă (Abu Hassanein et al., 1996).

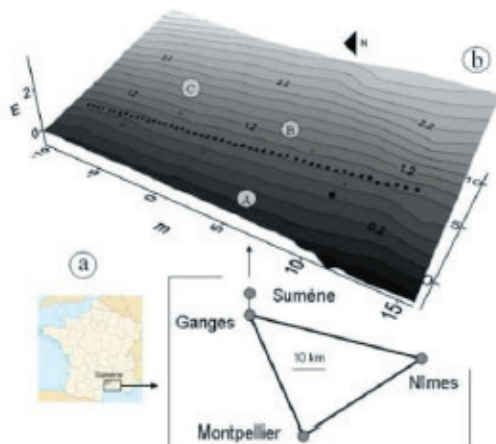
McCarter (1984) a investigat rezistivitatea probelor de sol pentru diferite conținuturi de umiditate. S-a observat că rezistivitatea a scăzut brusc odată cu creșterea conținutului de umiditate. Autorul a concluzionat că rezistivitatea este în funcție de conținutul de umiditate și gradul de saturație.

Imagistica electrică rezistivă (ERI) și Domeniul timp Reflectometry (TDR) au fost utilizate simultan pentru a obține rezistivitatea și conținutul de umiditate. Profiluri 2D ERI au fost transformate din profilul de umiditate 2D al solului incluzând proprietăți fizice și chimice ale solului.

Legea lui Archie a fost optimizată numeric pentru a determina conținutul de umiditate din ERI la condiția specifică a site-ului. Această metodologie a eliminat dificultăți în măsurarea rezistivităților de apă. Autorii au indicat că modelul (pe baza legii lui Archie) ar putea fi utilizat pentru a cuantifica modelul 2D al solului umidificat și pentru a crea un profil 2D ERI, ce se evidențiază profilurile ale site-ului specific. S-a observat de asemenea că modelul produs a dat rezultate utile pentru a determina, heterogenitatea de umiditate în contor cu scara. Cu toate acestea, modelul nu a fost capabil să rezolve heterogeneitățile la scară mică în umiditatea solului. În funcție de site-ul, diferiți cationii extractibili se impun pentru a calibra legea lui Archie, care ar fi utilă pentru a obține rezultatele corespunzătoare.

Brunet et al. (2009) au efectuat cercetări pentru a obține deficitul de apă prin tomografia rezistivă electrică (ERT). Zona de studiu a fost sudul Cévennes, Franța. Mai mult de 10 ERT au fost efectuate între februarie 2006-decembrie 2007. Domeniu Timp Reflectometry (TDR), măsurarea

conținutului de apă s-a realizat de-a lungul a trei profile verticale de la diferite adâncimi astfel cum sunt prezentate în Fig. nr. 6.



**Fig. nr. 6** – Studiul deficitului de apă – (a) suprafața studiată (b), tuburi de A.TDR, pluviometru electrod (Brunet et al., 2009).

Profilurile de TDR s-au situat pe o suprafață de 5 m, pentru profilurile ERT. Legea lui Archie a fost aplicată pentru a calibra în laborator, folosind pentru cimentare coeficientul ( $m$ ) de 1.25 și coeficientul de saturație ( $n$ ) de 1.65. Porozitatea constantă de 0.42 și rezistivitatea soluției solului de 22 ohmi-m au fost considerate în calibrare. Autorii indică că interpretarea conținutului de apă sau deficitul de apă a fost foarte sensibil la porozitate.

## Metodologia

Obiectivul acestui studiu este de a determina relația dintre proprietățile geotehnice ale unui sol argilos și rezistivitatea electrică. Probele de sol au fost colectate de la autostrada U.S. 287 și SUA 67. Testele de laborator ale probelor colectate au fost efectuate pentru a determina tipul de sol, indicele de proprietăți, optimum uscat unitate de greutate și conținut de umiditate.

Rezistivitatea electrică a fost, de asemenea, măsurată în laborator pentru a determina corelația proprietăților geotehnice cu rezistivitatea solului.

Au fost prelevate probe de sol de la două site-uri de Midlothian, Ellis County, Texas. Adâncimea forajelor pentru prelevare a probelor variat de

la 8 la 15 m (25 la 45 ft) probele au fost colectate la fiecare 2 m 5 ft în fiecare sondă. Un total de șase probe de sol au fost selectate pentru a determina proprietățile geotehnice și proprietățile electrice în acest studiu.

### Testul metodologic

Un program experimental de laborator extins a fost întreprins pentru a atinge obiectivele studiului. Probele de sol colectate au fost clasificate conform Sistemului unitar de clasificare a solurilor (USCS), folosind analiza de sită, limitele de lichid și limitele de plastic rezultat. În plus, compoziția ionică din probele de sol și structura, au fost analizate de XRF și SEM. Pentru rezistivitatea probelor din sol au fost stabilite diferite condiții. Rezultatul testelor de laborator pentru identificarea proprietăților geotehnice, sunt prezentate în Tabelul nr. 1.

*Tabelul nr. 1 – Teste de laborator ale proprietăților geotehnice pentru probele de sol.*

Type of Test	Sample Location	No of Test
Sieve Analysis	US 287 and US 67	6
Liquid Limit	US 287 and US 67	6
Plastic Limits	US 287 and US 67	6
XRF	US 287 and US 67	6
SEM	US 287 and US 67	5
Compaction	US 287 and US 67	28
UCS	US 287 and US 67	29

Obiectivul principal al studiului a fost de a investiga răspunsul rezistivității solurilor pentru parametrii geotehnici diferiți. Pentru a realiza obiectivele, testele de rezistivitate au fost efectuate pentru condiții diferite, cum sunt prezentate în Tabelul nr. 2.

*Tabelul nr. 2 – Rezumatul testelor rezistivitate ale solului pentru condiții diferite.*

Soil Resistivity			
Fixed Parameters	Variable Parameters	Specimen Location	No of Tests
Moisture Content	Dry Unit Weight	US 287	20
Dry Unit Weight	Moisture Content	US 287	59
Compaction Level	Moisture Content and Dry Unit Weight	US 287 and US 67	29
Moisture Content and Dry Unit Weight	Fine Content and Atterberg Limits	US 287 and US 67	5

## Compactare

Testele compactate ale eșantioanelor de sol au fost efectuate pentru a observa rezistivitatea solului la condiții diferite de compactare. Procedura standard D698 ASTM a fost urmată de testare. Proba de sol cu o greutate de cca. 3000 gm, trecută prin sita nr. 40, a fost luată pentru fiecare test. Cantitatea necesară de apă a fost adăugată pentru a produce cinci probe diferite de compactare. Apa a fost amestecată bine cu probele de sol. Proba compactată și mașonul au fost aranjate în mod corespunzător. În probă, a fost aplicat un strat grosime pentru a crea o suprafață netedă. Greutatea mașonului a fost determinat înainte de compactare. Solul a fost compactat pentru trei straturi diferite cu 25 de lovituri la fiecare strat.

## Rezistivitatea solului

Rezistivitatea solului din probele colectate au fost măsurate în laborator în conformitate cu AASHTO T288–91. Proba de sol a fost compactată în caseta de rezistivitate având un conținut de greutate și umiditate prestabilite. Doi electrozi de tensiune au fost introduși în proba de sol prin găurile din caseta de rezistivitate. Cablurile au fost conectate la curent și electrozii cu tensiune. După aceea caseta a fost conectată la echipamente de rezistivitate Super Sting IP. Rezistența electrică a probei de sol a fost înregistrată în modul manual al echipamentului. Rezistența măsurată a fost multiplicată cu factorul de calibrare (0.696) și cu o dimensiune a factorului geometric de (1.01) pentru a obține rezistivitatea probei. Echipamentul Super Sting IP este prezentat în Fig. nr. 7.



Fig. nr. 7 – Echipament Super Sting IP.

Teste de rezistivitate a solului au fost efectuate în diferite condiții, astfel:

- Unitatea de greutate pentru diferite umidități.
- Conținutul de umiditate pentru diferite unități de greutate.
- Greutatea și conținutul de umiditate corespunzătoare pentru compactarea Standard Proctor.
- Greutatea și umiditatea conținută.

Teste ale rezistivităților solului au fost efectuate pentru o greutate fixă având condiții diferite de umiditate. Conținutul de umiditate a fost variat de la 10% la 50%. Greutatea optimă uscată a fost considerată pentru a calcula greutatea necesară probelor de sol. Probele au fost compactate în caseta de rezistivitate după amestecarea completă cu umiditate.

Pentru a obține rezistivitatea solului și greutatea corelată, greutatea probei uscate a variat de la 75 pcf la fiecare probă. Testul a fost repetat în trei condiții de umiditate 18%, 24% și 30% pentru fiecare probă. În funcție de ponderea uscată, probele de sol au fost cântărite și compactate în caseta de rezistivitatea la umiditățile specifice.

Pentru a identifica rezistivitatea variației solului cu condiția de compactare, au fost utilizate șase probe de sol. Procedurile urmate sunt descrise mai jos.

- Testul de compactare *Standard Proctor* a fost realizat la un conținut de umiditate diferit și de greutate uscate. Pentru rezultatele testelor o curbă de compactare a fost generată pentru fiecare probă.

- Puterea de compresie a fost stabilită la umiditatea conținută și unitatea de greutate pentru compactarea Standard Proctor.

- Rezistivitatea solului a fost determinată pentru starea de umiditate și greutatea corespunzătoare pentru compactarea Standard Proctor.

- Rezistivitatea solului a fost corelată cu starea de compactare și starea de rezistență la aceeași condiție.

Teste de rezistivitatea ale solului au fost efectuate la 85 pcf pentru o greutate uscată și 25% umiditate pentru a determina efectele de particule fine, limita de lichid, limita de plastic și rezistivitatea probelor de sol.

### **Limitele domeniului lichid și limitele domeniului plastic**

Limitele domeniului lichid și limitele domeniului plastic au fost determinate pentru sol prin clasificarea și identificarea relației lor cu rezistivitatea solului. Limitele lichid ale probelor de sol au variat între 58–79 pcf. Limitele domeniului plastic ale probelor au fost între 18–28 pcf.

Eșantioanele solurilor sunt clasificate ca fiind foarte plastice, după clasificarea (CH) conform nomenclatorului USCS, a probelor de laborator. În cazul de față clasificarea solului, limitele lichide și limitele plastice pot fi folosite pentru a determina tipul de minerale argiloase.

Cele mai multe dintre probele utilizate în studiu au fost din gama illite. Mitchell și Soga (2005) descriu cauzele probabile de variație ale limitelor lichide și limitele plastice în solurile argiloase. Dimensiunea particulelor, gradul de cristalizare, cationii absorbiți, prezența electrolitului, și materiile organice au fost raportați ca factori ce contribuiesc la variații.

Prin urmare, solul argilos cu o mineralogie similară poate furniza limite diferite ale lichidelor și a limitelor plastice, datorită diferenței a gradului de cristalizare, a prezenței materiei organice și a electrolitului liber. Limitele lichidului din solurile argiloase sunt asociate cu suprafața specifică. Solul argilos cu o suprafață mare necesită mai multă apă pentru a determina limita de lichid (Mitchell și Soga, 2005). Suprafața specifică poate fi determinată la limita lichidului, iar proba de sol se determină cu următoarea ecuație empirică.

$$LL=19+0,56As$$

unde,  $As$  = suprafața specifică în  $m^2/gm$ ,  $LL$  = limita de lichid a probei.

Intervalele suprafețelor specifice kaolinite, montmorillonit și illite sunt aproximative între 10–20  $m^2/gm$ , 50–120  $m^2/gm$  și 65–100  $m^2/gm$  (Mitchell și Soga, 2005). Ar trebui de remarcat că există intervale suprapuse din suprafața specifică pentru montmorillonit și illite. Astfel, calculate suprafețele specifice indicată că testele suplimentare pe compoziția ionică și structură sunt necesare pentru a identifica mineralele argiloase.

### Fluorescența de raze X

Compozițiile ionice (procentajul de greutate) din probe au fost determinate în mare parte cu energia fluorescentă de raze X (XRF). Testele au fost efectuate pentru a cuantifica valoarea cationilor. Anionii tipici în solul argilos, cum ar fi oxigenul și hidrogenul nu au fost determinați. Mai mult, ionii de sodiu nu au fost detectați pentru că nivelul de energie a echipamentului a fost sub nivelul de detectare.

În funcție de rezultatele testelor, procentul de siliciu și aluminiu ionic au fost în mare parte comparați cu alți ioni. Rezultatele au arătat că

procentul ionilor de potasiu nu au fost semnificativi (> 2%). Suma ionilor de calciu a variat de la 7% la 14%. S-a observat că magneziu, manganul, sulful, titanul și fosforul au fost mai puțin de 1%.

Montmorillonit și illite, au o structură de 2:1. O foaie de aluminiu este situată între două structuri de siliciu. Stratul de aluminiu este combinat cu siliciu și ioni de hidroxil în montmorillonit.

În illite, straturile sunt legate împreună cu ioni de potasiu. Prin urmare, în procentul de potasiu, ionii ar trebui să fie ridicați în illite. Rezultatele XRF au indicat că procentul de ioni potasici au variat de la 1,1% la 1,7%. În plus, formula chimică a illitelor pot fi prezentate ca  $(K, H_3O)(Al, Mg, Fe)_2(Si, Al)_4O_{10}[(OH)_2, (H_2O)]$ , ([http:// webmineral.com/data/Illite.shtml](http://webmineral.com/data/Illite.shtml)). Formula chimică arată că nu există nici un ion de calciu în illite. Cu toate acestea, procentajul mare de ioni de calciu au fost observate în probe. În plus, procentul de aluminiu și siliciu a fost de așteptat să fie mare, deoarece acestea sunt elemente de bază în structura argiloasă.

Conform analizei rezultatelor XRF, probele au fost în gama de montmorillonit. Rezultatele obținute prin XRF, au fost bune și s-au încadrat cu informațiile geologice din județul Ellis, furnizate de Statele Unite Geological Survey (USGS). Potrivit USGS, geologia din orașul Ellis a fost constituită din Austin Chalk (cretă), șist Eagle ford, formațiune Ozan, formațiune Wolf, marnă de Neylandville și Marlbrook, aluviuni și drepozite terase.

Raney et al., (1987) a realizat un studiu pe prezența mineralelor argiloase din diferite unități geologice lângă Waco, TX. A fost raportat că Austin Chalk este un strat format din 94% montmorillonit și că Neylandville Marl este alcătuit din 62% la 82% montmorillonit. Mineralele argiloase care sunt dominante în formațiunea Ozan, este alcătuită din dictioedral montmorillonit. De aceea, minerale argiloase dominante în probele de sol sunt montmorillonit.

### Microscopul electronic de scanare

Imaginea mărită pentru structura argiloasă a fost obținută la Microscop Electronic Scanning (SEM). Imaginile au fost amplificate până la 15000 de ori față de dimensiunea originală. Testele au fost efectuate pe cinci eșantioane, adică A-B3-D10, A-B3-15, A-B2-D20, A-B3-D20 și B-B1-D15. Imagini de înaltă rezoluție ale structurii au fost capturate atunci când acestea au fost privite în mod clar.



Imaginea SEM a particulelor bine cristalizate de kaolinite indică că placa are șase fețe. Dimensiunile laterale ale plăcii sunt în ordinea 0,1–0,4 micrometru și grosimile lor au variat de la 0.05 la 2 micrometru (Mitchell și Soga, 2005). Cu toate acestea, forma hexagonală slabă cristalizată a kaolinului nu este diferită.

Montmorillonite arată ca niște fulgi echidimensionali la scanarea microscopului electronic. Arată ca un strat subțire (Mitchell și Soga, 2005). Montmorillonit apare în formă de ace, atunci când o cantitate mare de fier și magneziu substituiesc aluminiul. Substituirea de fier și magneziu provocă tulpina direcțională în structura de argilă (Mitchell și Soga, 2005).

Illitele au particule în formă de fulgi. Illitele bine cristalizate pot consta într-un contur hexagonal (Mitchell și Soga, 2005). În general, illitele sunt formate din argile și alte materiale neargiloase. Illitele sunt foarte rare în starea lor pură.

Analiza SEM a arătat imagini ale probelor cu structuri în straturi orizontale atunci când au fost amplificate de 2000 de ori. Straturile orizontale ar putea fi atribuite din cauza perturbării probelor de sol. În general, agregatele de sol sunt aliniate în straturi orizontale sub aplicarea de încărcare.

Analiza de studiu anterioară, a rezultatelor testelor XRF și SEM indică faptul că montmorillonite ar putea fi cea mai dominantă argilă minerală în probele de sol.

### **Rezistivitatea solului cu conținutul de umiditate volumetrică**

Umiditatea volumetrică conținută este corelată cu greutatea uscată a solului, greutatea apei este corelată cu conținutul de umiditate gravimetrică. Rezultatele testelor obținute de la subsecțiuni sunt combinate pentru a corela rezistivitatea solului cu umiditatea volumetrică. Variația de rezistivitatea a solului cu conținutul de apă volumetric este reprezentată în Fig. nr. 8.

S-a observat că reprezentate grafic datelelor au urmat un trend în funcție de relația ( $R_2 = 0.64$ ). Funcția determinată este:

$$\rho = 1.189\theta^{-1.148}$$

unde:  $\rho$  = rezistivitatea solului măsurată în Ohm /m,  $\theta$  = conținutul umidității volumetrice.

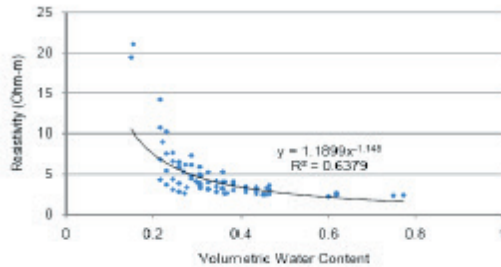


Fig. nr. 8 – Variația de rezistivitatea a solului cu conținutul de apă volumetric.

Suprafața tri-dimensională a solului este obținută dintr-o ecuație, aplicată într-un soft matematic (Fig. nr. 9).

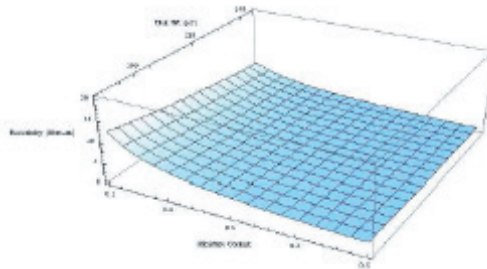


Fig. nr. 9 – Suprafața tri-dimensională obținută din umiditatea conținută cu rezistivitatea.

### Rezistivitatea solului în funcție de gradul de saturație

Greutatea conținută și cea uscată de apă pot fi combinate pentru un singur parametru geotehnic numit *gradul de saturație*, gradul de saturație crește odată cu creșterea conținutului de apă sau greutatea uscată (Abu Hassanein, 1996). Variația de rezistivitatea a solului cu gradul de saturație este prezentată în Fig. nr. 9 pentru probele de sol, A-B2-D15, A-B3-D10, A-B3-D15 și A-B3-D20. Pentru a obține gradul de saturație, a fost asumat densitatea 2.65. S-a observat că rezistivitatea solului scade odată cu creșterea gradului de saturație.

Rezistivitatea solului medie a fost 6.7 Ohm-m la 40% grad de saturație. Cu toate acestea, rezistivitatea medie a solului a scăzut la 3,2 ohmi-m la 90% grad de saturație. Odată cu creșterea suprafeței este necesară o cantitate mai mare de apă pentru formarea filmului de apă în apropierea

particulelor fine. În lipsa unei ecranări corelarea între particulele de sol nu este posibilă. În plus, conducțiile ionice nu au loc fără apă și fără o bună corelare între particulele de sol.

Odată cu creșterea umidității, a avut loc reducerea între particule de apă. Prin urmare, rata de variație a fost 0,08 Ohm-m / (m<sup>2</sup>/gm) la 24% umiditate și 0,04 Ohm-m / (m<sup>2</sup>/gm) în 30% umiditate la 75 pcf unitate de greutate uscat. La 30% umiditate și 90 pcf unitate de greutate uscat, rezistivitatea solului a fost independentă de suprafață din cauza formării de film a apei în apropierea unor particule în stare compactată a solului.

## Concluzii

Relația dintre rezistivitatea solului și parametrii geotehnici diferiți au potențialul de a umple golul dintre domeniile ingineriei geotehnice și ingineriei geofizice. Prin dezvoltarea corelațiilor de rezistivitate electrică a solului cu parametrii geotehnici, *RI* pot fi folosite pe larg pentru investigarea site-urilor geotehnice. Obiectivul studiului a fost să determine relația dintre proprietățile diferite geotehnice ale solurilor argiloase. Probe de sol analizate au fost colectate de-a lungul autostrazilor U.S. 287 și SUA 67, Midlothian, Ellis County, Texas. Bazat pe investigații de laborator, probe de sol au fost clasificate ca fiind foarte plastice (CH) conform Manuel. Din analiza de imagine XRF și SEM, s-a constatat că minerale argiloase sunt dominante în probe, cum ar fi montmorillonit. Teste de rezistivitate a solului au fost efectuate la stări diferite, pentru a identifica relația cu particulele fine, fracțiunea grosieră, limita de lichid, limita de plastic, compoziția ioniilor, compactarea, unitate de greutate și conținutul de umiditate. În cele din urmă, s-a dezvoltat o relație între conținutul de apă cotelat cu rezistivitatea solului.

Rezultatele studiului a fost rezumate mai jos:

1. Probe de sol colectate au fost extrem de plastice (CH) în conformitate cu clasificarea de sol, Manuel.
2. Potrivit la limita de lichid și limita de plastic, informații specifice despre minerale argiloase nu au fost obținute. Prin urmare, mineralogia argilei a fost determinată pe baza compoziției de ioni XRF și analiza de imagine SEM. Mineralogie dominantă argiloasă ar putea fi montmorillonit.
3. Rezistivitatea scade odată cu creșterea conținutului de umiditate din sol. Rata medie de reducerea rezistivitatea solului a fost 13,8 Ohm-m / % conținut de umiditate crește de 10% la 20%. S-a observat că rezistivitatea

solului a fost aproape independentă după 40% umiditate. Măsurarea rezistivității solului a variat de la 2.1–2.42 ohmi-m la 50% umiditate în probe de sol. A fost îmbunătățită conducția electrică datorită prezenței de umiditate ce ar putea cauza reducerea în rezistivitatea solului cu creșterea de umiditate.

4. Rezistivitatea solului a scăzut aproape liniar cu o rată medie de 0,3 Ohm-m/pcf între unitate umed greutate 88,5 la 100 pcf la 18% umiditate. În plus, efectul de umiditate în rezistivitatea solului a fost ridicat în comparație cu unitatea de greutate.

### Bibliografie

- [1] Abu-Hassanein, Z. S., and Benson, C. H. „Electrical resistivity of compacted clays”, în *J. Geotech. Eng.*, 122 (5), 397–406, 1996.
- [2] Aizebeokhai, A. P. „2D and 3D geoelectrical resistivity imaging: Theory and field design”, în „*Scientific Research and Essays*, 5(23), 3592–3605, 2010.
- [3] Archie, G. „The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics”, în „*Petroleum Technology, T.P. 1422*, Shell Oil Co. Houston, TX, 1991.
- [4] Barthelmy, D. „Minerology Database”, <http://webmineral.com> > (May 25, 2011), 1997.
- [5] Benson, C. H. and Daniel, D. „Influence of clods on the hydraulic conductivity of compacted clay”, în *J. Geotech. Eng.*, 116 (8), 1231–1248, 1990.
- [6] Braga, A. C. O., Dourado, J. C., and Chang, H. K. „Correlation of Electrical Resistivity and Induced Polarization Data with Geotechnical Survey Standard Penetration Test Measurements”, în *J. Environ. Eng. Geophys.*, 4 (2), 123–130, 1999.
- [7] Braja, M. „Das.” *Advanced Soil Mechanics*”, în *Hemishepre Publishing Corporation, McGraw Hill*, NY, 1983.
- [8] Brunet, P., Clément, R., and Bouvier, C. „Monitoring soil water content and deficit using Electrical Resistivity Tomography (ERT)-A case study in the Cevennes area, France”, în *J. Hydrol.*, 380(1–2), 146–153, 2010.
- [9] Golam, KIBRIA, *Determination of geotechnical of properties of clayey soil from RESISTIVITY IMAGING (RI)*, University of Texas at Arlington, 2011.
- [10] James K, Mitchell, Kenichi Soga, *Fudamentals of Soil Behavior*, Hardcover, NY, 2005.
- [11] Voronin, A. D., *The Bases of Soil Physics*, Mosk. Gos. Univ., Moscow, 1986.