

# Università degli Studi di Napoli Federico II



Scuola Politecnica e delle Scienze di Base

Corso di laurea in

Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE EDILE E AMBIENTALE

TESI DI LAUREA

## **CONSOLIDAZIONE DI FANGHI CON L'ADOZIONE DI SISTEMI DRENANTI ELETTROCONDUTTIVI**

RELATORI

Ch.mo Prof. Ing. Alessandro Flora

Ch.ma Prof.ssa Ing. Stefania Lirer

CANDIDATE

Sara Gargano M 67/215

Lucia Mele M 67/216

CORRELATORE

Ch.mo Prof. Ing. Andrea Sorrentino

ANNO ACCADEMICO 2014/2015

## Contesto operativo, obiettivi e sviluppo del lavoro di tesi

Il presente lavoro si colloca all'interno delle attività promosse dal commitment europeo "ROSE" (Recycling of secondary raw materials for a sustainable Optimization of construction processes in civil Engineering works). ROSE è coordinato dalla azienda STRESS, ed ha l'obiettivo principale di favorire il riutilizzo delle materie prime secondarie (secondary raw materials) nell'ambito dell'ingegneria civile.

In particolar modo, vengono considerati diversi tipi di materiali: fanghi di dragaggio, aggregati provenienti da attività edilizie e scarti industriali (ceneri volanti, fibre, carta e plastica). L'attenzione viene posta principalmente sui fanghi di dragaggio, dove il 70% del volume di quelli prodotti, passa in discarica. Tali materiali, possono quindi essere trattati attraverso dei processi di consolidazione. Esistono diversi modi per consolidare un terreno, però nell'ambito della tesi si è fatto riferimento alla tecnica della consolidazione elettrosmotica.

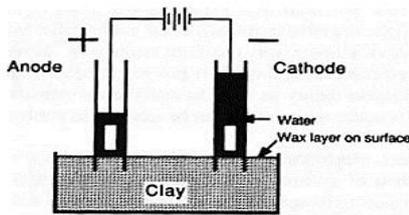
La tesi presenta i seguenti obiettivi: verificare la realizzabilità di dreni biodegradabili; verificare la possibilità di elettrificarli; studiare processi elettrocinetici.

Mentre lo sviluppo della tesi è il seguente:

- 1) Studio della teoria elettrocinetica;
- 2) Sperimentazione all'IPCB per la realizzazione dei dreni biodegradabili, compatibili con altri materiali in commercio;
- 3) Sperimentazione nel laboratorio di geotecnica, dove sono state effettuate prove di consolidazione tradizionale e elettrocinetica;
- 4) Elaborazioni e conclusioni.

### 1) Studio della teoria elettrocinetica

#### Cenni storici



Le prime osservazioni sperimentali riguardanti le interazioni tra conduzione idraulica ed elettrica in un terreno argilloso sono dovute a Reuss (1809). Applicando un potenziale elettrico, l'acqua fluisce verso il catodo (elettrodo negativo), provocando così l'innalzamento del livello d'acqua nel tubo di vetro contenente tale polo, come rappresentato nella Figura 1.

*Figura 1: Schema di Reuss*

#### I fenomeni elettrocinetici nei terreni argillosi

Gli effetti del fenomeno sono macroscopici e microscopici.

Gli effetti rilevabili a **livello macroscopico** si concretizzano essenzialmente nello spostamento del fluido interstiziale (elettrosmosi) generalmente in direzione del catodo, accompagnato da importanti variazioni della pressione neutra.

A **livello microscopico** gli effetti sono notevolmente più complessi. Innanzitutto, nell'ipotesi di partire da uno stato di perfetta omogeneità, il campo elettrico provoca uno spostamento di tutte le cariche elettriche, le quali si accumuleranno verso gli elettrodi rompendo lo stato di omogeneità preesistente. Queste variazioni di concentrazione provocano l'insorgere di fenomeni di diffusione molecolare e di interazione tra terreno e soluzione interstiziale. In aggiunta a questi fenomeni si ha uno spostamento degli equilibri chimici in soluzione,

dovuto alla variazione delle concentrazioni delle specie chimiche presenti, e l'insorgere di fenomeni elettrochimici all'interfase elettrodo/terreno, dovuti al passaggio della corrente elettrica.

I due livelli, macroscopico e microscopico, sono intimamente legati in quanto gli effetti macroscopici sono una conseguenza delle modificazioni microscopici del complesso terreno/soluzione.

L'argilla e il limo sono costituiti da particelle che hanno una superficie carica negativamente (Mitchell & Soga, 2005; Pusch, 1976). Nell'acqua dei pori sono contenuti ioni cioè sali disciolti che hanno una carica positiva (cationi) o negativa (anioni). Gli ioni sono circondati da molecole d'acqua (Figura 2) ad essi debolmente legati. I cationi sono attratti dalle particelle di terreno cariche negativamente per bilanciare la differenza di carica, per questo si ha un'alta concentrazione di cationi sulla superficie. Il primo strato di ioni positivi (strato di Stern) è attratto più fortemente dalla superficie, all'aumentare della distanza dalla particella la forza attrattiva diminuisce, ciò dà luogo a un'atmosfera ionica diffusa in cui gli ioni sono liberi di muoversi in soluzione (strato di Gouy) (Figura 3).

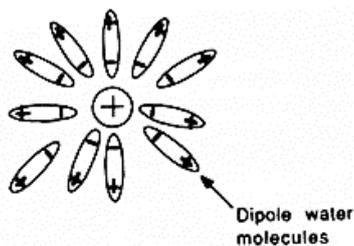


Figura 2: Catione circondato da molecole d'acqua

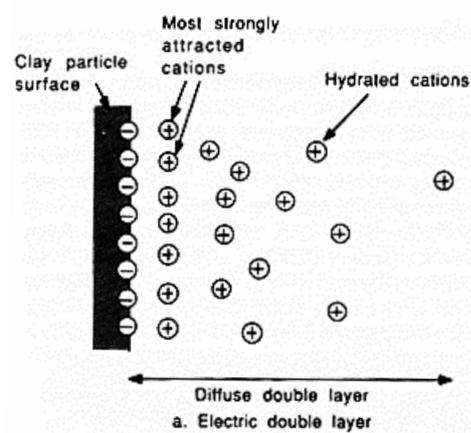


Figura 3: Doppio strato diffuso

In quest'ultimo strato (Gouy) lo squilibrio elettrico localizzato che si viene ad avere tra cationi ed anioni decresce esponenzialmente man mano che ci si allontana dalla superficie della particella. Il potenziale elettrico esistente tra la parte fissa e mobile del doppio strato viene definito **potenziale zeta**,  $\zeta$ .

I fenomeni elettrocinetici possono essere sintetizzati nello schema seguente:

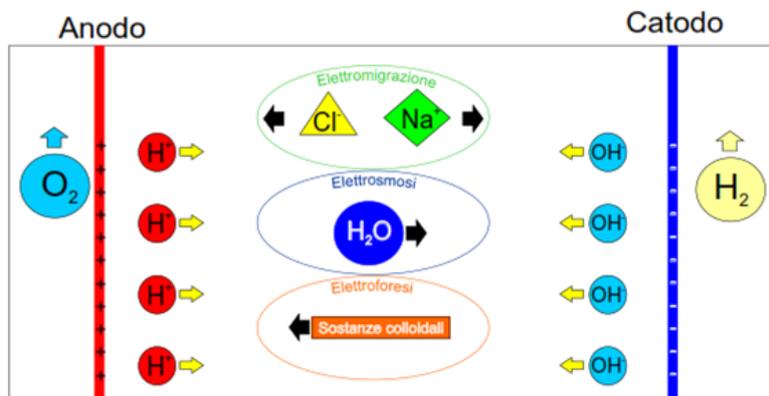


Figura 4: processi elettrocinetici

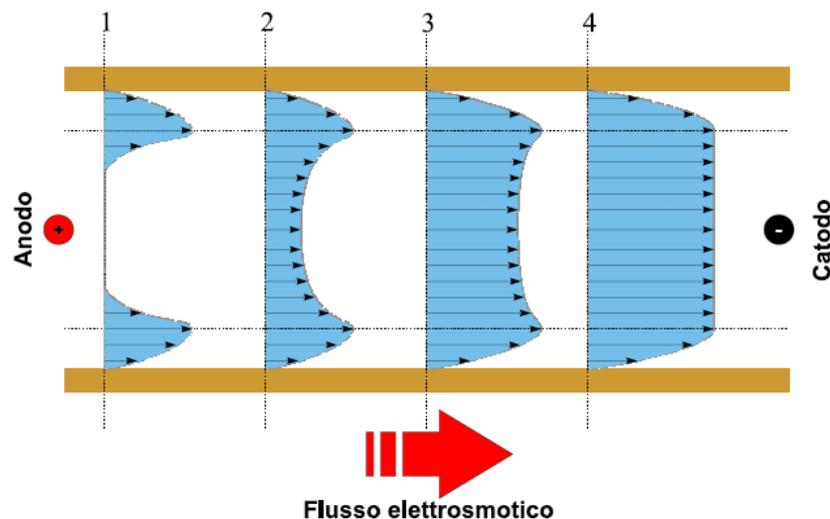
## Teorie alla base dei processi elettrocinetici

Esistono diverse teorie sui processi elettrocinetici, ma di seguito vengono riportate solo le più importanti:

- 1) Teoria di Helmholtz – Smoluchowski (1879 – 1921)
- 2) Teoria di Casagrande (1948)
- 3) Teoria di Esrig (1968)

### *Teoria di Helmholtz – Smoluchowski (1879 – 1921)*

Si basa sull'analogia col condensatore elettrico (figura 5)



*Figura 5: analogia col condensatore elettrico*

La formula è la seguente:

$$q_A = k_e \cdot \frac{\Delta\Phi}{\Delta L} \cdot A \quad (1)$$

Con:

- $q_A$  = portata ( $\text{m}^3/\text{s}$ );
- $\zeta$  = zeta potenziale (V);
- $\eta$  = viscosità del fluido di porosità ( $\text{Pa}\cdot\text{s}$ );
- $n$  = porosità del terreno;
- $D$  = permittività elettrica del terreno ( $\text{F}/\text{m}$ );
- $A$  = sezione trasversale ortogonale al flusso ( $\text{m}^2$ );
- $\Delta\Phi$  = potenziale elettrico (V);
- $\Delta L$  = lunghezza (m);

Con:

- $k_e = \frac{\zeta D}{\eta} \cdot n$  = coefficiente di permeabilità elettrosmotica ( $\text{m}^2/\text{sV}$ )

Questa è l'equazione che descrive il flusso d'acqua sotto un gradiente di potenziale elettrico.

### Teoria di Casagrande (1948)

Casagrande propose una semplice relazione per il calcolo del flusso elettrosmotico, valida nel caso in cui sia garantito un libero accesso dell'acqua sia al catodo che all'anodo:

$$q = k_e i_e A \quad (2)$$

- $q$  = portata ( $m^3/s$ );
- $k_e$  = coefficiente di permeabilità elettrosmotica ( $m^2/sV$ );
- $i_e$  = gradiente elettrico applicato ( $V/m$ );
- $A$  = sezione trasversale ortogonale al flusso ( $m^2$ );

### Teoria di Esrig (1968)

Esrig (1968) ha sviluppato una teoria per prevedere il flusso elettrosmotico monodimensionale, quando il flusso e la consolidazione avvengono nella stessa direzione. La teoria assume le seguenti condizioni semplificate:

- Terreno omogeneo e saturo;
- Proprietà chimico – fisiche del terreno uniformi e costanti nel tempo;
- Assenza di elettroforesi;
- Velocità dell'acqua di porosità indotta elettricamente proporzionale al gradiente di tensione attraverso  $k_e$  che è assunto costante nel tempo;
- Tutta la tensione applicata utilizzata per il trasporto dell'acqua;
- Campo elettrico applicato costante nel tempo;
- Assenza di reazioni chimiche agli elettrodi;
- Sovrapposizione del flusso dovuto al gradiente elettrico a quello dovuto al gradiente idraulico per trovare il flusso totale.

Sulla base di osservazioni sperimentali su una vasta gamma di terreni coesivi dal limo argilloso alla bentonite sodica, Casagrande (1948) ha per primo suggerito un'espressione lineare, del tutto analoga alla legge di Darcy, tra la velocità di filtrazione indotta dall'elettrosmosi e il campo elettrico applicato:

$$v_e = -k_e \frac{\Delta\Phi}{\Delta L} \quad (3)$$

- $\Delta\Phi$  è il potenziale elettrico (Volt),
- $\Delta L$  è la distanza tra gli elettrodi;
- $\Delta\Phi/\Delta L$  è il gradiente di tensione ( $i_e$ );
- $k_e$  è il coefficiente di permeabilità elettrosmotica [ $m^2/(s \cdot V)$ ].

In base alle condizioni di equilibrio, al principio della conservazione della massa ed al principio della conservazione della carica elettrica, risulta possibile scrivere:

$$\frac{\partial \sigma'_{ij}}{\partial x_j} + \frac{\partial u}{\partial x_i} - b_i = 0 \quad (5.1)$$

$$\frac{\partial v_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \varepsilon_{kk}}{\partial t} \quad (5.2)$$

$$\frac{\partial j}{\partial x_i} = \frac{\partial \rho}{\partial t} \quad (5.3)$$

dove:

- $\sigma'_{ij}$  = componenti del tensore delle tensioni efficaci;
- $u$  = pressione interstiziale;
- $\mathbf{b}$  = vettore delle forze di volume;
- $\mathbf{v}$  = velocità di filtrazione apparente;
- $\mathbf{j}$  = densità di corrente;
- $\rho$  = densità di carica elettrica.

Risulta possibile correlare il flusso idraulico ed elettrico ai gradienti delle rispettive funzioni potenziale, che costituiscono le *forze motrici*.

$$v_i = -K_{ij}^k \frac{\partial h}{\partial x_j} - K_{ij}^e \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \quad (5.4)$$

dove  $K_{ij}^k$  sono le componenti del tensore della permeabilità idraulica; e  $K_{ij}^e$  sono le componenti del tensore della permeabilità elettrosmotica.

La (5.4), rappresenta la generalizzazione delle leggi di Darcy per la filtrazione e di Ohm per la conduzione elettrica al caso in cui i due fenomeni di conduzione avvengano simultaneamente, e nella formulazione adottata, permettono di tener conto anche di una eventuale anisotropia del mezzo. Sostituendo nelle (5.2) l'espressione fornita dalla (5.4) per la velocità di filtrazione è possibile ottenere la seguente equazione differenziale alle derivate parziali:

$$\frac{\partial}{\partial x_i} \left( K_{ij}^k \frac{\partial h}{\partial x_j} + K_{ij}^e \frac{\partial \Phi}{\partial x_j} \right) + \frac{\partial \varepsilon_{kk}}{\partial t} = 0 \quad (6)$$

L'equazione di continuità (6) può essere riscritta in maniera più semplice come:

$$k_e \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{k_h \partial^2 u}{\gamma_w \partial x^2} = m_v \frac{\partial u}{\partial t} \quad (7)$$

in cui compare  $u$  e non più  $h$ , con  $m_v$  coefficiente di compressibilità volumetrica, legato al coefficiente di consolidazione  $c_v$  dall'equazione:

$$c_v = \frac{k_h}{m_v \gamma_w} \quad (7.1), \quad \text{quindi} \quad m_v = \frac{k_h}{c_v \gamma_w} \quad (7.2)$$

sostituendo ed introducendo la variabile ausiliaria  $\xi$  definita come:

$$\xi(x, t) = \frac{k_e \gamma_w}{k} \Phi + u \quad (8)$$

l'equazione si trasforma in:

$$c_v \frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} = \frac{\partial \xi}{\partial t} \quad (9)$$

che ricorda proprio la formula della consolidazione monodimensionale di Terzaghi.

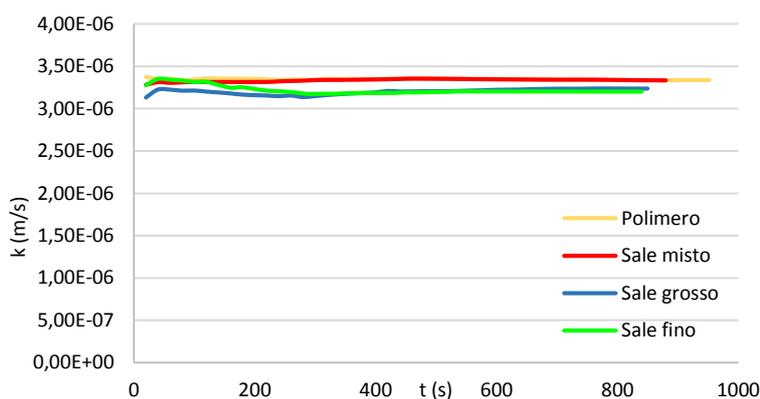
## 2) Sperimentazione all'IPCB per la realizzazione dei dreni biodegradabili, compatibili con altri materiali in commercio

La prima parte della sperimentazione riguarda proprio la realizzazione di dreni e di elettrodi biodegradabili. Lo scopo è quello di utilizzare materiale ecologico che non crei problemi di inquinamento ambientale, ma che sia anche economico. Per questa ragione si è deciso di utilizzare un materiale polimerico come il PCL (poli-caprolattone) con l'aggiunta di sale, come NaCl. Sono stati realizzati prima dei dreni non elettrificati, su cui

sono state condotte delle prove di permeabilità. Prima della prova, i campioni sono stati immersi in acqua per 24 ore e poi sono lasciati all'aria per 48 ore, in questo modo i vuoti lasciati dal sale formano i vuoti. Sono state fatte diverse miscele, con diverse percentuali in peso di sale. Le prove di permeabilità sono state condotte solo sui provini costituiti dal 90% di sale, in quanto sono gli unici che hanno perso la quasi totalità del sale e quindi si possono considerare i pori interconnessi. In particolare sono state utilizzate diverse miscele con sale fino, grosso e misto (sale fino e sale grosso) (figura 6), confrontando i risultati in termini di permeabilità, e che sono risultati simili tra loro, con un valore di  $k$  pari a  $10^{-8}$  m/s. Poiché i valori sono bassi, è stato deciso di forare i provini e confrontare i valori di  $k$ , così ottenuti, con quelli di un dreno in solo polimero forato, da cui è emerso che i valori erano confrontabili, pari a  $10^{-6}$  m/s (figura 7). Pertanto l'utilizzo del sale è risultato inutile, in quanto l'acqua passava per una via preferenziale, ovvero i fori meccanici.



**Figura 6:** dreni in PCL e sale (sinistra); dreni in PCL e sale forati (foto centrale); dreni in solo PCL forati (destra)



**Figura 8:** confronto tra i valori di  $k$

Si è quindi scelto di utilizzare dei dreni in solo PCL forati, i quali devono essere resi conduttivi, per diventare degli elettrodi. È stata utilizzata grafite, miscelata al polimero, ma le piastre non risultavano conduttive per questo si è optato per l'utilizzo di piastre con un lamierino, ma a causa dell'ossidazione si è deciso di utilizzare piastre in grafite forate.



**Figura 9:** dreno elettrificato con PCL e grafite (sinistra); dreno in PCL e lamierino metallico (foto centrale); dreno in sola grafite (destra)

### 3) Sperimentazione nel laboratorio di geotecnica, dove sono state effettuate prove di consolidazione tradizionale e elettrocinetica

Una volta realizzati i dreni elettrificati, sono state condotte le prove di consolidazione tradizionale ed elettrosmotiche, utilizzando come terreno un'argilla di Potenza, con un  $w_L$  pari a 0.3, e relizzando due tipi di miscele, una con un contenuto d'acqua pari a  $1.3w_L$  e l'altra con  $1.6w_L$ .

La prima prova relizzata è quella di consolidazione tradizionale, realizzata con tre step di carico: 3.6, 8 e 15 kPa. L'apparecchiatura è resa flottante per cercare di ridurre gli sforzi di taglio. Sono state rappresentate le diverse curve di cedimenti nel tempo, da cui emerge come all'aumentare del carico, un certo cedimento viene raggiunto in un tempo minore. Al raggiungimento del cedimento secondario viene applicato il carico successivo. I risultati ottenuti, sono stati confrontati con quelli di una consolidazione elettrosmotica. In particolare modo sono state effettuate tre prove.

Nella prima prova, è stato utilizzato come elettrodo il polimero forato con un lamierino di alluminio. Sono stati applicati gli stessi step di carico della consolidazione tradizionale, ma con l'aggiunta di 30 kPa. In realtà il provino viene prima consolidato in maniera tradizionale con un carico di 3.6 kPa (flottante e non) e dopo il raggiungimento del cedimento secondario viene applicato il carico di 8 kPa con l'aggiunta di corrente elettrica, con un voltaggio pari a 15 V e quindi circa 1 V/cm. Le curve dei cedimenti nel tempo hanno registrato un andamento simile a quello della consolidazione tradizionale, ma con una pendenza maggiore e quindi a parità di tempo, viene registrato un cedimento maggiore, pertanto è stato possibile dimostrare come l'applicazione del campo elettrico effettivamente accelera il processo di consolidazione (figura 10). Nonostante tutto, dopo un certo tempo le curve presentano un tratto orizzontale, il quale non dipende dal raggiungimento di un cedimento secondario, ma dall'ossidazione degli elettrodi (figura 11).

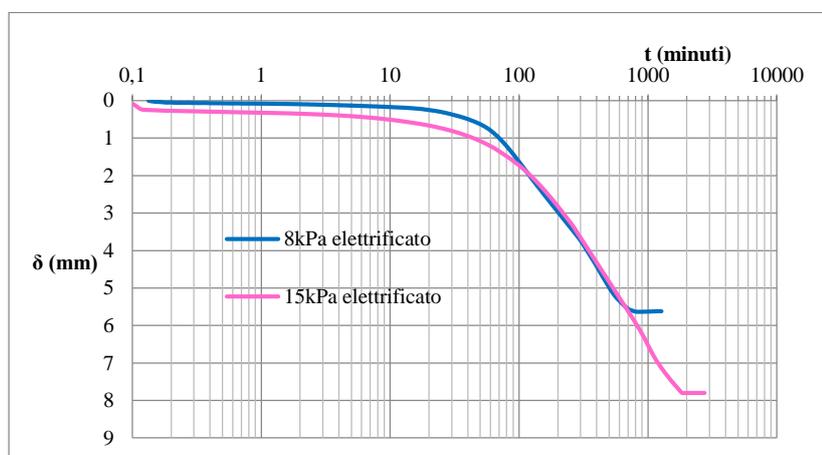


Figura 10: curve dei cedimenti



Figura 11: lamierino ossidato

Per questo nella seconda prova sono stati utilizzati dei dreni in grafite forati. Sempre nella prima prova, sono state stimate le pressioni neutre  $u$ . Nella seconda prova è stato utilizzato il terreno con un contenuto d'acqua maggiore, ed elettrodi in grafite. Durante questa prova sono state effettuate anche le misure del potenziale elettrico, in tre punti del provino. È stato misurato un andamento lineare del potenziale lungo l'altezza del provino, nullo al catodo e massimo all'anodo (figura 12), inoltre i valori nel tempo risultano costanti. Anche in questo caso la prova è stata condotta utilizzando un carico di 3.6 kPa, e successivamente aumentato fino a 8 kPa ed elettrificato (figura 13). La prova è stata successivamente interrotta a causa della desaturazione del provino (figura 14). È stato possibile ottenere il contenuto d'acqua nel provino, da cui emerge un  $w$  minore in prossimità del catodo, verso cui si dirige convenzionalmente il flusso di corrente e quindi di acqua.

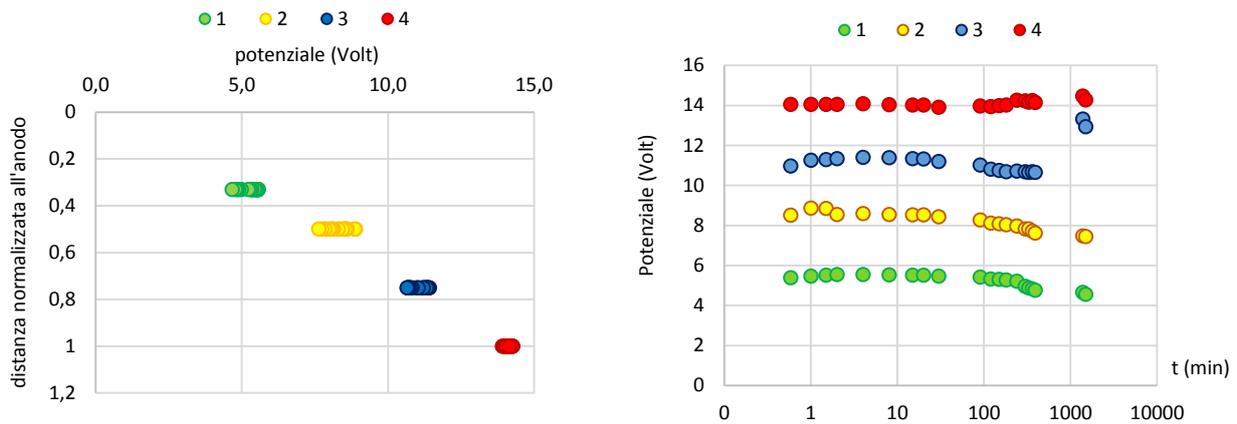


Figura 12: misure elettriche

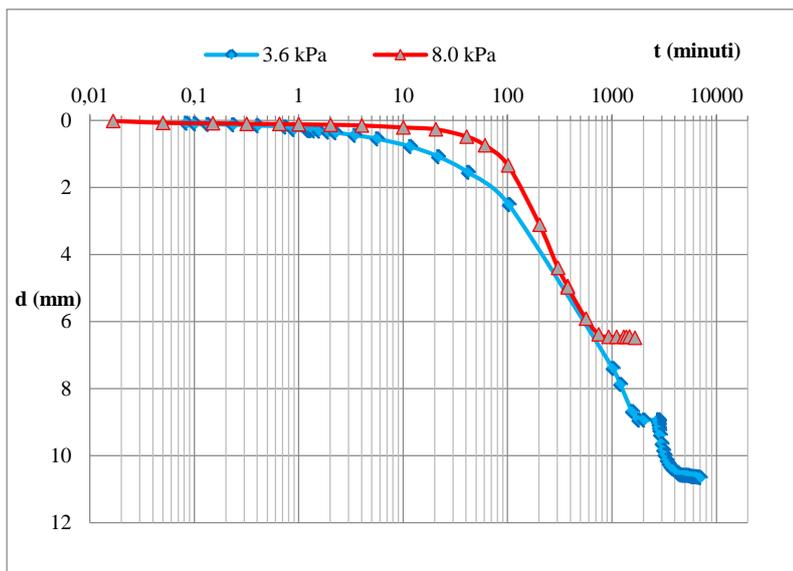
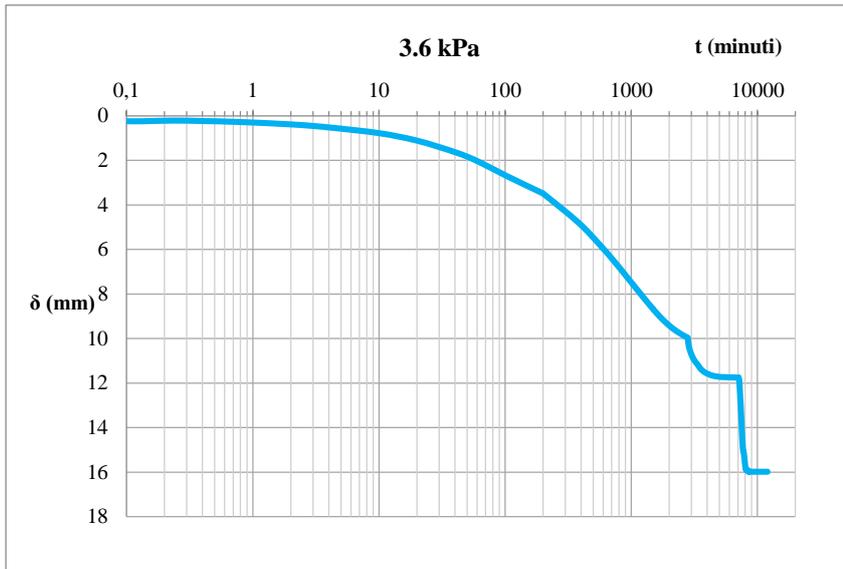


Figura 13: curve dei cedimenti



Figura 14: desaturazione del provino

Nella terza prova, si è deciso di caricare il provino a 3.6 kPa, aspettare la consolidazione secondaria e poi caricare elettricamente, utilizzando però degli step di voltaggio: 5, 11, 15 e 17 V. Con il primo carico, non sono stati registrati ulteriori cedimenti, pertanto si è deciso di passare al secondo carico, dove, dopo qualche minuto sono stati registrati dei cedimenti, fino al raggiungimento del nuovo cedimento secondario, dove si applica un nuovo carico. Con il carico di 15 V sono stati registrati ulteriori cedimenti, ma per un tempo molto breve; è stato applicato, infine un carico di 17 V, ma effettuando le misure di corrente è stato possibile notare come l'intensità di corrente risultava zero in ogni punto, quindi non c'era flusso di corrente, e anche il cedimento risultava costante (figura 15), questo è dovuto all'ossidazione dell'elemento di rame tra la piastra e il terreno. Anche durante questa prova sono state effettuate delle misure di potenziali di corrente, e sono stati ottenuti gli stessi risultati del caso precedente, ovvero andamenti costanti nel tempo, e lineare lungo l'altezza del provino.



*Figura 15: curve dei cedimenti*



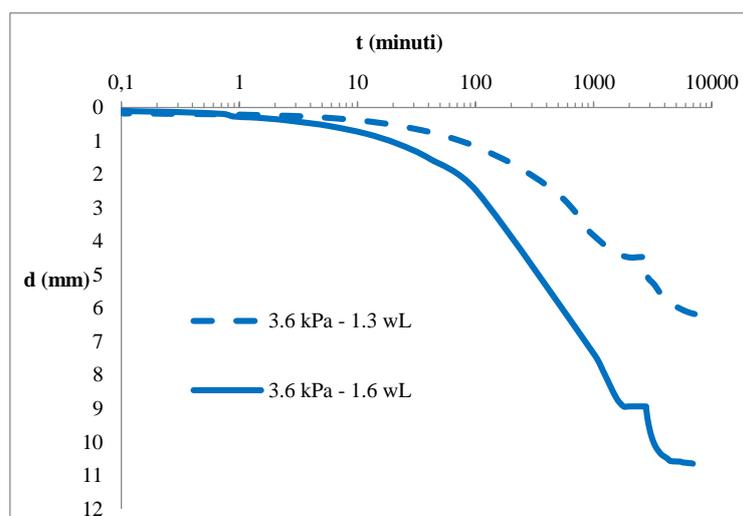
*Figura 16: linguetta di rame ossidata*

#### 4) Elaborazioni e conclusioni.

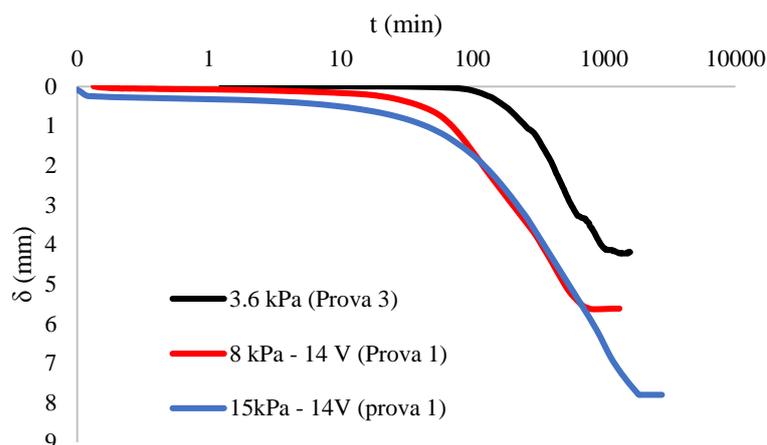
Per concludere sono stati fatti una serie di confronti.

Il diverso contenuto d'acqua influisce sulle proprietà meccaniche del materiale.

Il campione con un contenuto maggiore di acqua (1.6 w<sub>L</sub>) cede di più sia nel caso in cui il carico applicato sia di 3.6 kPa sia di 8 kPa (figura 17).



*Figura 17: confronto tra le curve di consolidazione al variare di w*



**Figura 18: confronto tra le curve di consolidazione elettrocinetica tra la prova 1 e 3**

Si può notare, come gli andamenti sono tra di loro simili, in particolare le curve presentano la stessa pendenza. Quindi la velocità del processo di consolidazione è costante. Solo la curva relativa a 3.6 kPa (prova 3), risulta traslata in avanti, probabilmente dovuto al fatto che viene applicata una differenza di potenziale minore e quindi la consolidazione parte con po' di ritardo.

A causa dei bassi valori di permeabilità non è stato possibile utilizzare i dreni in polimero e sale, in quanto dall'allontanamento del sale si generavano dei pori troppo piccoli e non necessariamente interconnessi, indipendentemente dal tipo di sale utilizzato

Dalla sperimentazione sono stati messi in luce i limiti degli elettrodi metallici come quello in PCL e lamierino di alluminio. A causa delle reazioni che si originano agli elettrodi, infatti, l'alluminio si ossida e il flusso di corrente si interrompe.

Questo non è l'unico problema riscontrato, in quanto bisogna tener conto anche dell'entità del campo elettrico applicato. Improvvise ed elevate densità di corrente applicate e periodi di trattamento lunghi, possono desaturare il provino con conseguente interruzione del flusso di corrente.

Indipendentemente dai problemi che si sono verificati, è stato possibile notare un'accelerazione del processo di consolidazione.