

Politecnico di Torino
Laurea magistrale in INGEGNERIA CIVILE
INDIRIZZO GEOTECNICO



COMPORTAMENTO CHEMO-MECCANICO
DI MINERALI ARGILLOSI

Candidato:
Mattia MINNITI

Relatore:
Prof. Guido MUSSO

ANNO ACCADEMICO 2017/2018

INDICE

CAPITOLO 1	MINERALOGIA DELLE ARGILLE.....	1
1.1	CLASSIFICAZIONI.....	1
1.1.1	GRUPPO TETRAEDRICO.....	2
1.1.2	GRUPPO OTTAEDRICO.....	2
1.1.3	MINERALI DI TIPO 1:1.....	3
1.1.4	MINERALI DI TIPO 2:1.....	5
1.2	TEORIA DEL DOPPIO STRATO DIFFUSO.....	6
1.2.1	INTERAZIONE ACQUA-MINERALI ARGILLOSI.....	8
1.2.2	DISTRIBUZIONE DEGLI IONI.....	9
CAPITOLO 2	INFLUENZA DELLA CONCENTRAZIONE DI ELETTROLITI SUL COMPORTAMENTO MECCANICO DELLE ARGILLE.....	13
2.1	GENERALITA'.....	13
2.2	COMPORTAMENTO DI RESISTENZA AL TAGLIO.....	13
2.2.1	DIPENDENZA DELLA RESISTENZA AL TAGLIO DEL CAOLINO DA TIPO E CONCENTRAZIONE DI SALE.....	14

2.2.2	DIPENDENZA DELLA RESISTENZA AL TAGLIO DELLA BENTONITE DA TIPO E CONCENTRAZIONE DI SALE	15
2.2.3	DIPENDENZA DELLA RESISTENZA AL TAGLIO DELL'ILLITE DA TIPO E CONCENTRAZIONE DI SALE	20
2.2.4	RESISTENZA AL TAGLIO DELL'ARGILLA DI MONASTERO BORMIDA	21
2.2.5	RESISTENZA AL TAGLIO DI MISCELE E CONFRONTI.....	22
2.3	COMPORAMENTO VOLUMETRICO.....	25
2.3.2	COMPORAMENTO VOLUMETRICO DELLA BENTONITE.....	25
2.3.3	COMPORAMENTO VOLUMETRICO DELL'ARGILLA DI MONASTERO BORMIDA.....	29
CAPITOLO 3	DESCRIZIONE DELLE METODOLOGIE DI PROVA.....	31
3.1	DIFFRATTOMETRIA AI RAGGI X.....	31
3.1.1	GENERAZIONE DEI RAGGI X.....	31
3.1.2	IDENTIFICAZIONE DI MINERALI MEDIANTE DIFFRATTOMETRIA AI RAGGI X...33	
3.2	PESO SPECIFICO DEI GRANI G_s	37
3.2.1	APPARECCHIATURA PER LA DETERMINAZIONE DEL PESO SPECIFICO G_s	37
3.2.2	METODO PER PROVINI UMIDI.....	39
3.3	MICROSCOPIA ELETTRONICA A SCANSIONE (SEM).....	41
3.3.1	CENNI TEORICI E FUNZIONAMENTO.....	41
3.3.2	APPLICAZIONE SU MINERALI ARGILLOSI.....	45

Indice

3.3.3	CENNI TEORICI SULLA LIOFILIZZAZIONE.....	46
3.3.4	PROCEDURA DI PROVA.....	48
3.4	LIMITI DI ATTERBERG.....	51
3.4.1	LIMITE LIQUIDO.....	51
3.4.2	LIMITE PLASTICO.....	55
3.5	PROVA DI TAGLIO ANULARE.....	57
3.5.1	DESCRIZIONE DELL'APPARECCHIATURA.....	57
3.5.2	PREPARAZIONE DEI PROVINI.....	59
3.5.3	PROCEDURA DI PROVA.....	60
3.6	PROVA EDOMETRICA.....	65
3.6.1	DESCRIZIONE DELL'APPARECCHIATURA.....	65
3.6.2	PROCEDURA DI PROVA.....	66
3.6.3	ACQUISIZIONE DATI.....	68
3.6.4	ELABORAZIONE DATI.....	69

CAPITOLO 4 COMPORTAMENTO CHEMO-IDRO-MECCANICO DI MISCELE ILLITE-BENTONITE75

4.1	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DI BASE.....	76
4.2	RESISTENZA AL TAGLIO.....	83
4.2.1	RISULTATI PROVE DI TAGLIO ANULARE.....	83
4.2.2	RELAZIONE TRA L'ANGOLO DI ATTRITO RESIDUO E L'INDICE DI PLASTICITA' ..	88

4.3	COMPORAMENTO VOLUMETRICO.....	92
4.3.1	RISULTATI PROVE EDOMETRICHE.....	92
4.3.2	INTERPRETAZIONE CONGIUNTA RELATIVA AL COMPORAMENTO IN CONDIZIONI EDOMETRICHE.....	99
4.3.3	STUDIO DELLA RELAZIONE TRA PERMEABILITA', INDICE DEI VUOTI E COMPOSIZIONE CHIMICA DELL'ACQUA INTERSTZIALE.....	102
4.3.4	INFLUENZA DELLA CONCENTRAZIONE DI NaCl SULLA PERMEABILITA' INTRINSECA DI CAMPIONI NORMALCONSOLIDATI E DI MISCELE ILLITE-BENTONITE.....	107
4.3.5	ESTENSIONE DEL MODELLO DI KOZENY-CARMAN PER LA PERMEABILITA' INTRINSECA.....	112
4.4	OSSERVAZIONI MICROSTRUTTURALI (SEM).....	118
CAPITOLO 5	CONCLUSIONI.....	127
	BIBLIOGRAFIA.....	131
	APPENDICE.....	133
A.1	PESO SPECIFICO Gs.....	133
A.2	LIMITI DI ATTERBERG.....	134
A.2.1	LIMITI LIQUIDI ILLITE.....	134
A.2.2	LIMITI LIQUIDI MISCELA 75% ILLITE 25% BENTONITE.....	136
A.2.3	LIMITI LIQUIDI MISCELA 50% ILLITE 50% BENTONITE.....	137

Indice

A.2.4	LIMITI LIQUIDI MISCELA 25% ILLITE 75% BENTONITE.....	139
A.2.5	LIMITI LIQUIDI BENTONITE.....	141
A.3	PROVE DI TAGLIO ANULARE.....	143
A.3.1	PROVE DI TAGLIO ANULARE ILLITE.....	143
A.3.2	PROVE DI TAGLIO ANULARE MISCELA 75% ILLITE 25% BENTONITE.....	145
A.3.3	PROVE DI TAGLIO ANULARE MISCELA 50% ILLITE 50% BENTONITE.....	147
A.3.4	PROVE DI TAGLIO ANULARE MISCELA 25% ILLITE 75% BENTONITE.....	149
A.3.5	PROVE DI TAGLIO ANULARE BENTONITE.....	151
A.4	PROVE EDOMETRICHE.....	154
A.4.1	PROVE EDOMETRICHE ILLITE.....	154
A.4.2	PROVE EDOMETRICHE MISCELA 75% ILLITE 25% BENTONITE.....	158
A.4.3	PROVE EDOMETRICHE MISCELA 50% ILLITE 50% BENTONITE.....	162
A.4.4	PROVE EDOMETRICHE 25% MISCELA ILLITE 75% BENTONITE.....	166
A.4.5	PROVE EDOMETRICHE BENTONITE.....	170

Indice

CAPITOLO 1

MINERALOGIA DELLE ARGILLE

1.1 CLASSIFICAZIONI

Nella meccanica delle terre, per convenzione, si definiscono argillose le particelle aventi dimensione inferiore a $2\ \mu\text{m}$.

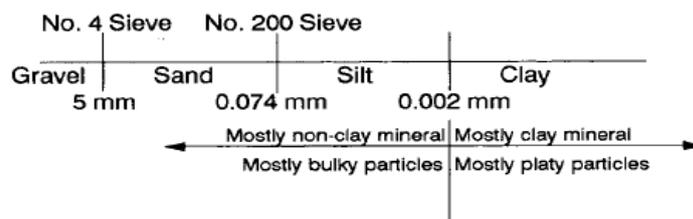


Fig. 1.1 - classificazione delle particelle in funzione della dimensione (Mitchell & Soga, 2005)

La struttura di un terreno è il risultato di un processo di interazione tra le varie particelle e tra queste e l'ambiente circostante. Ogni singola particella è soggetta a forze di massa responsabili delle interazioni di tipo meccanico, e a forze di superficie che danno origine a interazioni di tipo chimico. Per valutare il diverso comportamento di particelle a differente dimensione, si introduce come parametro di riferimento la superficie specifica, definita come il rapporto tra l'area delle particelle e la loro massa. Le particelle di argilla presentano una forma appiattita, poiché composte da silicati idrati di alluminio, disposte in reticoli aventi due dimensioni prevalenti sulla terza. Data la piccola dimensione (lato inferiore ai $2\ \mu\text{m}$), la superficie specifica è molto elevata e le forze di superficie ne condizionano fortemente l'interazione reciproca e con l'ambiente circostante.

I minerali argillosi appartengono alla famiglia dei fillosilicati, i quali contengono un'unità tetraedrica di silice associata a foglietti di ossido di alluminio o magnesio. I minerali argillosi sono caratterizzati

dall'impacchettamento di piani (o meglio ancora di catene) di queste unità composti da due o tre strati uniti assieme. Le differenze mineralogiche tra le diverse argille, dipendono in maggior parte dal tipo e dalla numerosità delle sostituzioni isomorfe, (sostituzioni di atomi di un differente elemento, avente raggio ionico non molto differente), all'interno della struttura cristallina.

Si illustrano nel dettaglio, le differenze tra le due strutture, tetraedrica e ottaedrica.

1.1.1 GRUPPO TETRAEDRICO

Nella maggior parte dei minerali argillosi, i tetraedri di silicio sono interconnessi in una struttura a foglio (piano). Quattro atomi di idrogeno, condividono un unico atomo di silicio, formando una rete esagonale (fig. 1.2) la cui formula chimica bruta risulta essere $(Si_4O_{10})^{4-}$. La struttura si ripete infinite volte, ottenendo la neutralità elettrica che invece non è presente per la singola unità.

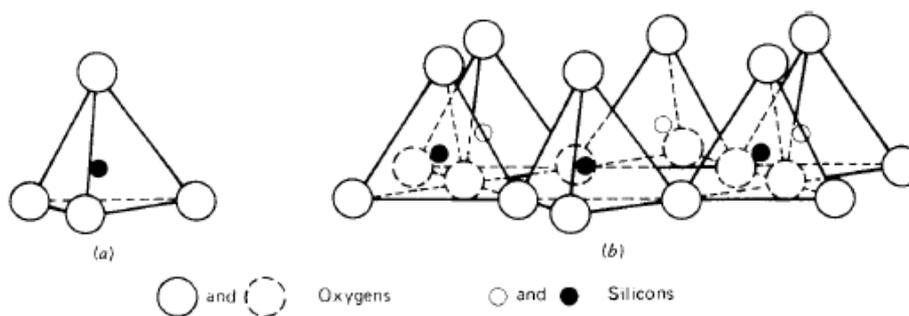


Fig.1.2 - gruppo siliconico tetraedrico e rete esagonale (Mitchell & Soga, 2005)

1.1.2 GRUPPO OTTAEDRICO

L'unità è formata da atomi di magnesio o alluminio interconnessi a atomi di ossigeno o idrossili (fig. 1.3). A volte altri cationi sono presenti all'interno come ferro, manganese, cromo e litio. Nel caso il catione sia trivalente, solo due terzi degli spazi cationici risulterà riempito e la struttura risulterà nel caso dell'alluminio $Al_2(OH)_6$ detta *gibbsite*. Nel caso invece dell'ottaedro di magnesio formerà la *brucite* $Mg_3(OH)_6$. Graficamente i piani tetraedrici vengono rappresentati con dei trapezi mentre quelli ottaedrici con dei rettangoli con eventuali lettere all'interno (es. G sta per gibbsite).

La struttura è globalmente elettricamente neutra, al contrario delle singole unità (come già indicato nel paragrafo 1.1.1).

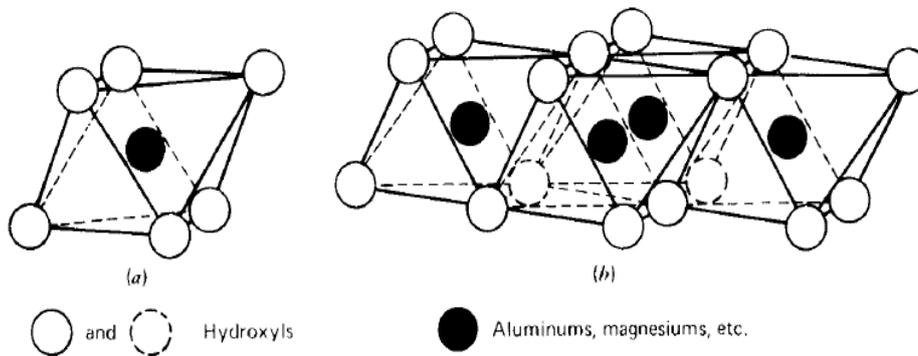


Fig. 1.3 - unità ottaedriche (magnesio o alluminio) e loro struttura (Mitchell & Soga, 2005)

Graficamente i piani d'acqua vengono indicati con dei cerchi ripetuti (OOOOO), ed eventuali singoli atomi sempre con un cerchio avente all'interno una lettera.

Le tipologie di strutture mineralogiche finora descritte sono ideali, nella realtà nei minerali avvengono sostituzioni irregolari, tra i vari piani e anche piani misti. Combinazioni varie tra queste cause formeranno differenti gruppi mineralogici, in particolare si parla di unità *semibasiche* di tipo 1:1 o di tipo 2:1.

1.1.3 MINERALI DI TIPO 1:1

La *caolinite*, uno dei minerali argillosi più comuni in natura, appartiene a questa tipologia. E' composta da un'alternanza tra piani tetraedrici e ottaedrici di gibbsite di spessore 7,2 Å (fig. 1.4). Se al posto della gibbsite, fosse invece presente la brucite si otterrebbe la *serpentinite*. La formula bruta è $(OH)_8Si_4Al_4O_{10}$ e la disposizione molecolare è quella mostrata in fig. 1.5. I legami tra due strati successivi sono sia di tipo van der Waals, sia di tipo idrogeno e risultano abbastanza forti da resistere in presenza d'acqua.

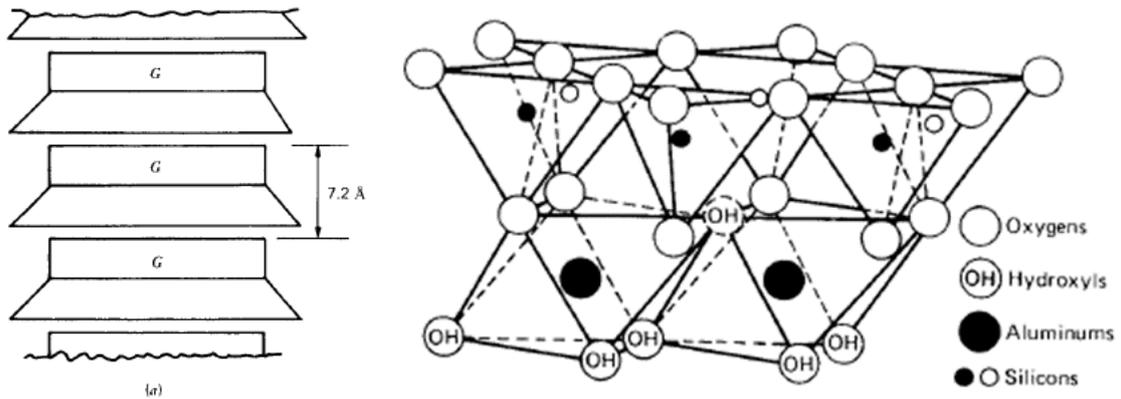


Fig.1.4 - struttura della caolinite (Mitchell & Soga, 2005)

All'interno del gruppo delle caoliniti, si trova l'*allosite* la quale si può presentare in due differenti forme come mostrato in fig. 1.5. Nel primo caso (forma idrata) è presente un piano di molecole d'acqua, mentre nel secondo la struttura è la medesima della caolinite. Altra caratteristica fondamentale è la capacità di scambio di cationi, che risulta essere relativamente bassa, dell'ordine dei 20meq/100g, perciò risulta molto stabile e poco rigonfiante.

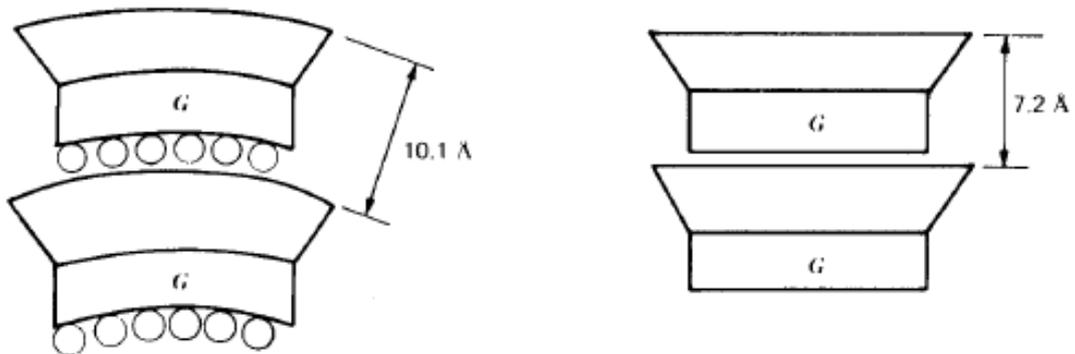


Fig. 1.5 - struttura della allosite (sinistra) e della caolinite (detsra), (Mitchell & Soga, 2005)

1.1.4 MINERALI DI TIPO 2:1

In questa categoria, si ritrova il gruppo delle *smectiti*, la cui struttura consiste in un piano ottaedrico compreso tra due di silice (da cui segue la denominazione) avente uno spessore di 10Å. Al contrario dei minerali di tipo 1:1, i legami tra i piani sono deboli e facilmente separabili mediante l'assorbimento d'acqua. La formula bruta, in assenza di sostituzioni isomorfe risulta essere: $(OH)_4Si_8Al_4O_{20} \cdot nH_2O$ (Fig. 1.6). La struttura risulta essere elettricamente neutra, mentre a causa dell'elevato grado di sostituzioni non bilanciate, la capacità di scambio di cationi è molto elevata, dell'ordine dei 100meq/100g (circa cinque volte maggiore rispetto all'allosite).

La sostituzione dell'alluminio (ad esempio con magnesio), nel piano ottaedrico può portare alla formazione di due sottogruppi: la *montmorillonite* e la *saponite*. Tra le due la prima è di gran lunga più comune e la sua composizione è $(OH)_4Si_8(Al_{3.34}Mg_{0.66})O_{20}$. (Fig1.6). A questa famiglia appartiene, la *bentonite* una delle due argille trattate in questa tesi (nella sua forma sodica). Si presenta come un'argilla a plasticità e limite liquido elevati ed è molto utilizzata in svariati campi della geotecnica e per la depurazione dell'acque industriali. La sua presenza nei giunti tra le rocce può portare problemi di stabilità durante le costruzioni di scavi sotterranei.

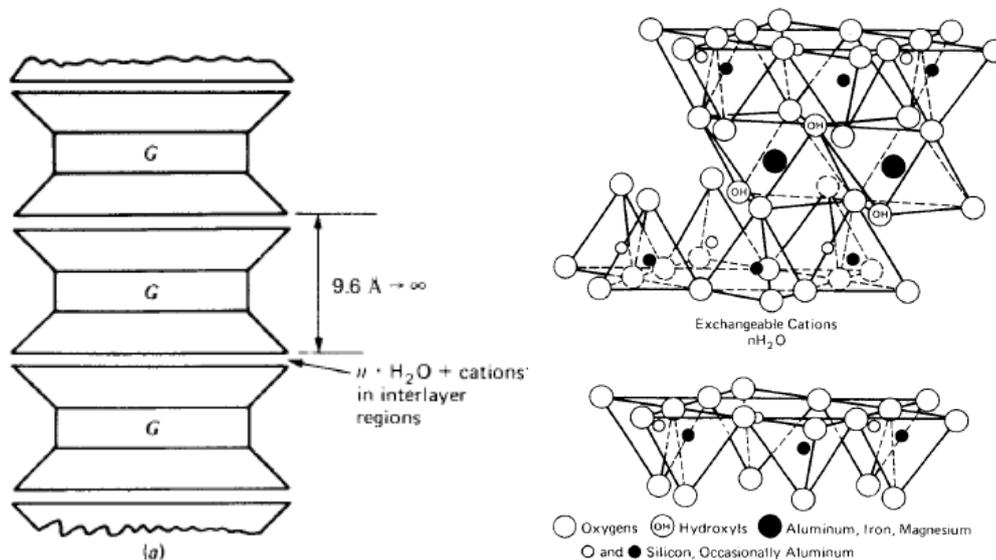


Fig. 1.6 - struttura della montmorillonite (Mitchell & Soga, 2005)

Tra le argille più comuni, incontrate nella pratica ingegneristica, si trova anche l'*illite*, che nella sua forma sodica, è il secondo materiale testato in questa tesi. Possiede una struttura simile alla

montmorillonite, con la particolarità, che esiste una parziale sostituzione del silicio all'interno dello strato tetraedrico e i vari pacchetti sono legati da atomi di potassio, posizionati al centro delle maglie esagonali. La cella risulta elettricamente neutra e la formula bruta è $(OH)_4K_2(Si_6Al_2)Al_4O_{20}$. Appartiene al gruppo della mica ed è molto simile alla muscovite ed alla vermiculite, di cui non ci occuperemo.

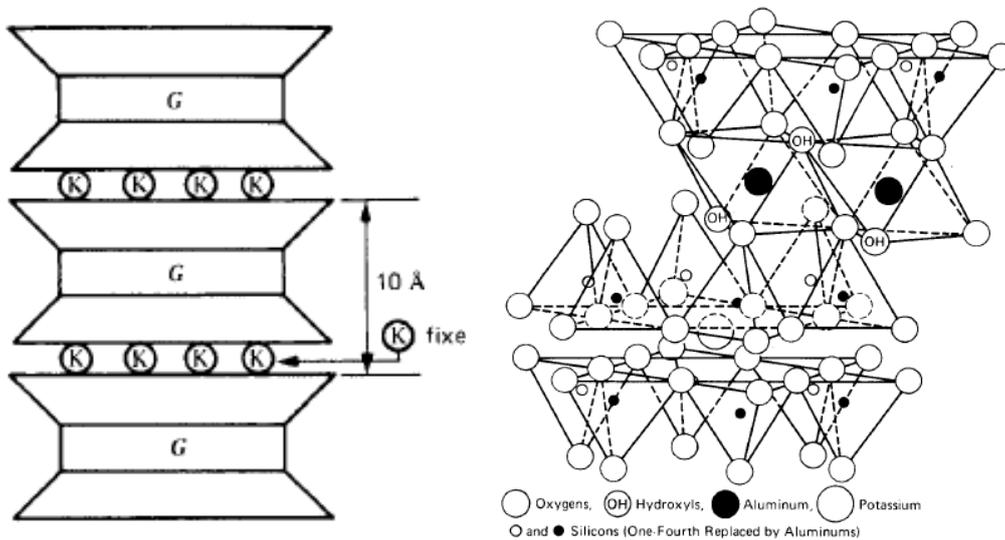


Fig. 1.7 - struttura dell'illite (Mitchell & Soga, 2005)

1.2 TEORIA DEL DOPPIO STRATO DIFFUSO

In questo paragrafo si tratterà, l'interazione dell'acqua interstiziale con le particelle di argilla.

La meccanica delle terre classica, si fonda sul principio degli sforzi efficaci e postula che i cambi di volume e la resistenza dipendono solo dalla struttura solida e l'acqua rimane neutrale. In realtà questa è una semplificazione poiché dal punto di vista chimico, entrambe le fasi non sono affatto inerti, le molecole d'acqua sono fortemente attratte e adsorbite dalle superfici argillose. In generale infatti, per separare il materiale argilloso dall'acqua servono temperature al di sopra dei 100°C (evaporazione). Diverse forze inter-particellari producono la flocculazione e la deflocculazione dell'argilla in sospensione.

La molecola d'acqua H_2O si presenta a forma di V con l'ossigeno al vertice e i due idrogeni ai lati. Unendo tra loro più molecole si ottiene una configurazione a tetraedro con due angoli positivi collocati sotto e sopra al piano che unisce i nuclei (Fig. 1.8). Da considerazioni energetiche, si ricava

che il legame ossigeno-idrogeno sia circa per il 40% di tipo ionico e per il 60% covalente, per cui risulta direzionale e ci dimostra perché la molecola d'acqua sia un dipolo permanente.

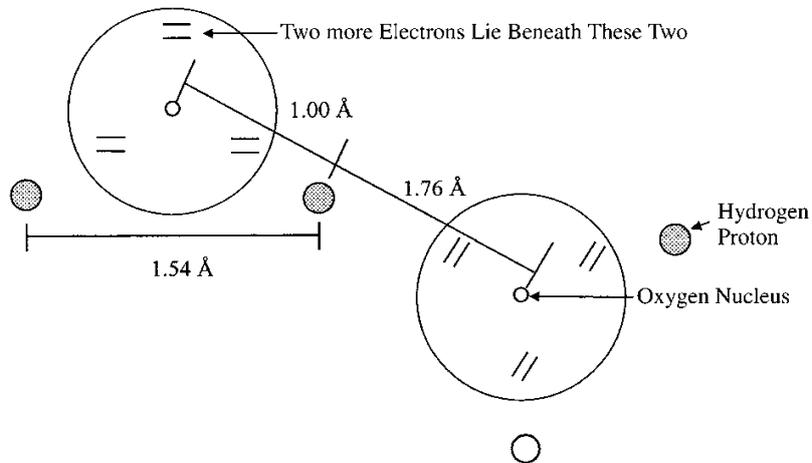


Fig. 1.8 - schematizzazione della molecola d'acqua (Mitchell & Soga, 2005)

La presenza di ioni dissolti nell'acqua porta al seguente schema: (Fig. 1.9)

- Zona di immobilizzazione: le molecole d'acqua sono fortemente orientate verso l'interno ed hanno una bassa energia cinetica
- Zona di disgregazione e perdita dell'orientamento
- Zona con acqua con normale struttura

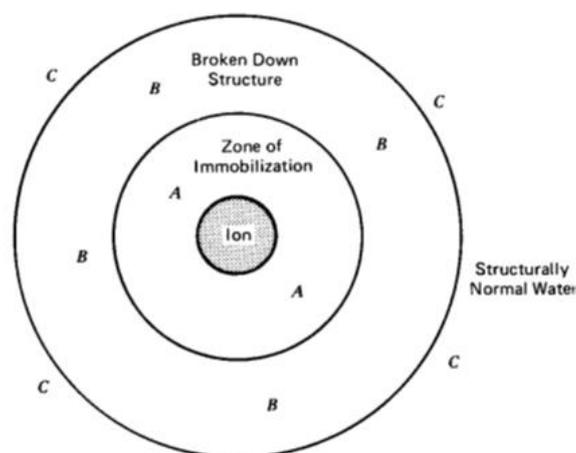


Fig. 1.9 - interazione ione-acqua (Mitchell & Soga, 2005)

1.2.1 INTERAZIONE ACQUA-MINERALI ARGILLOSI

Esistono 4 differenti meccanismi di adsorbimento dell'acqua, da parte della superficie della particella argillosa (fig. 1.10).

- Legame idrogeno: la superficie dei minerali argillosi è composta da ioni ossigeno (O^{2-}) e gruppi ossidrilici (OH), per cui questi legami si formano facilmente con gli ossigeni che attraggono gli angoli carichi positivamente e gli idrossili quelli negativamente, della molecola d'acqua. La formazione di legami idrogeno con la superficie particellare, altera la distribuzione elettronica precedente. La direzionalità del legame porterà ad una riduzione della rigidità meccanica ed alla riduzione della distanza dalla superficie.
- Idratazione ionica: avviene perché i cationi idratati sono attratti dalle cariche negative della superficie argillosa
- Attrazione per osmosi: la concentrazione cationica, cresce tanto più quanto la carica superficiale è maggiormente negativa, le molecole d'acqua tenderanno a diffondersi sulla superficie per pareggiare il potenziale elettrochimico tra liquido interstiziale e liquido in prossimità della particella.
- Attrazione dipolare: le particelle di argilla vengono considerate come delle facce a carica negativa. I dipoli d'acqua si dispongono con i poli positivi rivolti verso la superficie, con un angolo che diminuisce all'aumentare della distanza da essa. A metà strada tra le due facce c'è disordine poiché i dipoli tendono a disporsi disordinatamente.

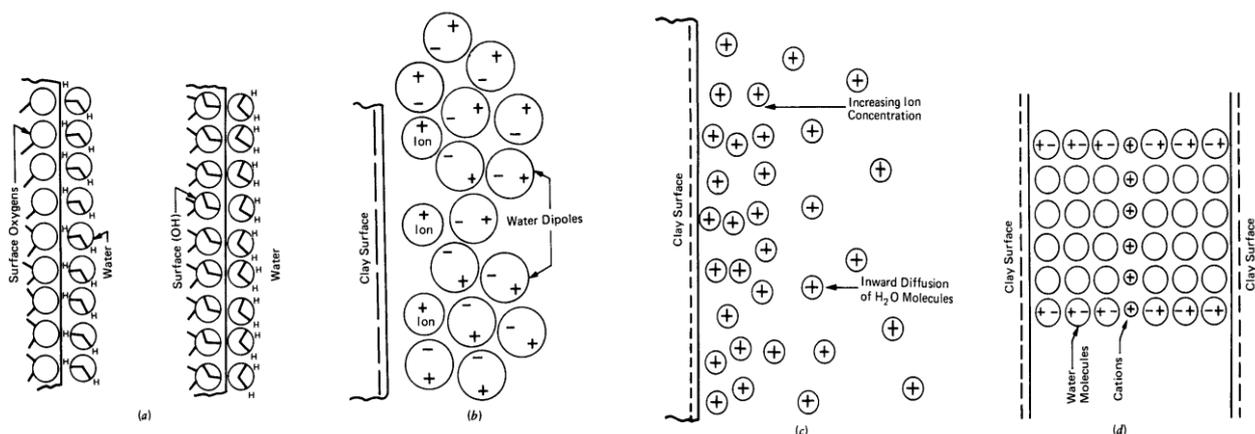


Fig. 1.10 - meccanismi di adsorbimento dell'acqua da parte della superficie argillosa (Mitchell & Soga, 2005)

1.2.2 DISTRIBUZIONE DEGLI IONI

Le molecole d'acqua in prossimità delle particelle, sono sottoposte a legami molto forti e fortemente direzionali, da cui segue che non è possibile separarle da esse tramite azione meccanica, e viene definita come adsorbita. L'insieme dello strato elettrico negativo della superficie della particella e dello strato elettrico positivo dell'acqua adsorbita con i cationi in essa disciolti, viene definito *doppio strato elettrico*. Allontanandosi dalle particelle, l'acqua risentirà sempre meno di questi legami elettrostatici, fino a riacquistare le caratteristiche di acqua libera. La risultante delle azioni che si scambiano due particelle dipende dalla loro mutua distanza e dall'ambiente chimico nel quale sono immerse (Fig. 1.11). L'elemento fondamentale di questa teoria risiede nel fatto che, se la distanza interparticellare è maggiore di due volte lo spessore del doppio strato, non c'è interazione tra le particelle; al contrario, se la distanza diminuisce, tra esse si esercita un'azione repulsiva dovuta al potenziale elettrico nei doppi strati (le due particelle inizieranno a respingersi quando i loro doppi strati interagiscono). Tale azione repulsiva diminuisce al crescere della concentrazione elettrolitica, giacché questa riduce lo spessore del doppio strato. D'altra parte, il moto degli elettroni attorno ai nuclei da origine alle forze di attrazione di Van der Waals (essenzialmente indipendenti dalle caratteristiche del fluido interstiziale): ne consegue in definitiva che l'azione risultante tra due particelle può avere segno diverso, a seconda della distanza e della concentrazione elettrolitica.

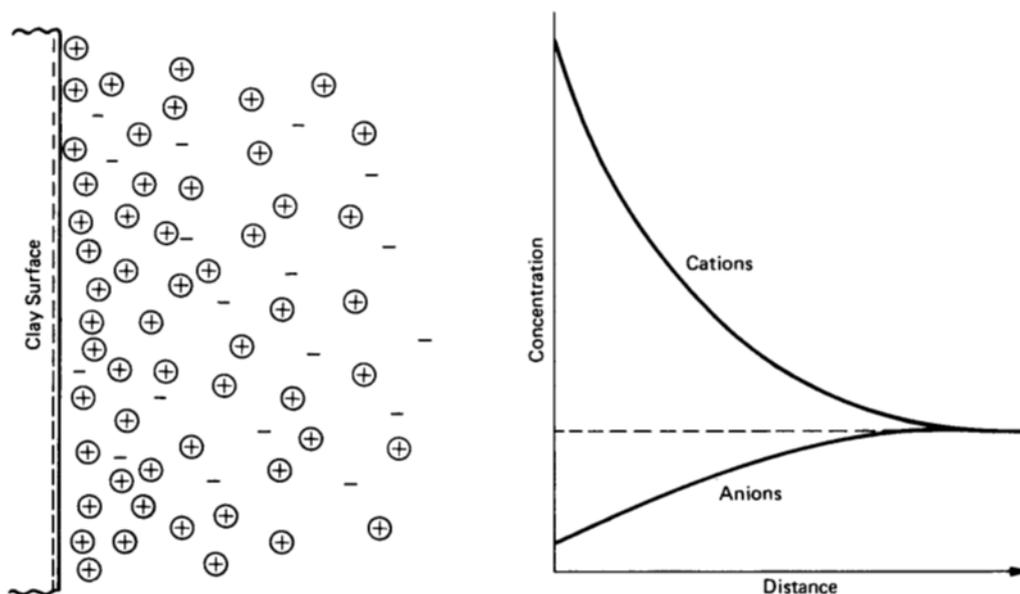


Fig. 1.11 - distribuzione degli ioni adiacenti alla superficie argillosa (Mitchell & Soga, 2005)

La natura degli ioni scambiabili ha notevole influenza sul comportamento del doppio strato. Ad esempio, l'aggiunta di cloruro di calcio al sistema terreno-acqua determina la sostituzione del sodio col calcio; poiché lo ione calcio ha valenza 2 e quello del sodio ha valenza 1, tale cambio comporta la riduzione dello spessore del doppio strato, con conseguente variazione delle proprietà del terreno. Le due configurazioni strutturali estreme di un terreno sono la struttura flocculata e quella dispersa. Se la risultante delle forze di attrazione e di repulsione tra due particelle di argilla comporta attrazione, esse tendono a muoversi l'una verso l'altra e si uniscono, cioè flocculano; se la risultante comporta al contrario repulsione, le particelle tendono ad allontanarsi e si ha dispersione. Nella struttura flocculata le particelle sono disposte spigolo contro faccia, mentre nella struttura dispersa le particelle sono parallele. Tra le due configurazioni estreme esistono un numero infinito di stati intermedi. Poiché la componente repulsiva dipende fortemente dalle caratteristiche del sistema mentre la componente attrattiva non ne è influenzata in misura apprezzabile, la tendenza verso la flocculazione o la dispersione può essere causata da variazioni nelle caratteristiche del sistema, che modificheranno lo spessore del doppio strato (ad esempio deposito di origine marina successivamente soggetto a un flusso di acqua dolce). Il comportamento di un terreno dipende moltissimo dalla sua struttura prima dell'applicazione dei carichi. Una struttura flocculata presenta in genere resistenza più alta, compressibilità più bassa e permeabilità più alta dello stesso terreno con pari indice dei vuoti ma con struttura dispersa (Fig. 1.12).

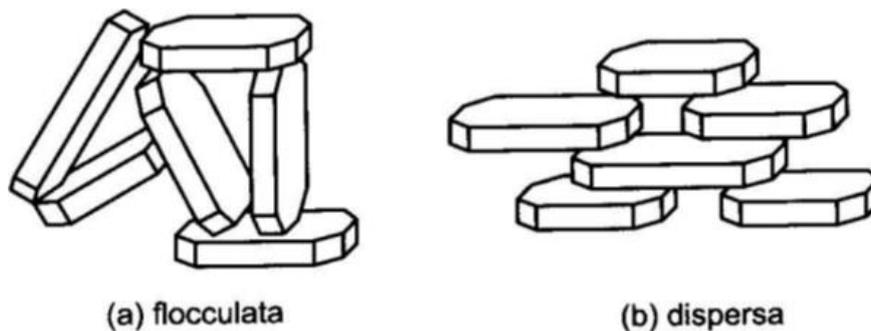


Fig.1.12 - Struttura delle argille (Lancellotta,2004)

La teoria del doppio strato diffuso spiega qualitativamente le variazioni di volume indotte dall'esposizione agli elettroliti. Lo spessore del doppio strato diminuisce nei seguenti casi:

Capitolo 1

- a) Maggiore concentrazione di ioni nel fluido interstiziale,
- b) Al diminuire del raggio degli ioni idratati,
- c) All'aumentare della valenza dei cationi ($\text{Ca}^{2+} > \text{K}^+ > \text{Na}^+$),
- d) Cationi a maggiore polarizzabilità ($\text{K}^+ > \text{Na}^+$)

Ne segue considerando la bentonite (montmorillonite), essendo il raggio dello ione K^+ idratato è più piccolo di quello di Na^+ idratato, lo spessore del doppio strato della K-montmorillonite è anche più piccolo di quello della Na-montmorillonite.

CAPITOLO 2

INFLUENZA DELLA CONCENTRAZIONE DI ELETTROLITI SUL COMPORTAMENTO MECCANICO DELLE ARGILLE

2.1 GENERALITA'

Questo capitolo raccoglie alcune esperienze di letteratura, sull'influenza della concentrazione e del tipo di elettroliti, sul comportamento meccanico di minerali argillosi. Si fa riferimento a studi passati, in cui vennero testati numerosi minerali argillosi, ma ci limiteremo a trattarne solo alcuni. L'analisi riguarda seguenti minerali: caolinite, montmorillonite (bentonite), illite e loro miscele, con l'aggiunta di cenni su altri materiali.

I parametri volumetrici sono stimati mediante prove edometriche, mentre la resistenza al taglio è valutata mediante differenti tipologie di prova: taglio diretto, taglio anulare e triassiali.

Per studiare la risposta meccanica di minerali argillosi esposti a diversi elettroliti (Na^+ , K^+ , Ca^{2+}) i campioni sono stati sottoposti a dei cicli di omoionizzazione, ovvero immersi ripetutamente in soluzioni saline di cloruri (NaCl , KCl , CaCl_2) ed in seguito risciacquate e stabilizzate.

2.2 COMPORTAMENTO DI RESISTENZA AL TAGLIO

La resistenza al taglio residua risulta essere uno tra i parametri più importanti nella definizione del comportamento meccanico dei terreni.

Una stima errata di questo valore, in particolar modo se sovrastimato, può causare notevoli errori in importanti applicazioni geotecniche (ad esempio nel calcolo della capacità portante). Per tale motivo è opportuno che la resistenza al taglio venga eseguita con particolare attenzione.

2.2.1 DIPENDENZA DELLA RESISTENZA AL TAGLIO DEL CAOLINO DA TIPO E CONCENTRAZIONE DI SALE

Nel presente paragrafo si fa riferimento a studi di Olson (1974) e di Muller-Vonmoos & Loken (1989).

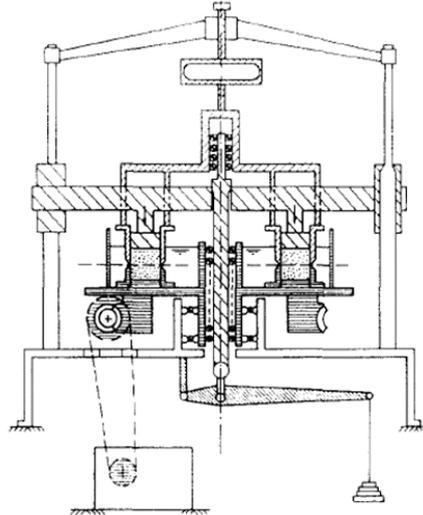


Fig.2.1 - Apparecchiatura di taglio anulare (GENOR), (Muller-Vonmoos & Loken, 1989)

Catione	φ_r	Attrezzatura di prova	Autori
Na ⁺	23°	TRIASSIALE	MULLER-VONMOOS & LOKEN (1989)
Ca ²⁺	23°		
Na ⁺	25°	TAGLIO ANULARE	
Ca ²⁺	25°		
Na ⁺	25°	TRIASSIALE	OLSON (1974)
Ca ²⁺	25°		

Tab 2.1 - angoli di resistenza al taglio residui del caolino, secondo vari autori

Si evince che la resistenza al taglio residua non dipenda dalla tipologia di elettroliti presenti. L'angolo di resistenza al taglio si attesta sempre attorno ad un valore di 23°-25° (Tab. 2.1) sia nelle prove triassiali, sia in quelle di taglio anulare. I valori di picco risultano di 1-2 gradi superiori, da cui segue un involuppo di rottura piuttosto piatto. Si assume infine che il comportamento a taglio della caolinite, dipenda principalmente dalla forma e grandezza delle particelle, e di conseguenza del loro impacchettamento. Le forze di tipo fisico-meccanico risultano prevalenti su quelle chimiche, con uno scarso contributo delle forze di repulsione dovute al doppio strato diffuso.

2.2.2 DIPENDENZA DELLA RESISTENZA AL TAGLIO DELLA BENTONITE DA TIPO E CONCENTRAZIONE DI SALE

Si riportano alcuni dati di prove di caratterizzazione, quali limiti di Atterberg ed analisi SEM, utili per meglio comprendere il comportamento di alcune tipologie di bentonite, che risulta essere un materiale molto sensibile alle differenti condizioni elettrolitiche.

Limiti di Atterberg

Per prima cosa si analizzano i valori dei limiti di Atterberg della bentonite del Wyoming, secondo lo studio di Mesri & Olson (1970).

catione	N	0.001		0.01		0.1		1		G _s [g/cm ³]	S _s [m/g]
	pH	W _L [%]	W _p [%]								
Ca ²⁺	5	220	33	200	33	193	31	189	32	2,8	680
	9	207	35	205	35	207	35	201	34		
Na ⁺	7	1140	-	960	-	880	-	-	-	2,65	500

(N: normalità, W_L: limite liquido, W_p: limite plastico, G_s: peso specifico, S_s: superficie specifica)

Tab. 2.2 – Proprietà indice della bentonite del Wyoming e loro dipendenza dalla composizione del liquido interstiziale (Mesri & Olson, 1970)

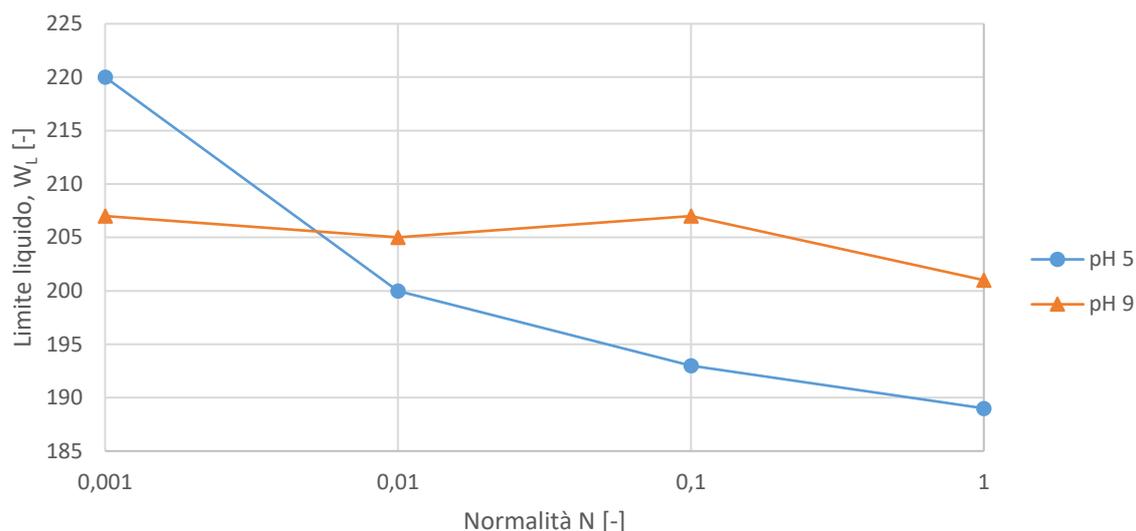


Fig. 2.2 – Limiti liquidi bentonite del Wyoming in forma calcica (Mesri & Olson, 1970)

La bentonite del Wyoming in forma sodica presenta un limite liquido oltre il valore 1000 in acqua distillata, per poi diminuire all'aumentare della normalità. Nella forma calcica il valore decresce ma con differenze poco apprezzabili (fig. 2.2).

Similarmente, Di Maio (1996) eseguì una valutazione della dipendenza del limite liquido dalla molarità, per la bentonite di Ponza (composta principalmente da montmorillonite sodica), utilizzando tre soluzioni saline differenti (cloruro di sodio, di calcio e di potassio) variandone la concentrazione molare. (Fig. 2.3)

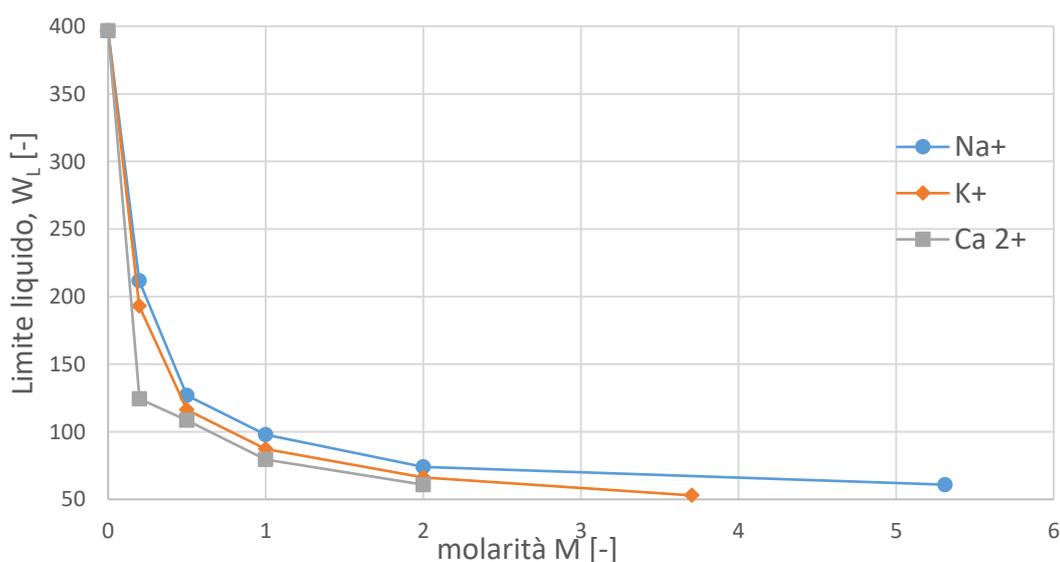


Fig.2.3 - limiti liquidi bentonite di Ponza, in funzione della molarità, per le tre soluzioni saline (Di Maio, 1996)

La bentonite di Ponza in acqua distillata, presenta un elevato limite liquido (circa 400) quando sottoposta all'acqua distillata per poi decrescere molto velocemente se sottoposta ad una qualsiasi delle tre soluzioni saline (anche per bassi valori di molarità). Superato il valore di molarità circa pari a 2, l'andamento della curva tende ad appiattirsi, stabilizzandosi attorno al valore 80 di limite liquido.

ANALISI AL MICROSCOPIO DI TIPO SEM

Con riferimento allo studio di Di Maio (1996), si riportano delle analisi al microscopio a scansione SEM (rif. Cap.3). Dagli ingrandimenti ottenuti, si può notare come la particella di bentonite sottoposta ad acqua distillata tenda a disporsi "a foglietti" (Fig. 2.4)

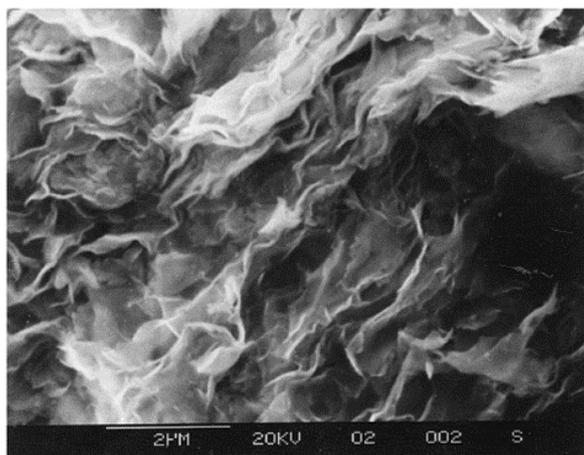


Fig.2.4 – analisi SEM, bentonite di Ponza saturata con acqua distillata (Di Maio, 1996)



Fig.2.5 – analisi SEM, bentonite di Ponza saturata con soluzioni di NaCl (a sinistra) e KCl (a destra) e poi sottoposta ad acqua distillata. (Di Maio, 1996)

Il comportamento nel caso in cui sia sottoposta a soluzioni saline ed in seguito risciacquata con acqua distillata, risulta differente a seconda del tipo di soluzione utilizzato. Nel caso del cloruro di potassio KCl (Fig. 2.5 b) si nota come varia la disposizione particellare, al contrario nel caso della bentonite sottoposta a cloruro di sodio (Fig. 2.5 a) non si apprezzano particolari differenze rispetto al campione in acqua distillata.

Seguendo le ipotesi del doppio strato diffuso al diminuire del raggio dello ione idratato, diminuisce lo spessore. Poiché il raggio dello ione potassio K^+ è più piccolo dell'omologo di sodio Na^+ , allora il doppio strato della K-montmorillonite risulterà più piccolo rispetto alla sodica.

Resistenza al taglio

In analogia al paragrafo 2.2.1, in accordo con gli studi eseguiti da Olson (1974) e Muller-Vonmoos & Loken (1989), è possibile stimare l'angolo di resistenza al taglio residuo al variare delle condizioni elettrolitiche.

Catione	φ_r	Attrezzatura di prova	Autori	
Na^+	4°	TRIASSIALE	MULLER-VONMOOS & LOKEN (1989)	
Ca^{2+}	10°-15°			
Na^+	4°	TAGLIO DIRETTO		
Ca^{2+}	9,7°			
Na^+	4°	TAGLIO ANULARE		
Ca^{2+}	7,5°			
Th^+	14°			
Al^+	12°			
Na^+	4°	TRIASSIALE		OLSON (1974)
Ca^{2+}	10°			

Tab 2.2 - angoli di resistenza al taglio residui di alcune bentoniti, secondo vari autori

Tutte le bentoniti analizzate presentano nella forma sodica (Na^+) un angolo di resistenza al taglio residuo molto basso e pari a 4° , indipendentemente dalla tipologia di prova adottata. Al contrario la bentonite in forma calcica (Ca^{2+}) presenta un angolo di resistenza al taglio mediamente pari ad almeno il doppio (circa 10°). Sempre nel caso calcico, i può notare come sia il tipo di bentonite, sia la tipologia di prova influiscano sulla stima dell'angolo di resistenza. I dati relativi a prove con altri tipi di elettroliti quali il torio e l'alluminio, supportano il fatto che la bentonite sia un materiale fortemente dipendente dal tipo di elettrolita presente e dalla sua concentrazione.

Variazioni in base alla molarità della soluzione salina

L'esecuzione di prove di taglio diretto sulla bentonite di Ponza (composta principalmente da bentonite sodica) al variare della concentrazione molare di cloruro di sodio NaCl. Si ha un incremento della tensione tangenziale e di conseguenza dell'angolo di resistenza al taglio residuo, che presenta un valore di circa 6° in acqua distillata, fino ad un massimo di circa 15° a saturazione. Tale risultato, conferma inoltre l'ipotesi che lo spessore del doppio strato risulta variabile a seconda della molarità della soluzione utilizzata, in particolare l'aumento del 150% dell'angolo di resistenza, conferma come la bentonite risulti molto sensibile alla concentrazione.

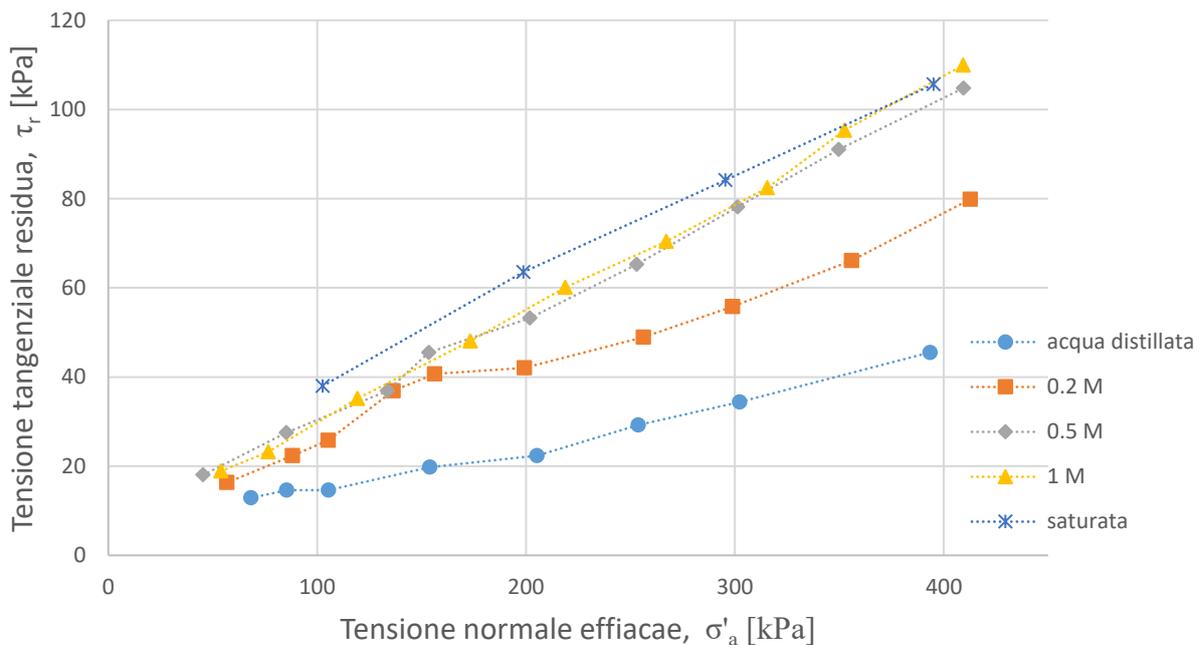


Fig.2.6 – inviluppi di rottura della bentonite di Ponza al variare della molarità di NaCl (Di Maio, 1996)

In fig. 2.6, si può apprezzare l'aumento della resistenza al taglio in funzione della molarità, ma cosa molto più interessante l'andamento delle curve. La prova in acqua mostra un andamento curvilineo per bassi valori di carico per poi linearizzarsi, al contrario le curve in presenza di cloruri presentano un andamento rettilineo più marcato.

2.2.3 DIPENDENZA DELLA RESISTENZA AL TAGLIO DELL'ILLITE DA TIPO E CONCENTRAZIONE DI SALE

Secondo gli studi eseguiti da Olson (1974) e Muller-Vonmoos & Loken (1989), (i medesimi del paragrafo 2.2.1), si può ben valutare l'influenza della concentrazione elettrolitica sulla resistenza al taglio dell'illite. I risultati sono riassunti nella tabella 2.3.

Catione	φ_r	Attrezzatura di prova	Autori	
Na ⁺	16°-21°	TRIASSIALE	MULLER-VONMOOS & LOKEN (1989)	
Ca ²⁺	23°-26°			
Na ⁺	23,8°-25,2°	TAGLIO DIRETTO		
Ca ²⁺	16,2°-23,3°			
K ⁺	21,3°-24,7°			
Na ⁺	13,5°	TAGLIO ANULARE		
Ca ²⁺	24°			
Na ⁺	16°-21°	TRIASSIALE		OLSON (1974)
Ca ²⁺	23°			
K ⁺	23°			

Tab. 2.3 - angoli di resistenza al taglio residua dell'illite, secondo vari autori

I due valori di angolo di resistenza al taglio corrispondono a due diverse concentrazioni degli elettroliti presenti, con ordinamento crescente. Si nota come al crescere della concentrazione cresca anche l'angolo di resistenza al taglio residuo indipendentemente dalla tipologia di prova o dal tipo di elettrolita.

Al contrario del caolino, l'illite risulta essere maggiormente suscettibile all'elettrolita presente nei pori interstiziali ed alla sua differente concentrazione. L'illite calcica (Ca^{2+}) presenta un valore di resistenza residua pressochè costante e pari a 24° , mentre nel caso sodico (Na^+) il risultato risulta essere molto sensibile alla tipologia di prova adottata. L'illite sottoposta a ioni potassio (K^+), ha un andamento intermedio sia come valori, sia come suscettibilità.

2.2.4 RESISTENZA AL TAGLIO DELL'ARGILLA DI MONASTERO BORMIDA

Per quanto riguarda l'argomento delle soluzioni saline, è interessante citare uno studio di Musso, Chighini e Romero (2008), riguardante l'argilla di Monastero Bormida (AT). Su tale argilla sono state eseguite delle prove di laboratorio, allo scopo di simulare i processi idrologici e chimici, che possono accadere in situ. L'argomento principale riguarda il contenuto di calcite ed i suoi effetti dopo eventuali decalcificazioni, per tale motivo si riportano solo i dati ritenuti più inerenti, allo studio presente in questa tesi.

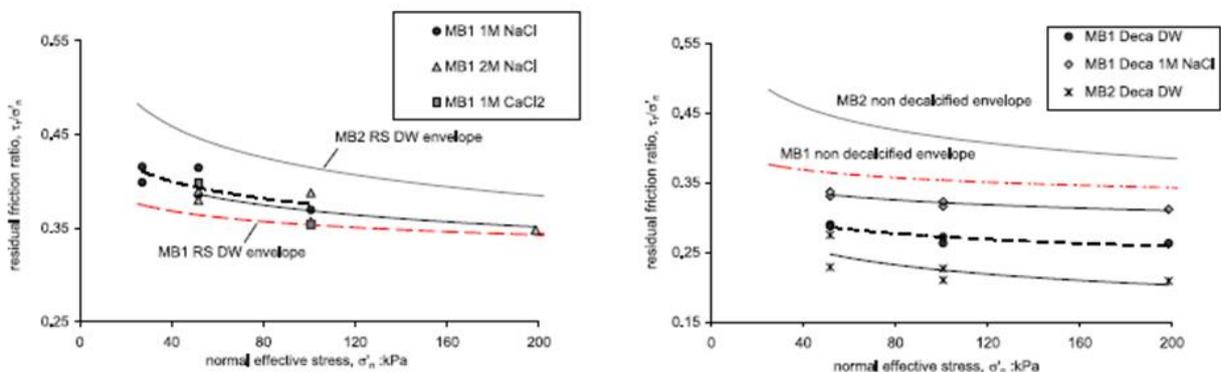


Fig.2.7 - influenza della soluzione salina sul rapporto τ/σ' (Musso et al., 2008)

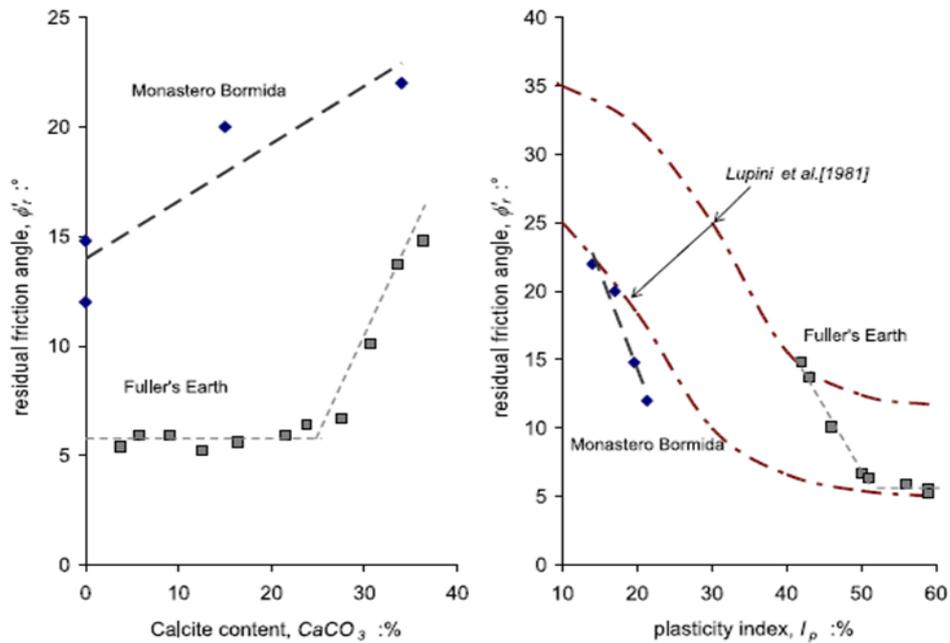


Fig.2.8 - angolo di resistenza al taglio residuo in funzione del contenuto di calcite e dell'indice di plasticità (Musso et al., 2008)

Sul grafico τ/σ' in fig. 2.7, si può notare come i vari trattamenti subiti dall'argilla (sottoposta a soluzioni saline e decalcificata) porti ad ottenere delle rette parallele. In fig. 2.8 si evince come la decalcificazione, porti ad un netto decremento della resistenza al taglio ed un aumento dell'indice di plasticità

2.2.5 RESISTENZA AL TAGLIO DI MISCELE E CONFRONTI

Riferendoci ad una parte di studio eseguito da Di Maio & Fenelli (1994) riguardante delle prove di taglio diretto, si studia il comportamento della caolinite, della bentonite e loro miscele in percentuale. Inizialmente testate con la sola acqua distillata ed in seguito saturate con soluzioni di cloruro di sodio (NaCl) a differente concentrazione molare.

I minerali indicati non presentandosi in forma pura sono stati preliminarmente sottoposti ad una diffrattometrica ai raggi X con la quale, si è determinata l'esatta mineralogia dei due materiali. La bentonite è risultata composta da circa il 90% di montmorillonite sodica, mentre la caolinite è risultata pura all'80%. I campioni sono stati consolidati prima di inserirli nella scatola di Casagrande, per eseguire la prova di taglio diretto ed ottenere l'angolo di resistenza al taglio residuo. Per la prova di durata circa un giorno per ogni ciclo, si è impostata una velocità di 0.005 mm/min.

Sono state eseguite numerose prove di taglio con differenti percentuali di caolinite-bentonite proporzionate secondo il peso secco, Fig. 2.9

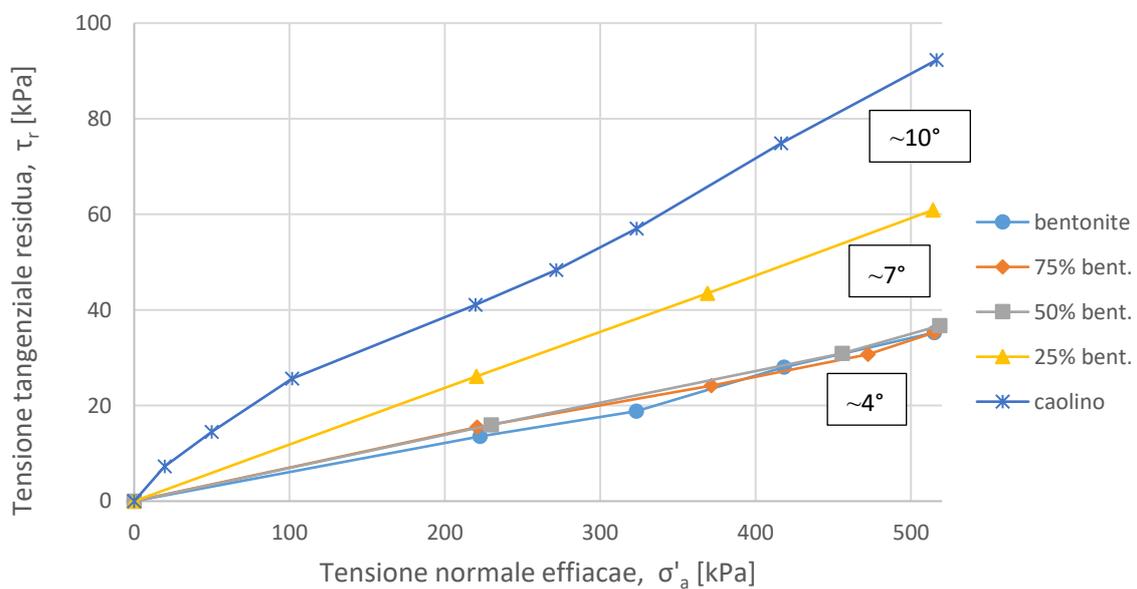


Fig.2.9 – involucri di rottura e relativi angoli di resistenza al taglio residui, per diverse miscele di bentonite-caolinite in acqua distillata (Di Maio & Fenelli, 1994)

Si può notare come il caolino, presenti un angolo di resistenza al taglio residua di 10°, pari a più del doppio di quello della bentonite (circa 4°) e un andamento non lineare per bassi valori del carico verticale.

La seconda parte delle prove, riguarda invece l'esposizione dei campioni a soluzioni a concentrazione variabile di cloruro di sodio, Fig. 2.10

Comportamento chemo-idro-meccanico di miscele illite-bentonite

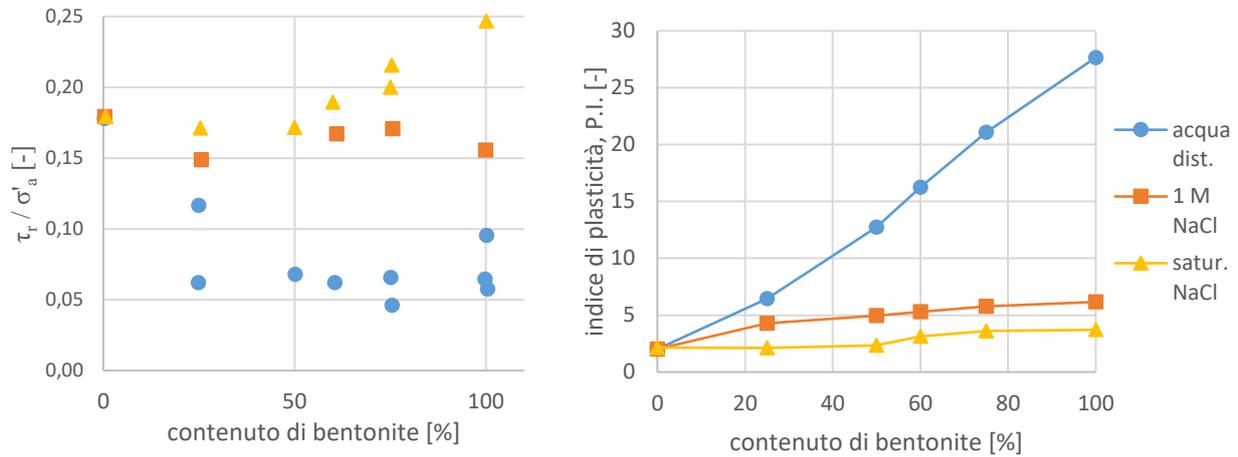


Fig.2.10 - diagrammi τ/σ ed indice di plasticità in funzione del contenuto di bentonite, al variare della concentrazione molare di NaCl (Di Maio & Fenelli, 1994)

All'aumentare della concentrazione salina, cresce il valore della tensione tangenziale e di conseguenza aumenta l'angolo di resistenza. La prova in acqua distillata presenta inoltre un elevato indice di plasticità (proporzionale al suo limite liquido) e globalmente un comportamento piuttosto differente, che giustifica la sua elevata suscettibilità all'acqua ed ai cambi di soluzione.

Con riferimento agli studi di Olson (1974), in fig. 2.11 si confrontano gli involucri di rottura ottenuti mediante prove triassiali, dei minerali argillosi precedentemente descritti.

I valori dell'angolo di resistenza al taglio variano da un minimo di circa 5° per la bentonite, fino ad un massimo di circa 30° per il quarzo, l'illite presenta un valore intermedio tra i due.

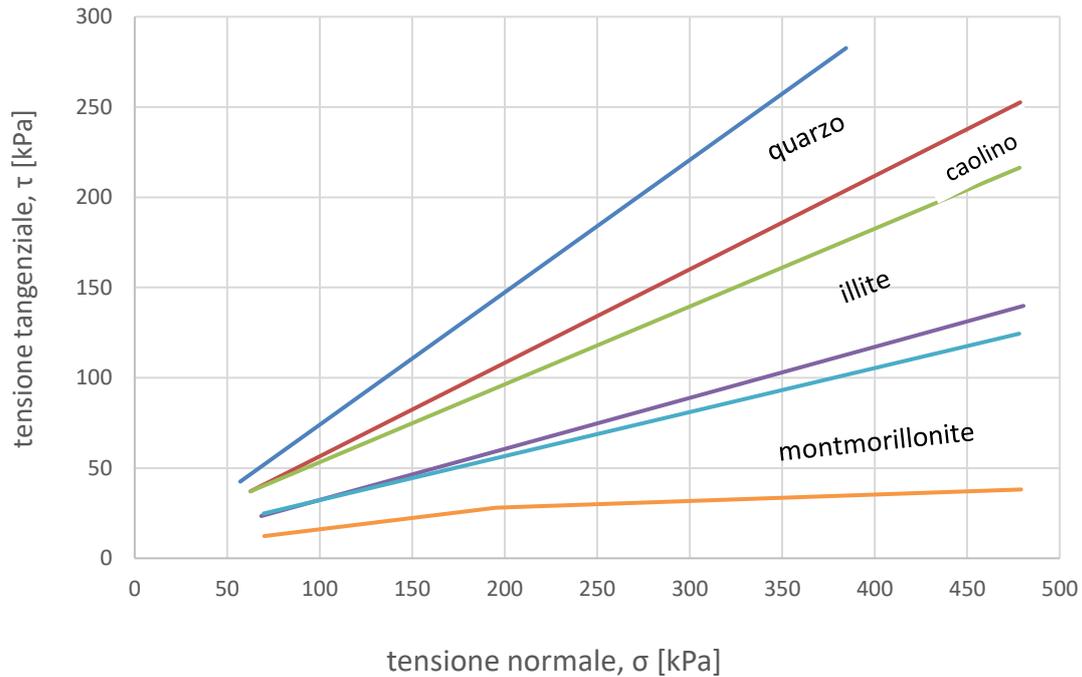


Fig.2.11 - involucri di rottura per diversi minerali argillosi (Olson, 1974)

2.3 COMPORTAMENTO VOLUMETRICO

La prova edometrica è tra le prove più utilizzate, per la valutazione del comportamento meccanico dei materiali, data la sua relativa facilità di esecuzione rispetto ad altre (es. prova triassiale). L'attenzione sarà focalizzata sull'influenza della concentrazione di cloruro di sodio, sia durante la preparazione del provino e sia con cambi di soluzione, nel liquido di cella, durante la prova.

2.3.1 COMPORTAMENTO VOLUMETRICO DELLA BENTONITE

Con riferimento agli studi eseguiti da Di Maio (1996) e Di Maio et al. (2002) su campioni di bentonite di Ponza, si analizzano i dati di prove edometriche a differente concentrazione di cloruro di sodio (Fig. 2.12)

Comportamento chemo-idro-meccanico di miscela illite-bentonite

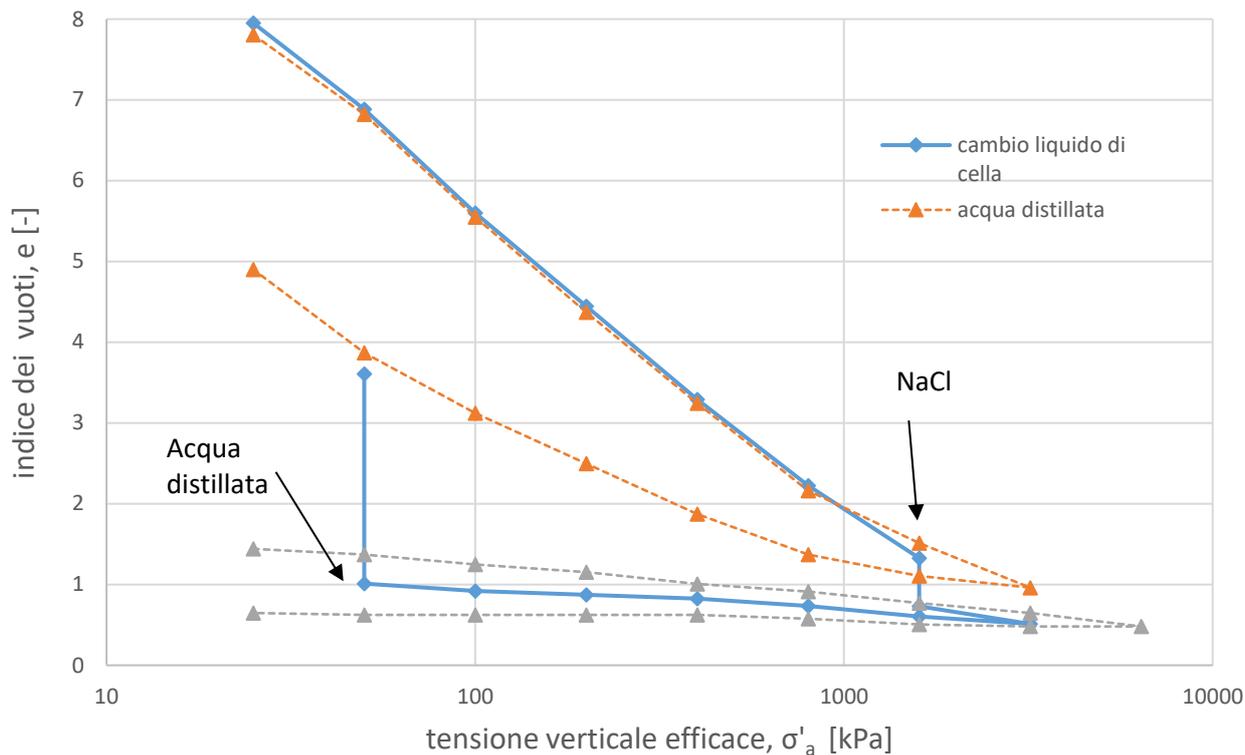


Fig.2.12 – curva edometrica per campioni di bentonite di Ponza in acqua distillata, saturati con cloruro di sodio e con sostituzione del liquido di cella, caso (a). (Di Maio, 1996)

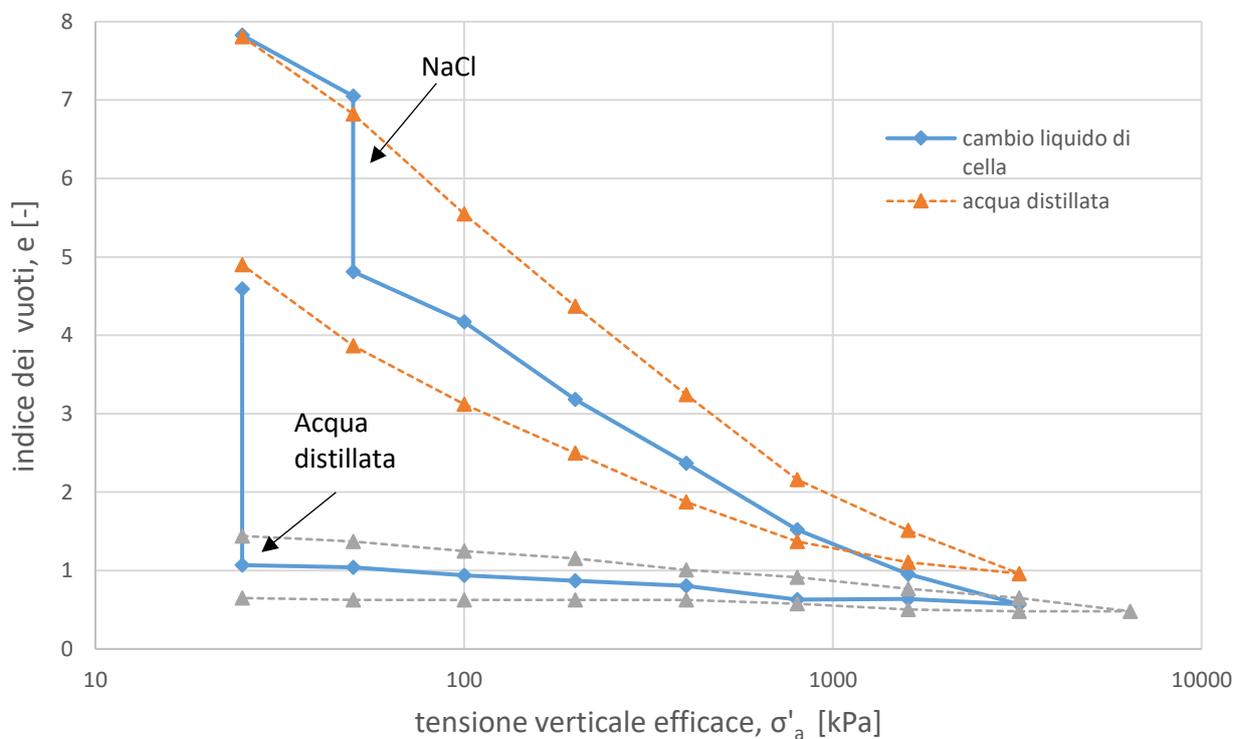


Fig.2.13 – curva edometrica per campioni di bentonite di Ponza in acqua distillata, saturati con cloruro di sodio e con sostituzione del liquido di cella, caso (b). (Di Maio, 1996)

La bentonite in acqua distillata presenta un elevato indice dei vuoti iniziale, circa pari a 10, ed una pendenza relativamente elevata. Il tratto di scarico (rigonfiamento) risulta essere meno pendente, ma comunque ben al di sopra, della curva della prova con soluzione salina. La bentonite presenta infatti un'elevatissima suscettibilità all'acqua (limite liquido molto alto) ed alla presenza di soluzioni saline.

Nel secondo caso fig. 2.13 si può notare come il cambiamento del liquido di cella tra un gradino ed il successivo della prova edometrica porti ad un cedimento (e riduzione dell'indice dei vuoti).

Questo cedimento viene lasciato stabilizzare prima di continuare la prova, l'andamento seguirà in seguito la medesima pendenza del tratto con acqua distillata. Ovviamente è valido anche l'opposto, ovvero inserendo nuovamente l'acqua distillata al posto della soluzione salina, il campione tenderà a rigonfiare. Risulta interessante vedere anche come varia la curva edometrica al variare della concentrazione molare del cloruro di sodio presente nella cella (Fig. 2.14).

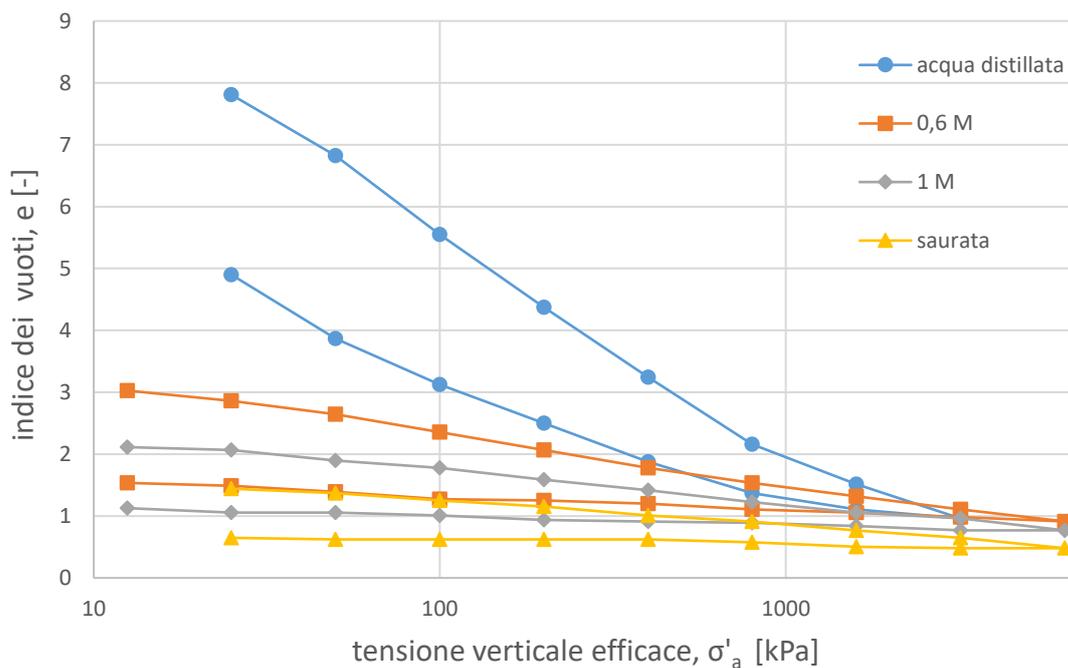


Fig.2.14 – curva edometrica, bentonite di Ponza, sottoposta a varie concentrazioni di cloruro di sodio NaCl (Di Maio et al., 2002)

Il tratto di carico presenta una pendenza decrescente all'aumentare della concentrazione ed in particolare si nota come una molarità relativamente modesta (0,6 M) sia già sufficiente per

abbattere i parametri meccanici quali l'indice dei vuoti ed il coefficiente di compressibilità C_c . La pendenza tratto di scarico (coefficiente di rigonfiamento C_s) delle sole prove con soluzione salina, risulta quasi invariato.

Per ultimo, si confronta la bentonite con altri materiali quali il caolino e la sabbia sciolta (fig. 2.15).

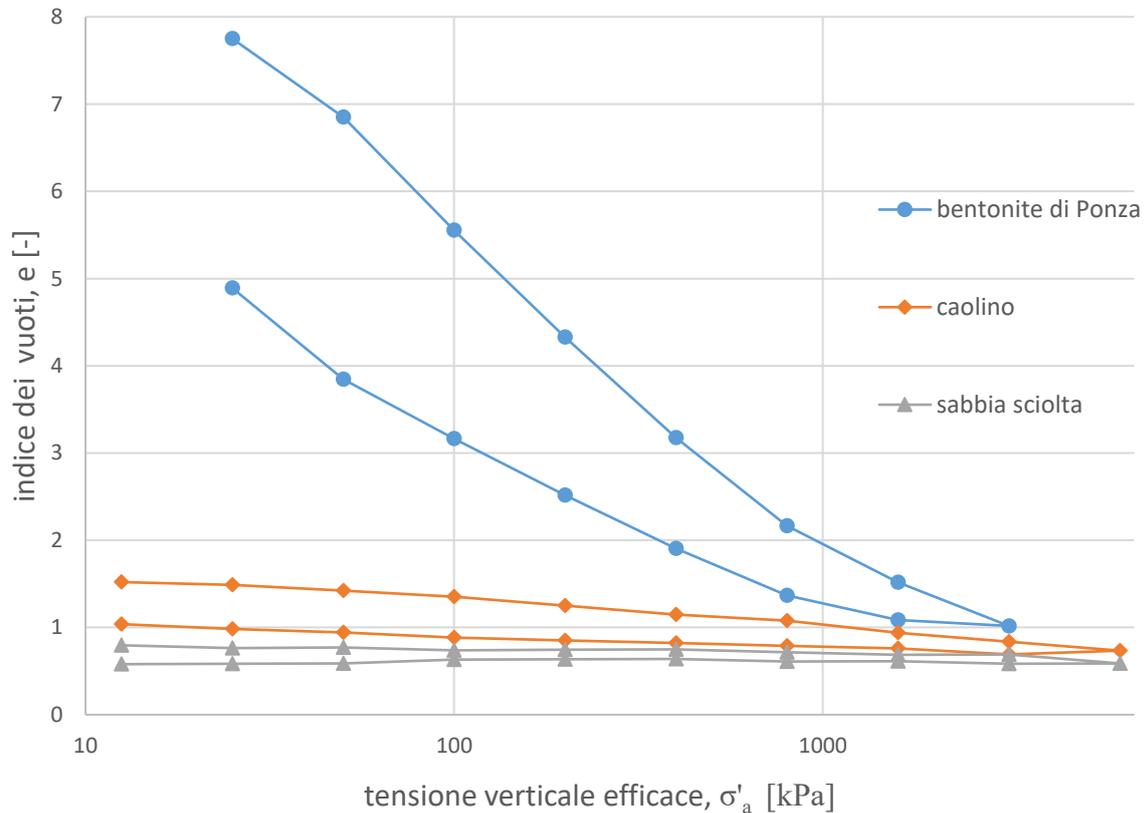


Fig.2.15 - curva edometrica per diversi materiali in acqua distillata, (Di Maio et al., 2002)

Sia il caolino che la sabbia sciolta presentano un comportamento nettamente differente da quello della bentonite, avvicinandosi maggiormente alle prove in soluzione salina della bentonite. Inoltre la pendenza del tratto di carico risulta abbastanza simile a quella del tratto di scarico, che comporta un indice dei vuoti finale molto prossimo a quello iniziale.

2.3.2 COMPORTAMENTO VOLUMETRICO DELL'ARGILLA DI MONASTERO BORMIDA

Essendo l'argilla di Monastero Bormida un materiale naturale, si sono rese necessarie delle prove di caratterizzazione, quali la diffrazione a raggi x per determinare le frazioni minerali presenti. Il minerale più presente risulta essere la smectite, seguita da illite e clorite, con tracce di quarzo e calcite.

Dall'esecuzione delle seguenti prove edometriche: in acqua distillata (DW), con una soluzione di cloruro di sodio NaCl 1M ed infine entrambe decalcificando il materiale (DECA), si ottiene il grafico in fig. 2.16.

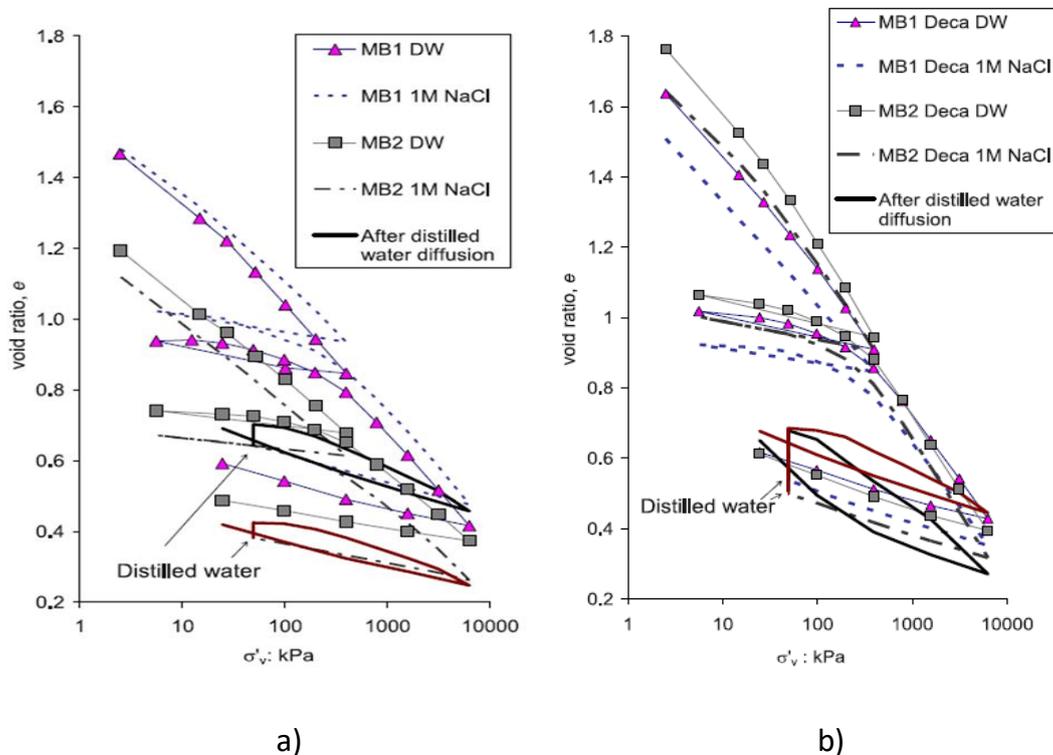


Fig.2.16 – effetti della soluzione salina e della decalcificazione sul comportamento edometrico, argilla di Monastero Bormida (Musso et al., 2008)

Si nota come per entrambi i campioni testati (MB1 E MB2) la presenza della soluzione salina abbassi la curva verso indici dei vuoti inferiori (fig. 2.16 a) e come la decalcificazione non faccia variare la pendenza della curva ma solo traslare verso l'alto (fig. 2.16 b)

Il coefficiente di compressibilità aumenta linearmente con indice dei vuoti e l'intercetta sull'asse delle coordinate, della retta interpolante, sia attestata appena al di sopra dell'origine. (Fig. 2.17)

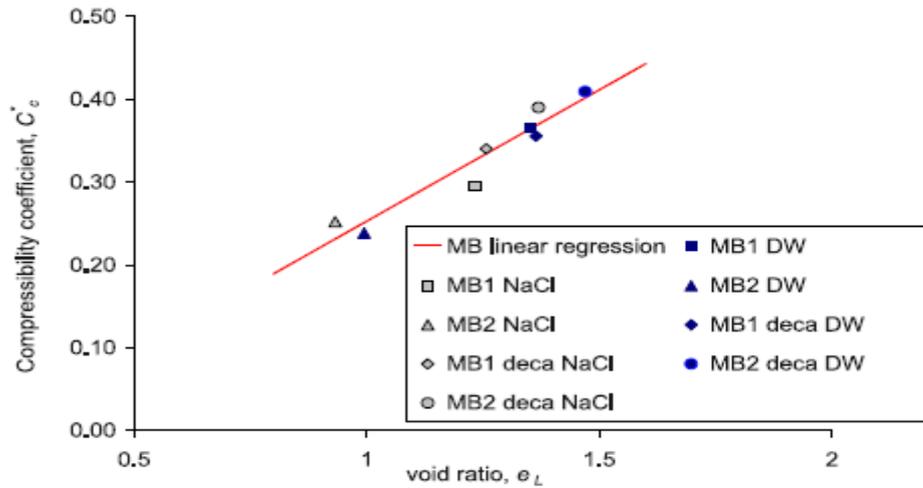


Fig. 2.17 – Coefficiente di compressibilità in funzione dell'indice dei vuoti, argilla di Monastero Bormida (Musso et al., 2008)

Altro parametro valutabile è la conducibilità idraulica K , che si dimostra crescente in accordo al valore dell'indice dei vuoti. Il materiale intatto presenta valori molto bassi, perché soggetto a fenomeni di consolidazione. Al contrario il materiale trattato ha una conducibilità idraulica di almeno due ordini di grandezza superiore e si può notare come sia l'influenza della concentrazione salina sia la decalcificazione (e combinate) portino ad un aumento di tale valore.

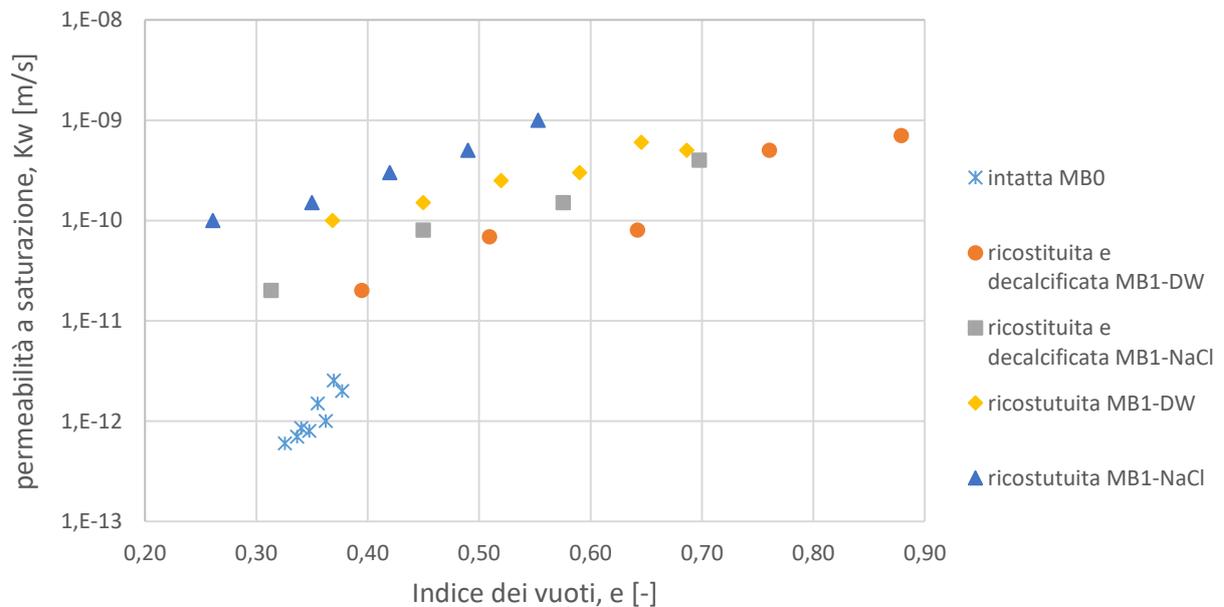


Fig. 2.18 – Conducibilità idraulica in funzione dell'indice dei vuoti, argilla di Monastero Bormida (Musso et al., 2008)

CAPITOLO 3

DESCRIZIONE DELLE METODOLOGIE DI PROVA E CARATTERIZZAZIONE

In questo capitolo vengono descritte tutte le procedure di caratterizzazione e le metodologie di prova, eseguite in questo studio riguardante miscele di illite-bentonite (entrambe nella loro forma sodica) saturate con soluzioni di cloruro di sodio a differente concentrazione molare.

3.1 DIFFRATTOMETRIA AI RAGGI X

La diffrazione ai raggi X di polveri è una tecnica che permette di quantificare le varie componenti di un campione solido e ricavare informazioni sulla struttura cristallina e sulla dimensione dei cristalli. Nel reticolo cristallino, in particolare in quello di un'argilla, vi sono svariate famiglie di piani, ognuna delle quali può essere interessata dalla riflessione delle onde incidenti.

3.1.1 GENERAZIONE DEI RAGGI X

I raggi x sono solo una parte dello spettro elettromagnetico, in particolare appartengono all'intervallo 0.01 – 100 Å. Quando degli elettroni ad alta velocità si infrangono contro un materiale, possono avvenire due fenomeni differenti. Nel primo caso l'elettrone accelerato colpisce un

corrispettivo del materiale spostandolo. Un elettrone esterno può cadere all'interno a causa della vacanza creata, che possiede una minore energia di stato. Viene quindi emesso un fotone di lunghezza d'onda e intensità caratteristici dell'atomo del materiale colpito. Poiché il trasferimento elettronico avviene in orbitali differenti ed ognuno di essi possiede una propria frequenza (fig. 3.1)

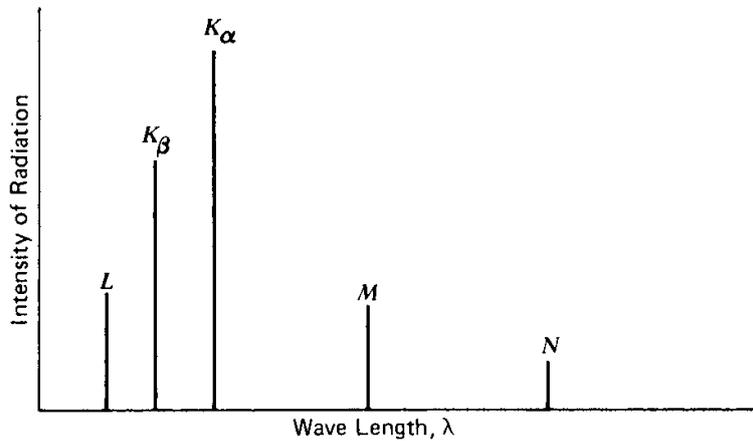


Fig.3.1 - Generazione dei raggi x in funzione dello spostamento degli elettroni; le lettere indicano gli orbitali (Mitchell & Soga, 2005)

Nel secondo caso, gli elettroni accelerati non colpiscono il corrispettivo sul materiale, ma penetrano nell'atomo verso il nucleo. L'energia viene convertita in calore e fotoni a raggi x, in questo caso i raggi prodotti sono indipendenti dal materiale investigato e variano solo in base alla lunghezza d'onda.

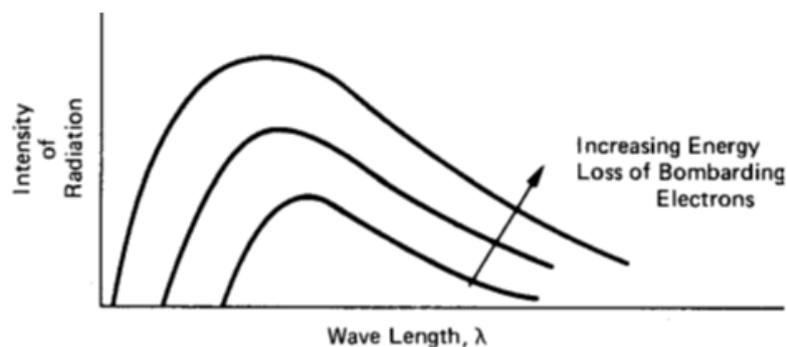


Fig.3.2 - generazione di raggi x, per decelerazione di elettroni (Mitchell & Soga, 2005)

Combinando gli effetti dei due casi precedenti si ottiene lo schema di Fig. 3.3

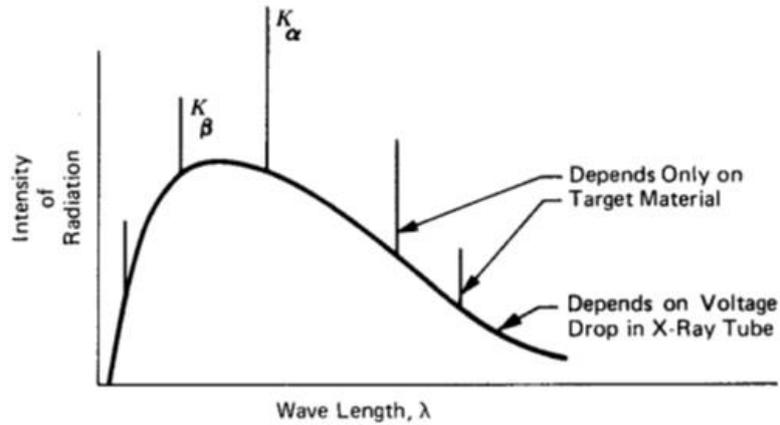


Fig.3.3 - relazione composta per intensità dei raggi x in funzione della lunghezza d'onda
(Mitchell & Soga, 2005)

I raggi x vengono generati usando un tubo, dove è presente una differenza di potenziale tra 20 e 50 kV, e dei particolari cristalli curvi, permettono di separare le singole lunghezze d'onda. La lunghezza d'onda di una radiazione monocromatica (generalmente K_{α}) varia in base all'elemento chimico utilizzato. Nel nostro caso si è utilizzato il rame avente una lunghezza d'onda di 1.54 \AA .

3.1.2 IDENTIFICAZIONE DI MINERALI MEDIANTE DIFFRATTOMETRIA AI RAGGI X

Poiché la lunghezza d'onda di circa 1 \AA , è la medesima della spaziatura tra i piani atomici delle strutture cristalline, questa tecnica è ideale. Quando un raggio x colpisce un cristallo, esso penetra in profondità per milioni di piani prima di essere assorbito. Ad ogni piano incontrato una porzione viene assorbita e gli atomi oscillano come dipoli ed irradiano in tutte le direzioni. Alcune direzioni di questi raggi sono in fase e si possono interpretate in maniera semplificata, come dei piani di riflessione.

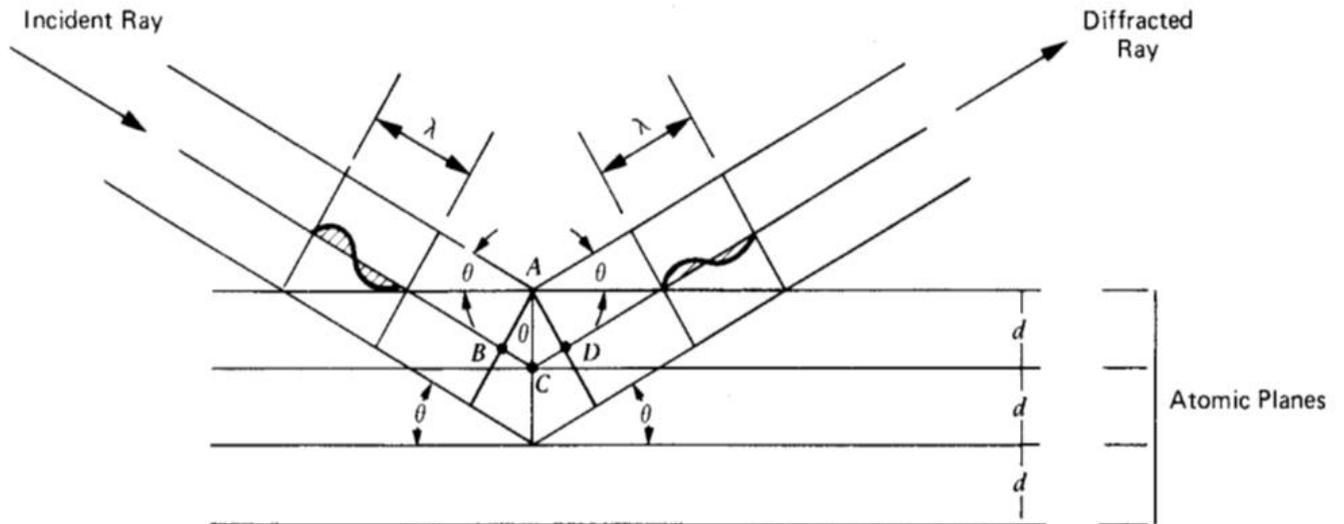


Fig.3.4 - condizioni geometriche secondo la legge di Bragg (Mitchell & Soga, 2005)

Nella fig. 3.4 si nota come dei raggi paralleli di lunghezza d'onda λ colpiscono un cristallo con un angolo θ rispetto a dei piani atomici ad una distanza d . Se l'onda riflessa da C è aumentata da quella riflessa da A, la differenza di percorso tra le due onde, deve essere un numero intero di lunghezza d'onda pari a $n\lambda$ da cui segue:

$$BC + CD = n\lambda$$

E per simmetria $BC=CD$

per trigonometria

$$CD = d \sin\theta$$

da cui segue la legge di Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

dove: n = numero intero, λ = lunghezza d'onda, d = distanza tra i piani di atomi (\AA),
 θ = angolo di incidenza.

Procedura:

Generalmente il campione si riduce in polvere sottile (1-50 micron) e si posiziona nel diffrattometro. La direzione del fascio di raggi X primario rimane costante perché il campione ruota intorno ad un asse normale a tale fascio. I fasci diffratti che arrivano sul detector, solidale ad un goniometro, sono riportati come picchi su di un grafico. Il diffrattometro è disegnato in modo che il braccio del goniometro ed il detector solidale ad esso, ruotino il doppio rispetto alla direzione del campione. In questo modo mentre il campione ruota di un angolo θ , il detector ruota di angolo 2θ che è l'angolo letto dal goniometro. La geometria del diffrattometro è tale che soltanto i grani dei minerali i cui piani di reticolo sono paralleli alla superficie del portacampione potranno contribuire al fascio secondario di riflessione che arriverà al detector. E' per questa ragione che le particelle della polvere devono essere piccole (assicurare la presenza di un buon numero di grani posizionati appropriatamente). Quando la polvere proviene da un solo minerale, si ha la diffrazione per ogni angolo di incidenza che soddisfi l'equazione di Bragg. Ogni angolo è relativo ad un reticolo cristallino che ha una distanza "d" ben definita e catalogata tra i diversi piani. Ogni campione ha un suo numero particolare di reticolo, quindi la diffrazione produce un'unica serie di riflessioni (i picchi) nel diffrattogramma. Questa caratteristica è dovuta alla posizione di ogni riflessione ad un angolo 2θ ed all'intensità di ogni riflessione.

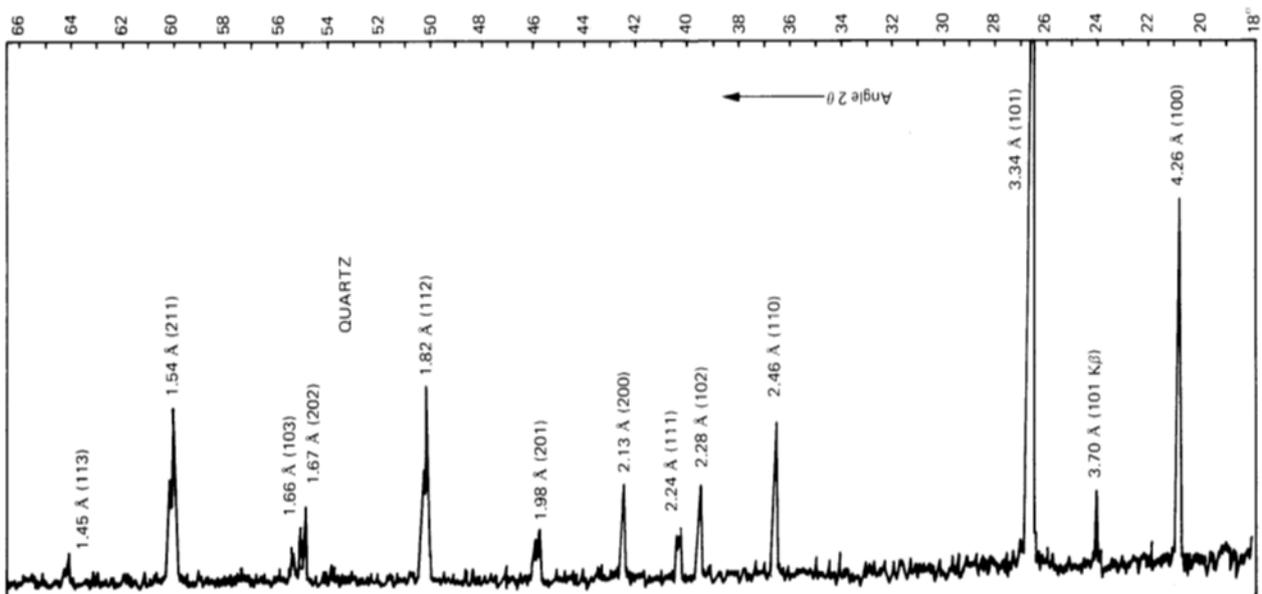


Fig.3.5 - esempio di prova su quarzo, tra parentesi gli indici di Miller (Mitchell & Soga, 2005)

Il risultato della prova è uno spettro che necessita un'interpretazione attenta per poter associare a ciascun picco una fase mineralogica (utilizzando anche dati in cui sono archiviati informazioni cristallografiche di moltissime fasi). L'analisi qualitativa si riferisce alla identificazione delle fasi presenti nel materiale, ma se si tratta un campione policristallino, è molto complicato il riconoscimento delle stesse. E' possibile ottenere poi attraverso un apposito software, un'analisi quantitativa delle varie fasi presenti all'interno del terreno ed infine si utilizza la tabella 4.1, dove noti i picchi si rilevano i minerali presenti.

<i>d</i> (Å)	Mineral ^a	<i>d</i> (Å)	Mineral ^a
14	<i>Mont. (VS) Chl. Verm. (VS)</i> ^b	2.93–3.00	Felds.
12	<i>Sepiolite, heated corrensite</i>	2.89–2.90	Carb.
10	<i>Illite, Mica (S), Halloysite</i>	2.86	Felds.
9.23	Heated Verm.	2.84	Carb. <i>Chl.</i>
7	<i>Kaol. (S). Chl.</i>	2.84–2.87	<i>Chl.</i>
6.90	<i>Chl.</i>	2.73	Carb.
6.44	Attapulgit	2.61	Attapulgit
6.39	<i>Felds.</i>	2.60	Verm., Sepiol.
4.90–5.00	Illite, Mica, Halloysite	2.56	Illite (VS), Kaol.
4.70–4.79	<i>Chlor. (S)</i>	2.53–2.56	Chlor., Felds., Mont.
4.60	Verm. (S)	2.49	Kaol. (VS)
4.45–4.50	Illite (VS), Sepiolite	2.46	Quartz, heated Verm.
4.46	Kaol.	2.43–2.46	Chlorite
4.36	Kaol.	2.39	<i>Verm., Illite</i>
4.26	Quartz (S)	2.38	<i>Kaol.</i>
4.18	Kaol.	2.34	Kaol. (VS)
4.02–4.04	Felds. (S)	2.29	Kaol. (VS)
3.85–3.90	Felds.	2.28	Quartz, Sepiol.
3.82	Sepiol.	2.23	Illite, Chl.
3.78	Felds.	2.13	Quartz, Mica
3.67	Felds.	2.05–2.06	Kaol. (WK)
3.58	Carbonate, Chl.	1.99–2.00	<i>Mica, Illite (S), Kaol. Chl.</i>
3.57	<i>Kaol. (VS), Chl.</i>	1.90	Kaol.
3.54–3.56	Verm.	1.83	Carb.
3.50	Felds., Chlor.	1.82	Quartz
3.40	Carb.	1.79	Kaol.
3.34	Quartz (VS)	1.68	Quartz
3.32–3.35	<i>Illite (VS)</i>	1.66	Kaolin
3.30	Carb.	1.62	Kaolin
3.23	Attapulgit	1.54B	Verm. (S), Quartz
3.21	Felds.	1.55	Quartz
3.20	Mica	1.58	Chl.
3.19	<i>Felds. (VS)</i>	1.53	Verm., Illite
3.05	Mont.	1.50	Ill. (S), Kaol.
3.04	Carb. (VS)	1.48–1.50	Kaol. (VS), Mont.
3.02	Felds.	1.45B	Kaol.
3.00	Heated Verm.	1.38	Quartz, Chl.
2.98	Mica (S)	1.31, 1.34, 1.36	Kaol. (B)

^a(B) = broad; (S) = strong; (VS) = very strong; (WK) = weak; Mont. = montmorillonite; Chl. = chlorite; Verm. = vermiculite; Kaol. = kaolinite; Carb. = carbonate; Felds. = feldspar; Sepiol. = sepiolite.

^b*Italics indicates (001) spacing.*

Tab. 3.1 - dati per minerali argillosi e per i più comuni non argillosi (Mitchell & Soga, 2005)

3.2 PESO SPECIFICO DEI GRANI G_s

La densità specifica dei grani di un terreno è definita dalla seguente relazione:

$$G_s = \frac{\rho_s}{\rho_w}$$

dove: $\rho_s = \frac{M_s}{V_s}$: densità dei grani ρ_w : densità dell'acqua.

Con il termine densità specifica di un terreno, si definisce il rapporto tra la massa di un volume noto di terra secca e quello di un uguale volume di acqua distillata (libera da gas), determinati entrambi alla medesima temperatura. La metodologia riportata si riferisce a terreni aventi particelle di dimensioni inferiori a 4.75mm.

3.2.1 APPARECCHIATURA PER LA DETERMINAZIONE DEL PESO SPECIFICO G_s

L'apparecchiatura richiesta per l'esecuzione della prova è composta da:

- 2 picnometri con capacità compresa tra i 50 ml e 500 ml (Fig. 4.6)
- Una bilancia avente sensibilità non inferiore a 0.01g
- Un termometro con sensibilità non inferiore a 0.5°C
- Un forno termostatico per l'essiccazione del provino
- Un essiccatore contenente gel di silice
- Una pompa a vuoto.

Il campione utilizzato per la prova dovrebbe essere seccato in forno ed essere rappresentativo del campione totale di terreno, oppure solamente setacciato. La massa minima di campione secco necessaria per eseguire la prova, deve rispettare le seguenti indicazioni:

Massima dimensione dei grani [mm]	Setaccio ASTM	Minima massa del campione [g]
2	No. 10	20
4.75	No. 4	100

La densità specifica G_s ad una determinata temperatura è data dalla formula:

$$G_s(T) = \frac{M_0}{[M_0 + (M_a - M_b)]}$$

dove:

M_0 : massa del campione secco

M_a : massa del picnometro riempito con acqua alla temperatura T

M_b : massa del picnometro riempito con acqua e terreno alla temperatura T

T : temperatura di prova, rilevata al momento della determinazione della massa M_b .

Al numeratore è presente la massa secca, mentre al denominatore c'è la massa di un volume di acqua pari al volume che occupano i grani del materiale da testare. Essendo la densità dell'acqua funzione della temperatura, la massa M_a (picnometro riempito di acqua) risulta anch'essa funzione della temperatura. Per facilità durante l'esecuzione della prova è buona norma avere una tabella che esprima il valore M_a in funzione della temperatura.

Per prima cosa si procede quindi alla calibrazione dei picnometri, in seguito dopo aver eseguito un'accurata pulizia ed asciugatura si esegue una pesata per ottenere la massa del picnometro M_f . Si riempie completamente il picnometro con acqua distillata e disareata, si posiziona il tappo e si asciuga accuratamente l'acqua in eccesso (questa fase deve essere eseguita con sufficiente lentezza per evitare la formazione di bolle d'aria). Pesando il picnometro appena riempito con acqua si determina la massa M_a . Immediatamente dopo (nel più breve tempo possibile) si inserisce il termometro nel picnometro per determinare la temperatura T_a . L'operazione viene ripetuta a diverse temperature T in modo da ottenere una tabella con diversi valori di M_a nell'intervallo di temperatura a cui generalmente si prevede di effettuare la prova. In alternativa, si può utilizzare un metodo differente: nota la densità dell'acqua al variare della temperatura, i valori di M_a possono essere calcolati con la formula:

$$Ma(T_x) = \left[\left(\frac{\rho_w(T_x)}{\rho_w(T_a)} \right) \times [M_a(T_a) - M_f] \right] + M_f$$

Dove:

M_a = Massa del picnometro e acqua, g.

M_f = Massa del picnometro vuoto, g.

T_a = Temperatura osservata alla determinazione della massa $M_a(T_a)$ durante la calibrazione

T_x = Qualsiasi altra temperatura desiderata, °C.

Per determinare il Gs esistono due possibili procedure, quella per provini secchi (non trattato) e quella per provini umidi.

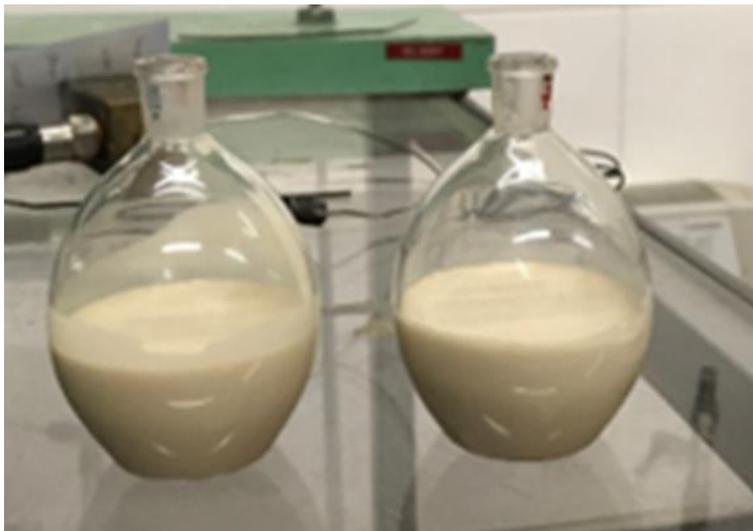


Fig.3.6 - picnometri durante la determinazione del Gs dell'illite

3.2.2 METODO PER PROVINI UMIDI

1. Si lavora con delle spatole del quantitativo secco del campione di terra in acqua distillata. Questa procedura va eseguita fino a quando il terreno non manifesta più presenza di grumi e risulti uniforme.
2. Si versa il fango ottenuto dalla lavorazione, in due picnometri con capienza di almeno 100mL per un volume pari alla metà della loro capacità.

3. Si riempie il picnometro con acqua distillata della quantità che serve a coprire il campione secco (circa metà dell'intero volume del picnometro). Si lasciare saturare il campione per almeno 12h, meglio ancora se 24.
4. Rimozione dell'aria intrappolata nel campione mediante l'utilizzo di una pompa a vuoto. Quest'ultima viene collegata al beccuccio del picnometro e si applica il vuoto per almeno 30 min. Durante questa fase è consigliabile agitare (ogni 4-5 minuti) delicatamente i picnometri in modo da favorire la rimozione delle bolle d'aria intrappolate.
5. Si riempie interamente il picnometro con acqua distillata e disareata (alla stessa temperatura del picnometro). L'acqua deve essere aggiunta molto lentamente, facendo sempre attenzione a non inglobare bolle d'aria, che falserebbero il risultato.
6. Nelle successive 12h si attende la completa sedimentazione del terreno che prima risultava in sospensione e per fare in modo che si raggiunga l'equilibrio termico.
7. Si inserisce il tappo del picnometro, rimuovendo con cura tutta l'acqua in eccesso e asciugando perfettamente la superficie esterna dello stesso.
8. Pesare il picnometro riempito con acqua e terreno (M_b) e immediatamente dopo misurare anche la temperatura di prova (T_b).
9. Si versa il contenuto dell'intero picnometro in un contenitore di vetro, risciacquando il picnometro ripetutamente con acqua distillata fino a che l'acqua di lavaggio non risulta completamente trasparente.
10. Si pone il contenitore in forno per almeno 12h, dopo le quali viene posto nell'essiccatore per raffreddare ed infine si determina la massa secca del campione (M_0).

Note tutte le masse richiesta dalla formula, si calcola il peso specifico G_s alla temperatura di prova T_b . Salvo richieste particolari, la densità specifica dei grani viene generalmente riferita ad una temperatura dell'acqua di 20°C, per cui si esegue la seguente correzione:

$$G(20^{\circ}C) = K \times (G(T_b))$$

Dove: K è un numero ottenuto dividendo la densità dell'acqua alla temperatura T_b per la densità dell'acqua a 20 °C.

3.3 MICROSCOPIA ELETTRONICA A SCANSIONE (SEM)

Il microscopio a scansione elettronica o SEM appartiene alla famiglia SPM (Scanning Probe Microscopy).

Il fascio di elettroni viene prodotto da una sorgente, generalmente costituita da un filo metallico portato ad elevata temperatura (effetto termoionico). Gli elettroni emessi vengono accelerati nella direzione voluta mediante l'applicazione di una differenza di potenziale. Il fascio transita attraverso un sistema di lenti elettromagnetiche che hanno il compito di focalizzarlo, diminuendo notevolmente le sue dimensioni (ordine del nm). Sono inoltre presenti dei deflettori elettrostatici che hanno lo scopo di deviare le traiettorie degli elettroni permettendo la scansione del fascio sull'intera superficie da investigare.

Altro aspetto fondamentale è la raccolta dei segnali, cioè i rilevatori, che permettono di ottenere anche la coordinata z, che associata alle bidimensionali x e y dà forma all'immagine tridimensionale. Dal punto di vista energetico, per poter visualizzare un oggetto è necessario interagire con esso, per tale ragione l'energia del fascio incidente risulta essere dell'ordine dei keV, stesso ordine di grandezza delle energie di legame degli elettroni negli orbitali più interni dell'atomo. Questo basso valore energetico inoltre non stimola i nuclei dell'atomo e quindi risulta ideale.

3.1.1 CENNI TEORICI E FUNZIONAMENTO

Interazione fascio campione

Si introducono due parametri fondamentali, associabili ad ogni tipo di interazione:

- a) *la sezione d'urto*: intesa come la dimensione che può essere vista dall'elettrone che interagisce
- b) *il libero cammino medio*: che rappresenta il percorso medio che una generica particella può percorrere prima di incontrare una qualsiasi superficie da investigare.

L'interazione elettrone-atomo può essere di due tipi:

- a) *elastico*: l'elettrone incidente mantiene la propria energia ma subisce una variazione della sua direzione di moto
- b) *anelastico*: l'elettrone subisce entrambe le variazioni, sia di energia che di moto.

Per le nostre analisi è importante conoscere la *profondità di penetrazione*, la cui stima viene eseguita sulla base dell'energia prodotta e dalla traiettoria teorica del fascio. Il fascio tende ad allargarsi all'interno del campione (effetto opposto alla focalizzazione voluta) producendo un volume di interazione a forma di pera (fig. 3.7)

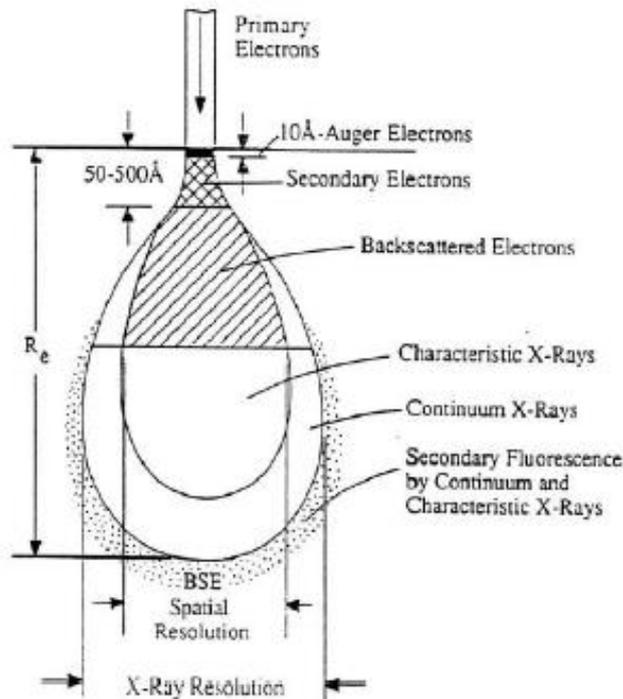


Fig. 3.7 – Interazione sonda-campione

In definitiva la risoluzione dipende dalla tipologia di elettroni rilevati (emessi dal campione), provenienti da regioni e profondità differenti.

Analisi del segnale

Un campione sottoposto ad un fascio di elettroni, può emettere tre tipologie di elettroni:

- a) *elettroni auger*: si genera quando un elettrone penetra nel campione creando una vacanza, che a sua volta eccita l'atomo. L'atomo tende a diseccitarsi grazie ad un elettrone che transita da uno stato ad elevata energia ad uno con meno, questo fenomeno rilascia energia che in un'orbita più esterna può liberare questo tipo di elettrone. Può essere generato in tutto il fascio a forma di pera e la sua rilevazione è utile per stimare la composizione chimica superficiale.

- b) *Elettroni retrodiffusi (backscattered)*: sono quelli che a seguito dell'urto con il campione tendono a fuoriuscire, per tale ragione possiedono un'elevata energia (simile a quella degli elettroni incidenti). Rilevati forniscono informazioni sulla struttura cristallina a profondità maggiori. Ruotando il campione si può migliorare l'analisi a causa della variazione dell'angolo d'incidenza.
- c) *Elettroni secondari*: fuoriescono dal campione da basse profondità e con bassa energia, per tale motivo sono quelli che permettono all'analisi SEM di avere un'ottima risoluzione superficiale. Anche per questa tipologia la rotazione del campione influenza l'angolo d'incidenza e la risoluzione finale (fig. 3.8)

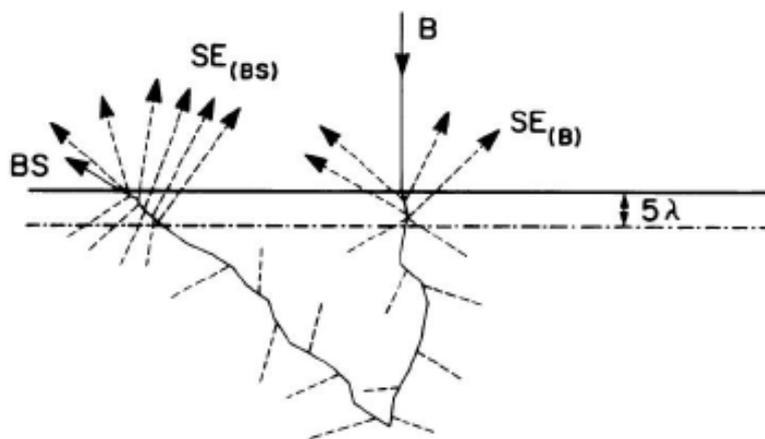


Fig. 3.8 – elettroni secondari ed angoli d'incidenza

Sorgenti di elettroni

Esistono principalmente due metodi per la generazione del fascio elettronico:

- a) *Emissione termoionica*: vengono emessi degli elettroni eccitati termicamente. La temperatura supera i 2000 gradi Kelvin permettendo agli elettroni di possedere un'energia tale per oltrepassare la barriera di potenziale che li separa dal vuoto. Il materiale di gran lunga più utilizzato per il filamento metallico è il tungsteno.
- b) *Emissione per effetto di campo*: al metallo viene applicato un campo elettrico necessario per piegare le bande e consentire al fascio elettronico di fuoriuscire per "effetto tunnel".

Focalizzazione del fascio

La focalizzazione avviene mediante bobine attraversate da correnti elettriche, che generano dei campi magnetici. Il numero minimo di bobine per ottenere la focalizzazione sul piano è 4. Al momento della fuoriuscita dal cannone il fascio presenta una dimensione di circa 10-50 μm che verrà ridotto all'ordine del nm mediante queste lenti elettromagnetiche. Essendo una lente, restano valide le leggi della fisica ottica (fig. 3.9)

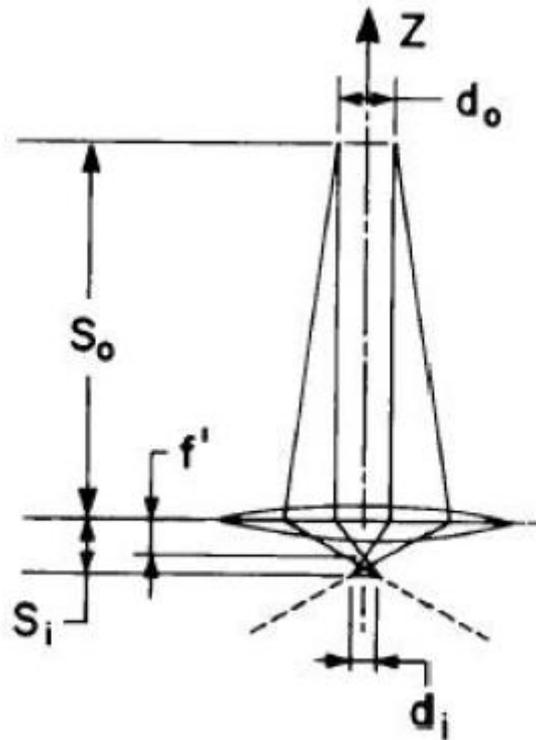


Fig. 3.9 – schematizzazione di una lente ottica

Per una lente si ha: $\frac{1}{S_0} + \frac{1}{S_t} = \frac{1}{f'}$ ed il fattore di riduzione: $M = \frac{S_0}{S_t}$

Nel caso di due lenti (fig. 3.x) si ha: $M = M_1 \cdot M_2 = \frac{S_0}{S_1} \cdot \frac{S_1'}{S_2}$ e $d = \frac{d_0}{M}$

In questa tipologia di lenti, variando la distanza focale è possibile modificare il fattore di riduzione M , infatti cambiando il valore della corrente che attraversa le bobine si modificano il diametro finale del fascio ed il suo angolo di apertura.

Altro parametro fondamentale è la cosiddetta *working distance*, ovvero la distanza tra il campione e l'ultima lente, al variare di questa distanza si modificano i parametri geometrici e si modifica la risoluzione e la profondità di investigazione.

Rilevatori

In risposta dal campione vengono emesse delle correnti elettroniche di intensità molto bassa (dell'ordine del 10^{-11} Ampere), inoltre essendo due le tipologie di elettroni fuoriusciti, saranno necessari due rilevatori differenti:

- a) Rilevatore Everhart-Thornley: per gli elettroni secondari. Sono costituiti da un materiale scintillante posto ad un determinato potenziale positivo rispetto al campione. Gli elettroni vengono attratti ed accelerano verso il rilevatore irraggiandolo, ciò provoca un'emissione di luce da cui si ottiene il numero di elettroni secondari.
- b) Rilevatore a semiconduttore: per i retrodiffusi. Possono avere svariate forme e vengono posizionati in vicinanza della superficie da analizzare per migliorare l'efficienza. Gli elettroni da rilevare interagiscono con il semiconduttore creando delle coppie elettrone-lacuna, questo genera delle cariche e quindi una corrente indotta. Misurando l'energia si risale al numero di particelle interagenti.

3.3.2 APPLICAZIONE ANALISI SEM SU TERRENI ARGILLOSI

Per eseguire l'analisi al SEM precedentemente descritta, sono state necessarie delle operazioni preliminari, al fine di avere il campione nelle condizioni ottimali. I provini vengono preparati impastando il materiale secco (illite, bentonite e loro miscele) con acqua distillata e con soluzioni di cloruro di sodio NaCl a differente molarità, con un quantitativo di soluzione di poco superiore il limite liquido ricavato in precedenza. Successivamente si esegue per ognuno di questi campioni una prova edometrica ad incrementi di carico costanti (rif. Cap.4), applicando un carico ogni 24h.

La prova si interrompe ad una pressione di circa 200 kPa (che garantisce un buon grado di consolidazione), ed in seguito il provino è stato estratto ed immediatamente paraffinato. Questo accorgimento è stato necessario non potendo eseguire in giornata la fase successiva ovvero la liofilizzazione. Prima di essa i campioni sono stati liberati dalla paraffina, ridotti di dimensione con una fustella di diametro circa 1cm e posizionati all'interno di una campana di vetro alla cui base è stata posta dell'acqua distillata, (per non alterare il quantitativo d'acqua). Una volta all'interno, si sono trasportati presso il DISAT del Politecnico, dove è stata eseguita la liofilizzazione (Fig. 3.10).



Fig.3.10 - Liofilizzatore del DISAT e posizionamento dei campioni all'interno di esso

3.3.3 CENNI TEORICI SULLA LIOFILIZZAZIONE:

La liofilizzazione (crioessiccamento) è una trasformazione di tipo fisico, attuata per eliminare l'acqua da un materiale con il minimo deterioramento possibile della sua struttura interna. Ad oggi viene utilizzata in svariati campi, di cui i principali sono: chimico, farmaceutico, alimentare.

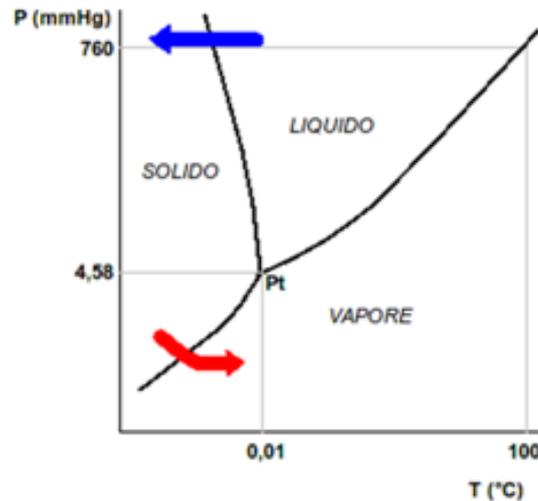


Fig.3.11 - Diagramma di fase dell'acqua, *congelamento* (in blu) e *sublimazione* (in rosso).

La metodologia di prova consiste in due trasformazioni di tipo fisico: la surgelazione e la sublimazione. Il campione dovrà essere inizialmente congelato e posto sottovuoto, prima di poter applicare il calore necessario; l'acqua presente all'interno si presenta sotto forma di ghiaccio e viene estratta direttamente come vapore per sublimazione. Si opera con valori di pressione inferiori a 6 mbar (punto triplo dell'acqua), cioè in uno stato che consente la contemporanea presenza dell'acqua nelle tre fasi. Il vapore acqueo estratto deve essere catturato per congelamento su serpentine fredde dette *condensatori*; i gas incondensabili vengono aspirati ed eliminati dalla pompa da vuoto. Durante l'intera durata del processo i valori di temperatura e pressione devono essere costantemente monitorati al fine di evitare danni alla struttura interna del campione.

Il processo di liofilizzazione prevede tre fasi di prova:

- a) Surgelazione: con varie metodologie, ad una temperatura di circa $-50\text{ }^{\circ}\text{C}$, in differenti contenitori in base al materiale testato (es. fiala nel caso di liquidi). Un congelamento eccessivamente veloce, potrebbe causare la formazione di numerosi cristalli di ghiaccio tra le cellule, il quale non è desiderabile, poiché la sublimazione è un processo complicato all'interno delle cellule. Al contrario, un congelamento troppo lento, produce cristalli grandi che sublimano rapidamente ma possono danneggiare le strutture cellulari; la scelta del ciclo termico dipende dal materiale utilizzato e dalle caratteristiche che si vogliono ottenere.

- b) Sublimazione: questo stadio inizia alla temperatura di $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ applicando il vuoto con una pressione inferiore a 1.3 mbar e riscaldando mediante conduzione o irraggiamento. Il calore si trasferisce dalla piastra alla superficie del prodotto ed in seguito al fronte di sublimazione, dove il prodotto si presenta in parte congelato ed in parte essiccato. Il fronte di sublimazione progredendo verso l'interno del provino e lo strato superficiale essiccato, lavora similmente ad un isolante, sempre più efficace, dei cristalli di ghiaccio interni, richiedendo progressivamente più calore. Il vapore si trasferisce dal fronte di sublimazione all'esterno creando una struttura porosa, in seguito viene rimosso mediante mezzi essicanti o tramite congelamento con serpentine.

- c) Desorbimento: in seguito alla sublimazione, un piccolo quantitativo di acqua rimane, come monostato molecolare adsorbito sulla superficie porosa del campione. Quest'acqua in eccesso viene in parte eliminata innalzando la temperatura superficiale (non oltre i $60\text{ }^{\circ}\text{C}$) e/o diminuendo la pressione di qualche decimo di mbar. Così facendo l'umidità residua passa dal 10% all'1% – 3% finale. Il riscaldamento radiante è il più usato seguito da quello con microonde.

In relazione alla quantità, alla natura ed alla geometria del campione su cui si lavora, la durata del processo può variare da alcune ore ad alcuni giorni. Al termine del processo, la "rottura" del vuoto viene eseguita con un gas inerte (azoto) che, andando a permeare la superficie porosa del prodotto, lo protegge dall'ossidazione.

3.3.4 PROCEDURA DI PROVA

In questa tesi con la tecnica SEM si sono studiate le particelle di argilla e loro disposizione, con particolare attenzione al quantitativo percentuale ed alla concentrazione salina, a cui sono state sottoposte durante la preparazione del provino. Per eseguire le scansioni si è utilizzato il microscopio per le analisi SEM, presente presso la facoltà di geologia dell'università di Torino.



Fig.3.12 - microscopio elettrico a scansione SEM (facoltà di geologia, Torino)

Prima di poter eseguire le analisi, sono necessarie alcune operazioni preliminari. Ogni campione viene sbriciolato manualmente (ci interessa l'interno di esso) e incollato all'interno di un elemento portacampione che si posizionerà in un apposito alloggiamento all'interno del microscopio.



Fig.3.13 - Ruota portacampioni con tre materiali prima dell'analisi (facoltà di geologia, Torino)

L'analisi viene eseguita con l'aiuto del tecnico di laboratorio, il quale per ogni campione si posiziona preliminarmente al centro di esso. Successivamente variando alcuni parametri come la *working distance* ed il grado d'ingrandimento si ottengono le immagini volute.

Questa strumentazione è inoltre in grado, mediante una procedura differente, di rilevare i minerali presenti e le loro relative percentuali (non utilizzata in questa tesi).



Fig.3.14 - Software durante le scansioni (facoltà di geologia, Torino)

3.4 LIMITI DI ATTERBERG

I limiti di Atterberg sono dei particolari valori del contenuto d'acqua che caratterizzano convenzionalmente i passaggi di una terra coesiva dallo stato liquido a quello plastico (LL, w_L , limite liquido), dallo stato plastico a quello semisolido (PL, w_p Limite Plastico) e dallo stato semisolido a quello solido (w_s , limite di ritiro).

Pur basandosi su prove evidentemente empiriche, quella della determinazione dei limiti di Atterberg costituisce una metodologia di laboratorio semplice e diffusa per la classificazione delle terre coesive e vengono spesso utilizzati singolarmente o insieme ad altre proprietà del terreno per ottenere correlazioni con grandezze ingegneristiche come la compressibilità, la permeabilità, la compattabilità, la resistenza al taglio, ritenzione e rigonfiamento. La composizione e la concentrazione di Sali solubili in un terreno influenzano i valori di w_L e w_p , per tale ragione, particolari considerazioni devono quindi essere prese per terreni provenienti da ambienti marini o altre fonti dove alte concentrazioni di sale potrebbero essere presenti.

3.4.1 LIMITE LIQUIDO

Il limite liquido è quel particolare valore del contenuto d'acqua che caratterizza il passaggio di una terra coesiva dallo stato liquido (consistenza nulla, impossibilità di modellazione) a quello plastico (possibilità di modellare la terra senza la formazione di crepe superficiali).

Le metodologie di laboratorio utilizzate, per la sua determinazione sono:

- a) Il metodo del cucchiaio di Casagrande
- b) Il metodo del cono

Nel dettaglio viene descritto solo il metodo di Casagrande, essendo di gran lunga il più utilizzato.

Apparecchiatura

L'apparecchiatura è costituita da una coppa di ottone sospesa da un carrello progettato per controllare la sua caduta su una base di gomma dura. Le dimensioni e le caratteristiche del dispositivo sono descritte nel dettaglio nella normativa ASTM.

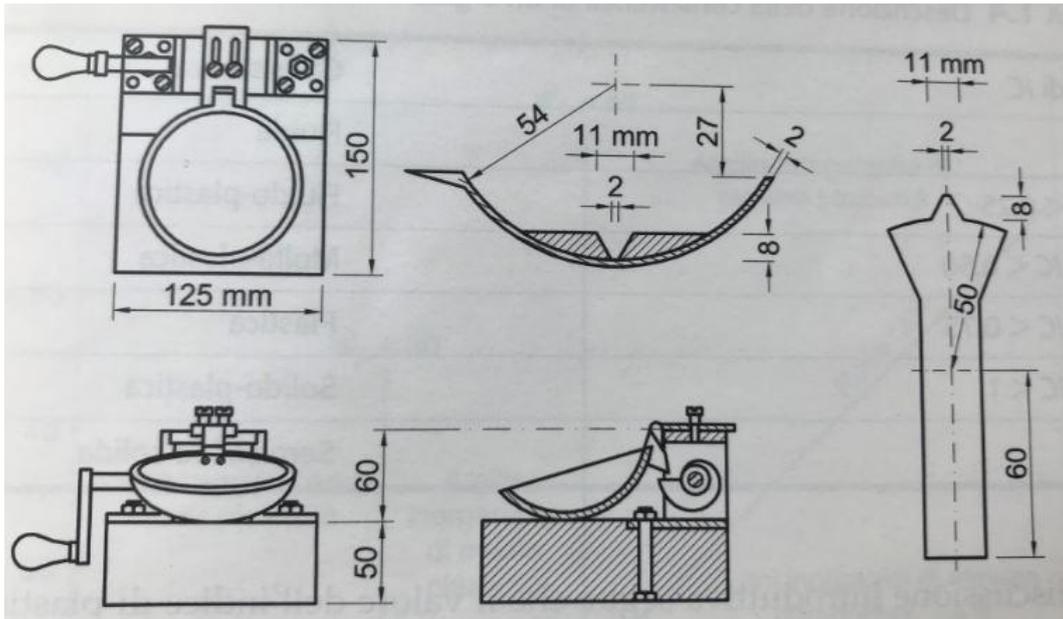


Fig.3.15 – Cucchiaino di Casagrande, particolari geometrici ed accessorio (Lancellotta, 2004)

Il dispositivo viene azionato manualmente con una manovella oppure meccanicamente tramite un piccolo motore elettrico. Altro componente presente è l'utensile per la creazione del solco diametrico, le cui misure sono riportate in fig. 3.15.

Sono necessari all'esecuzione della prova anche un setaccio ASTM 40 ($425\mu\text{m}$), una spatola metallica per la lavorazione del provino, ed un'altra di dimensioni di almeno 2 cm in larghezza e 10-13 cm in lunghezza con le punte arrotondate per stendere il campione nel cucchiaino. Servono inoltre una bilancia con precisione dell'ordine del 10^{-4} g ed un forno, per la determinazione finale del contenuto d'acqua.

Procedura di prova:

I limiti di Atterberg vengono eseguiti sulla frazione di materiale passante al setaccio n°40 ASTM (425 μ m). In ogni caso la quantità passante a questo setaccio necessaria per l'esecuzione della prova deve essere circa 150g ÷ 200g (il quantitativo, nel caso di limite elevato risulta sovrabbondante). Nel caso in cui dall'analisi granulometrica si nota che il materiale da testare è costituito da grani di dimensione minore di 425 μ m, non è necessario eseguire preliminarmente la setacciatura del campione. Nel caso, invece, solo una piccola frazione del campione presenta grani \geq di 425 μ m si deve procedere con una setacciatura ad umido. In un contenitore si diluisce il campione di terreno con acqua distillata e si lascia imbibire per almeno 12h.

Una volta setacciato il materiale deve essere mescolato a sufficiente con acqua distillata (o eventuali soluzioni) su un piano di vetro. Si cerca, inoltre, di correggere il contenuto d'acqua del campione in modo che la chiusura del solco prodotto nel cucchiaio di Casagrande avvenga dopo un numero di colpi compreso tra 25 e 35.



Fig.3.16 - Cucchiaio di Casagrande e intaglio nel materiale (bentonite)

Quando il materiale è pronto per essere testato se ne dispone una porzione sul cucchiaio del dispositivo di Casagrande assicurandosi che il cucchiaio poggi sulla base. Il terreno viene spalmato in modo da coprire per circa due terzi, la superficie del cucchiaio per una profondità di circa 10mm nel suo punto più profondo. Con l'utensile solcatore si crea un solco diametrico dello spessore alla

base di 2mm (l'ideale è che le "ali" dello strumento non rimuovono materiale ai bordi del solco). Nella creazione del solco non bisogna trascinare l'utensile l'ungo il diametro del cucchiaio; il movimento deve essere il più possibile un movimento ad arco tenendo l'utensile, quindi, sempre perpendicolare alla superficie del cucchiaio.

Dopo aver controllato che sia la base che la faccia inferiore del cucchiaio non siano presenti dei residui di terreno, si aziona il motore del dispositivo. Il cucchiaio, quindi, viene fatto cadere ripetutamente da un'altezza di 10 mm e con una frequenza di 2 colpi/secondo fino a quando le due metà in cui è stato diviso il terreno non vengono in contatto nella parte inferiore del solco per una distanza di 13 mm. La chiusura del solco deve avvenire in maniera simmetrica qualche volta, infatti, capita che il solco si chiude anticipatamente a causa di bolle d'aria presenti nel campione in prossimità del solco, se accade la prova deve essere rifatta e non si tiene conto del conteggio.

Si tiene il conto del numero dei colpi necessario per la chiusura del solco (in alcuni cucchiai è presente il conta-colpi), si preleva il materiale dal cucchiaio e se ne determina il contenuto d'acqua. I residui di materiale rimanenti all'interno del cucchiaio si possono recuperare rimescolandoli con il campione a disposizione, in seguito si aggiunge un piccolo quantitativo di acqua distillata e si ripete la prova. All'aumentare del contenuto d'acqua del materiale il numero di colpi necessari a chiudere il solco diminuisce. Secondo la normativa, il numero di prove totali deve essere almeno tre, una deve produrre un numero di colpi compreso tra 25 e 35, uno tra 20 e 30 e uno ancora tra 15 e 25.

Su un grafico semilogaritmico si rappresentano i punti ottenuti con le varie prove ponendo il numero di colpi come ascisse su una scala logaritmica e i contenuti d'acqua corrispondente come ordinate. Si determina la retta interpolatrice dei punti sperimentali e si ricava quindi il contenuto d'acqua corrispondente ad un numero di 25 colpi. Questo valore è il Limite Liquido (LL o w_L).

Se in seguito a numerosi tentativi a contenuto d'acqua del campione sempre crescente, il terreno continua a scivolare nel cucchiaio o nel caso in cui il numero di colpi necessario a chiudere il solco risulti sempre inferiore a 25, si riporta come risultato che il terreno è non plastico senza eseguire il limite plastico.

3.4.2 LIMITE PLASTICO

Il limite plastico si definisce come il valore del contenuto d'acqua che caratterizza il passaggio di un terreno coesiva dallo stato plastico a quello semisolido (elevata consistenza, impossibilità di modellare la terra senza fessurazioni o sbriciolamento).

Procedura

Durante la determinazione del limite liquido con la metodologia del cucchiaio, si pone da una parte un quantitativo di materiale pari a circa 15-20g, così facendo terminato il lavoro con il limite liquido si può subito operare.

Si riduce il contenuto d'acqua del materiale lavorandolo ripetutamente sulla lastra di vetro fino a quando questo non raggiunga una consistenza tale da non attaccarsi alle mani durante l'arrotolamento. Nel caso in cui il processo di essiccamento descritto si prolunghi (ore), questo può essere velocizzato sottoponendo il campione ad aria prodotta ad esempio da un asciugacapelli. Se il materiale risulta idoneo ad essere arrotolato si procede utilizzando una porzione di campione di circa 2-3 g. e partendo da una massa di forma ellissoidale la si fa ruotare tra il palmo della mano e la base di lavoro in vetro. Si cerca di ottenere così facendo un bastoncino di 3.2 mm di diametro e circa 100 mm di lunghezza in un tempo non maggiore di 2 min. Nel caso in cui la massa di terreno trattata presenta delle fratture, si spezza o si sbriciola prima di arrivare alla condizione critica indicata in precedenza, già al primo tentativo significa che il contenuto d'acqua risulta troppo basso per procedere e si deve rimediare aggiungendo dell'acqua all'intero campione originale.

Nel caso contrario, raggiunta la condizione critica senza che si presenti alcuna frattura, significa che il materiale si presenta al di sopra del proprio limite liquido e quindi che va diminuito il quantitativo di acqua distillata. Si rimodella quindi il bastoncino portandolo ad avere una massa di forma ellissoidale e si fa ruotare con le mani in modo da ottenere nuovamente un diametro di 3.2 mm. Se il campione si sfalda o si sbriciola prima del raggiungimento della geometria limite non importa il contenuto d'acqua del campione può essere ritenuto valido per la determinazione del limite plastico e verrà conservato in un recipiente di vetro chiuso da coperchio.

Si itera la procedura su altre porzioni di materiale di circa 2-3 g fino a riempire un recipiente in vetro con coperchio con almeno 6g (minimo 2 bastoncini, per poter avere un valore mediato). Il contenuto d'acqua del materiale così ottenuto è il valore del Limite Plastico (PL).

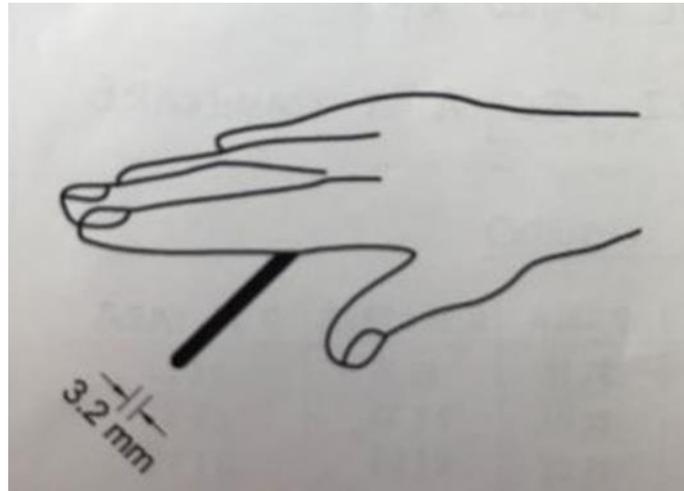


Fig.3.17 - procedura per la determinazione del limite plastico (Lancellotta, 2004)

Si introduce infine un ulteriore parametro: l'indice di plasticità PI, ottenuto con una semplice differenza:

$$PI = W_L - W_P$$

che rappresenta l'intervallo di contenuto d'acqua entro il quale un terreno si comporta plasticamente.

3.5 PROVA DI TAGLIO ANULARE

La prova di taglio anulare consente di determinare la resistenza al taglio residua, ossia il valore minimo attorno al quale la resistenza di una terra si stabilizza a seguito di un'elevata deformazione. L'angolo di resistenza al taglio residuo è un parametro geotecnico di notevole interesse nello studio della meccanica delle terre in particolar modo nell'ambito della stabilità dei pendii.

Questa apparecchiatura presenta diversi vantaggi rispetto alla corrispettiva di taglio diretto, poiché presenta una superficie di scorrimento invariabile, un senso di rotazione univoco ed una distribuzione delle tensioni tangenziali e verticali verosimilmente uniformi sul provino. Così facendo si attribuiscono quindi sforzi di taglio continui, che favoriscono l'orientamento delle particelle argillose di forma allungata, lungo il piano di taglio.

3.5.1 Descrizione dell'apparecchiatura

L'apparecchiatura di taglio anulare "Bromhead Ring Shear Apparatus" possiede una serie di trasduttori (due celle di carico e un trasduttore di spostamento verticale LVDT) ed è collegata direttamente al Datalog della Controls, il quale svolge la funzione di interfaccia tra i suddetti trasduttori e il computer per la registrazione ed il controllo dei dati.



Fig. 3.18 – apparecchio di taglio anulare, Bromhead Ring Shear

La cella di taglio è costituita da due piastre, una superiore ed una inferiore, ed un cilindro in plexiglass per mantenere il provino all'interno immerso nella soluzione. La piastra inferiore è rigidamente collegata al basamento rotante e presenta una rientranza di forma anulare in cui verrà alloggiata una pietra porosa. La piastra superiore, invece, è costituita da una testa troncoconica per consentire l'applicazione del carico verticale ed alla base della quale è applicata un'altra pietra porosa di forma anulare. Le due pietre porose sono appositamente corrugate per garantire un ottimale grado di incastro tra il provino e la pietra stessa. Può inoltre essere presente un anello di plastica (verde in fig.3.19) che andrà posto prima della piastra superiore. Serve a contrastare l'evaporazione naturale dell'acqua presente nella soluzione all'interno della cella (fondamentale per le prove a differente concentrazione salina, trattate in questa tesi)



Fig. 3.19 - componenti cella di taglio anulare

La piastra inferiore rigidamente collegata alla base rotante, può ruotare, al contrario quella superiore troncoconica è immobilizzata da due bracci rigidamente connessi alle due celle di carico atte alla misurazione della coppia torsionale resistente prodotta dalle forze di taglio che si generano sul piano di scorrimento. La pressione verticale, con cui il provino di terreno viene fatto consolidare, viene applicata mediante un sistema di trasmissione a leve (rapporto di leva 10:1) mentre la rotazione viene generata da un motore elettrico con velocità di rotazione variabile da

0.001gradi/min a 65 gradi/min. I trasduttori di carico, devono essere posizionati nelle apposite sedi imponendo la massima simmetria possibile, per garantire che durante l'esecuzione della prova, siano sottoposti al medesimo carico. L'intervallo ideale del trasduttore di spostamento, ricavato dalla curva di taratura calcolata durante la messa a punto dell'apparecchiatura, è compreso tra 4 mm e 8 mm (rispetto alla corsa completa da 0 mm a 12 mm). Per tale ragione il trasduttore di spostamento verticale LVDT è posizionato in modo da avere una lettura pari a circa 8 mm durante la preparazione preliminare della prova, in modo tale da rispettare la taratura dello strumento e di non perdere dati (se il trasduttore va "fuori corsa", non legge il dato). Nella fig. 3.20 si può notare il trasduttore di spostamento (in alto) e i due delle celle di carico (in basso)



Fig. 3.20 - cella di carico e trasduttori

3.5.2 PREPARAZIONE DEI PROVINI

Poiché l'altezza massima del provino è di soli 5 mm questo comporta che il materiale utilizzato dalla prova non può contenere grani maggiori di 0.425mm (setaccio 40 ASTM). Il materiale è stato quindi lavorato per mezzo di un pestello fino ad essere ridotto in polvere, passante al setaccio previsto.

Successivamente viene impastato con la soluzione prevista, utilizzando un quantitativo pari a 1,2 volte il limite liquido ottenuto per essa. Si riempie l'anello con delle spatole evitando spazi vuoti e si allinea il tutto con un regolo, cercando di non applicare alcuna pressione. Il quantitativo di materiale secco all'interno è fortemente dipendente dalla combinazione materiale-soluzione e quindi non è possibile stabilire un valore di riferimento.



Fig. 3.21 – pestellatura del materiale (a sinistra) e riempimento della piastra inferiore (a destra), (illite)

E' inoltre buona norma tra una prova e la successiva, immergere le pietre porose in acqua distillata e portare il tutto ad ebollizione per almeno 15-20 minuti, in modo da liberare completamente le porosità delle pietre da qualsiasi impurità (a maggior ragione in queste prove in cui si utilizzano soluzioni saline a differente molarità).

3.5.3 PROCEDURA DI PROVA

Per determinare i parametri di resistenza residua, è prevista l'esecuzione di 3 cicli di carico (consolidazione-rottura), con l'applicazione dei carichi verticali in successione geometrica. In seguito il calcolo avverrà tracciando l'involuppo di resistenza residua per ogni singolo campione, sottoposto a queste tre fasi di carico.

Capitolo 3

Carico 1	49 kPa
Carico 2	98 kPa
Carico 3	196 kPa

Ciascuno dei 3 incrementi di carico è composto da 4 fasi:

- applicazione del carico verticale σ'_v e relativa consolidazione;
- rottura veloce: per la creazione della superficie di rottura
- dissipazione delle sovrappressioni presenti all'interno del materiale;
- rottura lenta fino al raggiungimento della resistenza residua (stabilizzazione della τ).

Preparazione dell'apparecchiatura

Per prima cosa si apre il programma di acquisizione dati *GEO2000*, nel menù *archivio* si sceglie l'opzione *nuova prova*, poi si sceglie la tipologia di prova e si provvede alla compilazione delle schermate successive richiedenti svariati dati tra cui le dimensioni del provino (fig.3.22)

The image shows two overlapping windows from the GEO2000 software. The left window, titled "Prova di taglio diretto", contains the following fields: "Nome prova", "Cliente", "Indirizzo", "Sito", "Profondità", "Sondaggio", "Campione", "Data prelievo", "Data prova" (with the value "24 APR 2018" entered), and "Note". Below these fields are buttons for "Misura provino", "OK", and "Annulla". The right window, titled "Caratteristiche fisiche per la prova", contains the following fields: "Sezione provino", "Altezza iniziale", "Altezza finale", "Num Tara 1", "Peso Tara 1", "Tara+p.unido iniziale", "Num Tara 2", "Peso Tara 2", "Tara+p.unido finale", "Tara+p.provino secco", and "Peso specifico grani". Below these fields are buttons for "OK" and "Annulla".

Fig.3.22 - schermata iniziale dati prova di taglio (software GEO2000)

Eseguito il passaggio preliminare, si può posizionare il provino appena preparato all'interno dell'apparecchiatura; si posiziona il coperchio superiore e si tarano i trasduttori di carico in modo

che entrambi siano quasi a contatto con i bracci di tale coperchio. Terminata la fase di preparazione, il provino è pronto per essere testato.

Primo gradino di carico

Prima dell'applicazione del carico, bisognerebbe sempre controllare il corretto funzionamento del sistema di acquisizione alterando manualmente la misura di un trasduttore e simultaneamente verificare la variazione a video del segnale (fig. 3.23)

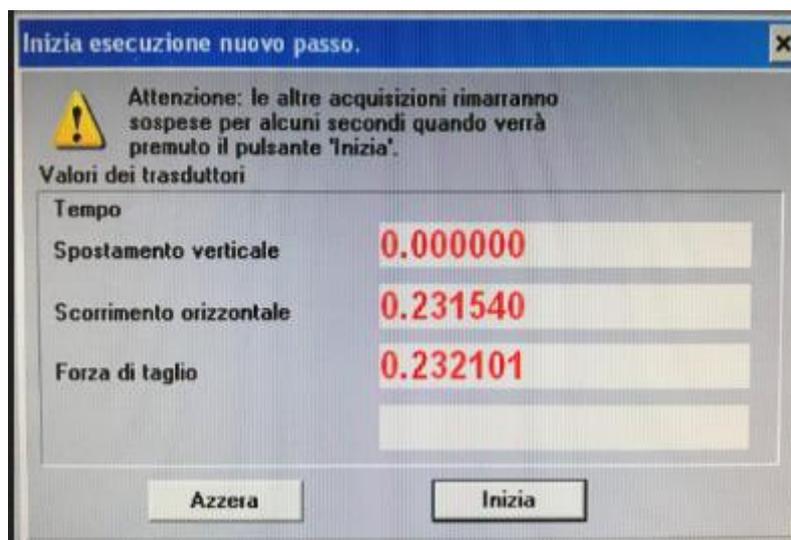


Fig. 3.23 - Nuovo passo di prova e controllo dei trasduttori (software GEO2000).

Nel passo successivo si sceglie la legge di temporizzazione per l'acquisizione, la quale varia in base alla fase di prova in atto. Il programma dispone di due diverse equazioni al fine di ottimizzare l'intervallo di acquisizione dati dipendente dalla fase eseguita:

- a) Legge esponenziale $T(i) = A \cdot B^{(i)}$ (per le fasi di consolidazione)
- b) Legge polinomiale $T(i) = A \cdot (i)^B$ (per le fasi di rottura)

dove T è espresso in minuti e " i " rappresenta la variabile, cioè il numero della lettura che si incrementa di uno ogni volta che viene acquisita una serie di dati.

Inseriti i valori dei coefficienti A e B , si può procedere con l'applicazione del carico verticale.

Vediamo ora nel dettaglio le varie fasi della prova:

a) Consolidazione

La durata della fase di consolidazione primaria è strettamente dipendente dalla conducibilità idraulica e rigidità del materiale e generalmente la sua durata non supera le due ore; tale fase si ritiene terminata quando la curva tempo-spostamento verticale risulta tangente ad un asintoto orizzontale. Si considerano quindi concluse le variazioni di volume legate alla fuoriuscita di acqua per dissipazione delle pressioni interstiziali. Il primo gradino di 49 kPa viene di norma separato in due gradini di carico passando prima da 24,5 kPa, attendendo che si raggiunga l'asintoto orizzontale e successivamente viene aggiunto un secondo peso, per ottenere il valore totale di carico. Il motivo risiede nel fatto che un elevato carico iniziale potrebbe rovinare il provino e falsare l'intera prova. In questa fase, all'inizio si parte con un intervallo breve che aumenta al procedere del passo, quindi i coefficienti assegnati saranno per la legge esponenziale:

$$A=0,05 \text{ e } B=1,50$$

Nel caso di prove in cui il liquido di cella sia una soluzione salina, è consigliabile riempire la cella solo qualche istante prima dell'applicazione del primo carico. La presenza del sale potrebbe portare dei cedimenti che non verrebbero rilevati.

b) Rottura veloce

Terminata la fase di consolidazione si prosegue con una fase di "pre-taglio". Si applica una rotazione veloce al campione per generare in un tempo ragionevolmente breve una superficie di rottura ben definita. Generalmente si effettuano 2 giri completi ad una velocità di 6 gradi/min. Per la fase di rottura veloce si ha un intervallo costante (una lettura al minuto) e i coefficienti assegnati saranno per la legge polinomiale:

$$A=1,00 \text{ e } B=1,00$$

c) Dissipazione delle sovrappressioni interstiziali Δu

Tra le due fasi di rottura, si lascia riposare il provino in modo da permettere al terreno di dissipare le sovrappressioni interstiziali che si sono eventualmente prodotte durante la fase di rottura veloce. Questo passo utilizza la stessa procedura e le stesse equazioni per la legge dei

tempi delle acquisizioni della prima consolidazione. In condizioni normali, l'andamento dello spostamento verticale risulta quasi costante (o con variazioni dell'ordine del millesimo di mm, quindi irrilevanti). Di norma si attendono comunque almeno 20-30 minuti prima di passare al passo successivo.

d) Rottura lenta

Per garantire che la prova possa essere considerata drenata, la velocità di rotazione del provino deve essere sufficientemente lenta per impedire la formazione di sovrappressioni interstiziali. La velocità consigliata dalla normativa è molto lenta, pari a 0.048 gradi/min. Per la fase di rottura si ha un intervallo costante (una lettura ogni 5 minuti) e i coefficienti assegnati saranno per la legge polinomiale:

$$A=5,00 \text{ e } B=1,00$$

La condizione residua viene considerata raggiunta quando la coppia torsionale resistente si assesta, al procedere della rotazione, su un campo di valori ristretto. Per tale lavoro questa fase dura all'incirca 4 giorni nei quali il programma acquisisce più di 1000 letture.

Secondo e terzo gradino di carico

Terminato il primo ciclo di carico (49 kPa), si prosegue sullo stesso provino con i due successivi livelli di carico fino al termine. Tutte le fasi successive sono le medesime di quelle precedentemente descritte, per una durata di prova complessiva di 12 giorni.

Per ogni valore di tensione verticale σ'_v si otterrà un valore τ di tensione tangenziale residua. Le tre coppie ottenute, vengono interpretate mediante un involuppo lineare dal quale si ricava il valore di angolo di resistenza residuo.

Terminata la prova, è possibile smontare l'apparecchiatura di prova togliendo per prima cosa il liquido di cella. Il materiale del provino viene prelevato con opportuni strumenti e pesato umido, in seguito viene messo in forno ad essiccare per almeno 24h ed il giorno seguente pesato nuovamente in condizioni secche. Note le due pesate, si ricava il valore dell'indice dei vuoti.

3.6 PROVA EDOMETRICA

La prova edometrica viene utilizzata per riprodurre in laboratorio, le condizioni di consolidazione monodimensionale di un terreno. Tratteremo esclusivamente la modalità più comune ovvero quella ad incrementi di carico, che consiste nell'applicare una sequenza di carichi ad un provino cilindrico contenuto lateralmente, in modo che le deformazioni e il flusso dell'acqua avvengano solo in unica direzione (quella verticale).

In questa semplice prova, si applica una sequenza predefinita di carichi, ciascuno dei quali si mantiene invariato per un periodo di tempo (di solito 24 h) sufficiente a garantire la completa dissipazione delle sovrappressioni dell'acqua interstiziale che l'applicazione del carico ha generato.

Durante l'intero processo di consolidazione viene rilevato il cedimento subito dal provino, e i dati così ottenuti sono utilizzati per determinare i parametri di compressibilità.

3.6.1 DESCRIZIONE DELL'APPARECCHIATURA

L'apparecchiatura edometrica consiste in un anello rigido il quale contiene il provino, una base ed una testa di carico e due pietre porose poste tra queste e il provino.



Fig.3.24 - celle di carico edometriche: Tecnotest (a sinistra) e Wikeham-Farrance (a destra)

Le due pietre porose, posizionate a contatto con le superfici superiore e inferiore del provino, consentono il drenaggio dell'acqua durante la fase di consolidazione. L'insieme precedentemente descritto è posto, per mezzo di una corona di centraggio, nella cella edometrica, la quale generalmente verrà riempita con acqua distillata (o differenti soluzioni saline), in modo da prevenire l'essiccamento del materiale nel corso della prova e da fornire l'acqua di assorbimento durante la fase di scarico (rigonfiamento).

Le dimensioni dei provini edometrici sono state decise in passato, per sopperire a diverse esigenze: la volontà di avere campioni rappresentativi della macrostruttura presente in sito tenderebbe ad utilizzare campioni di grosse dimensioni, ma risulta irrealizzabile viste le dimensioni dei campionatori correntemente in uso. Si è deciso che il provino utilizzato per una prova edometrica debba avere un diametro minimo di 50 mm ed il rapporto tra diametro e altezza del provino dovrebbe risultare superiore a 2.5 al fine di ridurre al minimo gli effetti dell'attrito laterale e in ogni caso inferiore a 6 per evitare di avere un provino troppo sottile e quindi di difficile preparazione. Inoltre l'altezza del provino non può essere inferiore a dieci volte la massima dimensione delle particelle costituenti il materiale da sottoporre a prova. Le pietre porose devono essere costituite da materiali non attaccabili chimicamente dai fluidi interstiziali del terreno e comunque non reagenti con altre parti dell'attrezzatura. La porosità deve essere tale da assicurare un libero deflusso dell'acqua nel corso della prova. Al fine di evitare che parte del materiale del campione penetri nei pori delle pietre porose, deve essere interposto un dischetto di carta da filtro avente caratteristiche di conducibilità idraulica idonee. In commercio tra le più utilizzate si cita la carta da filtro tipo Whitman's n. 54.

3.6.2 PROCEDURA DI PROVA

Il provino va preparato in una camera con umidità controllata in modo da minimizzare fenomeni di evaporazione. In ogni caso le condizioni ambientali devono essere tali da assicurare che durante la preparazione il provino non subisca variazioni del contenuto d'acqua maggiori dell'1%.

Si dispone la cella edometrica sul telaio preposto per l'applicazione dei carichi.



Fig.3.25 - Edometri: Tecnotest (a sinistra) e Wikeham-Farrance (a destra)

Si riempie la cella di acqua e si registrano gli spostamenti del micrometro. Si aggiungono dei piccoli carichi in modo da contrastare la tendenza al rigonfiamento del provino e si continua fino a quando il provino non manifesta tendenza alla compressione. Gli incrementi di pressione verticale successivi $\Delta\sigma_v$ sono applicati in progressione geometrica. Pertanto, per l'incremento n-esimo della serie deve essere:

$$\frac{(\Delta\sigma_v)_n}{(\sigma_v)_{n-1}} = \text{cost}$$

dove $(\sigma_v)_{n-1}$ è la pressione efficace precedentemente applicata. Di norma questo rapporto vale 1 così che una sequenza di incrementi frequentemente utilizzata è quella mostrata in tab. 3.2

Wykeham-Farrance			Tecnotest	
Rapporto leva	11	11	10	Rapporto leva
ϕ provino [mm]	50	100	50,46	ϕ provino [mm]
Pesi di piombo (g)	σ_v (kPa)	σ_v (kPa)	σ_v (kPa)	Pesi di piombo (g)
223	12,3	3,1	12,3	250
446	24,5	6,1	24,5	500
892	49,0	12,3	49,0	1000
1785	98,1	24,5	98,1	2000
3570	196,1	49	196,1	4000
7140	392,3	98,1	392,3	8000
14280	784,5	196,1	784,5	16000
2 * 14280	1569,1	392,3	1569,1	2 * 16000
4 * 14280	3138,1	784,5	3138,1	4 * 16000

Tab 3.2 - progressione carichi e pesi da applicare per i due diversi edometri (prova standard)

La fase di scarico è eseguita imponendo un numero di intervalli almeno pari a metà di quello utilizzato in fase di carico. In argille normalconsolidate per poter definire correttamente l'andamento della curva nel tratto di compressione il carico verticale deve raggiungere valori pari a circa $8\sigma_p$; mentre in argille sovraconsolidate può essere necessario un carico decisamente superiore. Data la bassa permeabilità dei terreni coesivi, i cedimenti conseguenti all'applicazione di ogni gradino di carico si sviluppano lentamente nel tempo. Ogni incremento di carico, pertanto, deve essere mantenuto per un periodo di tempo necessario a che si sviluppino gli assestamenti del provino (di norma questo tempo è assunto pari a 24 h).

3.6.3 ACQUISIZIONE DATI

Preparato in campione all'interno della cella e posizionata quest'ultima nell'apposita sede si procede all'inizio della prova. Per acquisire i dati si utilizza un software apposito, a cui sono collegati dei trasduttori di spostamento. Successivamente si posizionano i trasduttori a contatto con la cella e si esegue l'azzeramento della lettura. I trasduttori leggono una differenziale di potenziale in Volt,

il programma in automatico trasforma il valore in millimetri. Durante la prova bisogna inoltre fare attenzione a rimanere nei limiti strumentali del trasduttore (non andare fuori corsa)

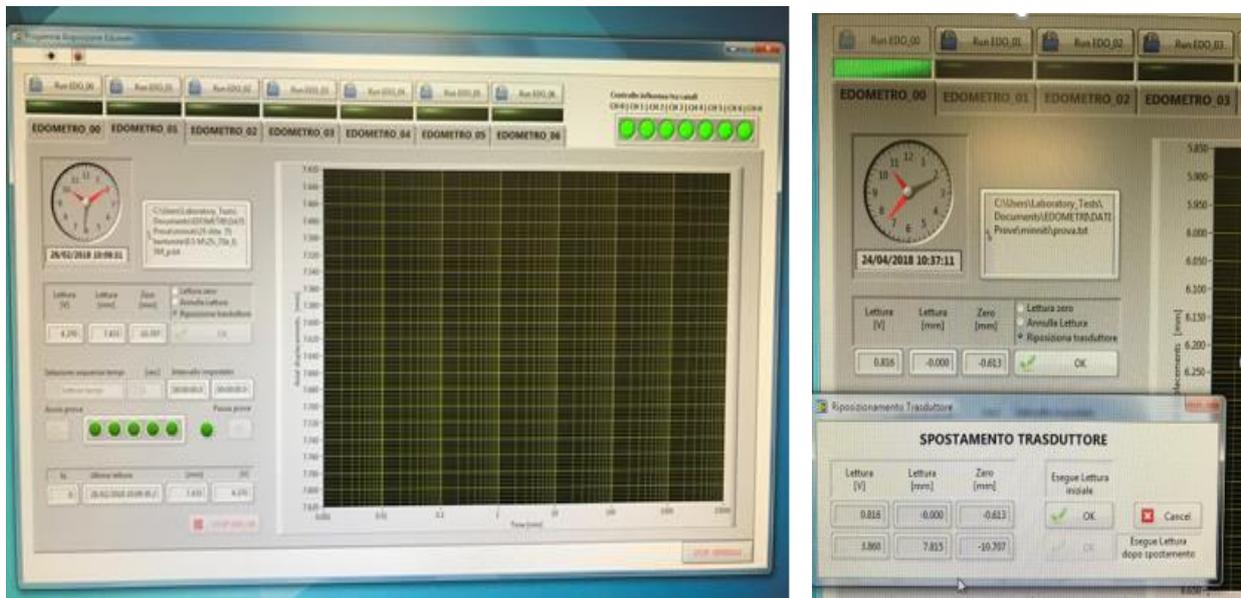


Fig.3.26 - software acquisizione dati edometri: lettura zero e spostamento del trasduttore

Terminate le operazioni preliminari, si passa all'assegnazione del primo carico, secondo la procedura vista in precedenza.

3.6.4 ELABORAZIONE DATI

Per ogni gradino di carico si riporta l'andamento dei cedimenti (d) nel tempo (t). Per valutare sperimentalmente il coefficiente di consolidazione esistono due strade: il metodo di Casagrande (non trattato) o il metodo di Taylor (utilizzato in questo studio).

Metodo di Taylor

Si diagrammano i cedimenti in funzione della radice quadrata del tempo (\sqrt{t} , d).

Su questo piano, si traccia la retta interpolatrice della parte lineare della curva (prime acquisizioni); ed una retta parallela costruita dall'insieme dei punti che hanno le stesse ordinate della retta interpolatrice ma valore delle ascisse aumentato del 15%. Il punto di intersezione di questa retta con la curva dei dati sperimentali indica il valore del t_{90} a cui corrisponde un cedimento del 90%. Lo zero corretto viene ottenuto prolungando la retta interpolatrice alla curva fino ad intersecare l'asse delle ordinate.

A questo punto posso calcolare il coefficiente di consolidazione primario tenendo presente che per grado di consolidazione $U_m = 0.9$ si ha:

$$T_v = 0.848 = \frac{c_v \cdot t}{H^2}$$

da cui :

$$c_v = \frac{0.848 H^2}{t_{90}}$$

dove H è un valore medio:

$$H_m = H_0 - d_{50}$$

Per calcolare il d_{50} necessario alla valutazione di H_m (percorso di drenaggio medio) si determina il d_{100} :

$$d_{100} = \frac{d_{90} - zero_{corr.}}{0.9} + zero_{corr.}$$

da cui si determina il d_{50} :

$$d_{50} = \frac{zero_{corr.} + d_{100}}{2}$$

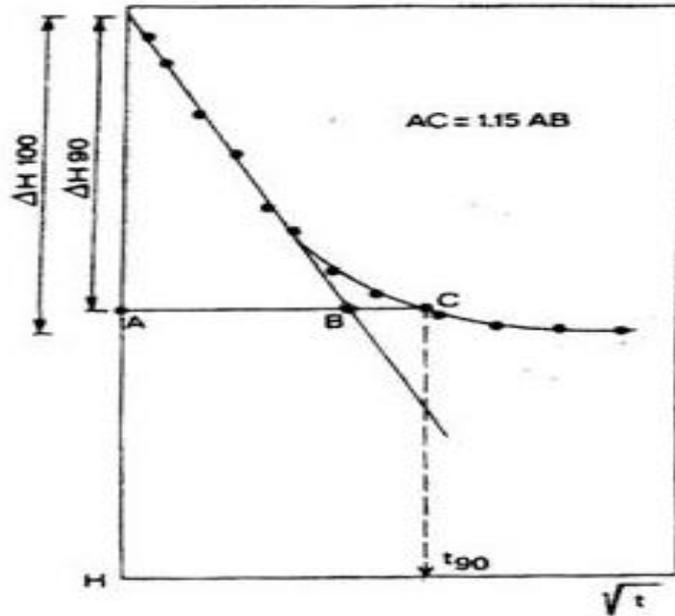


Fig.3.27 - determinazione di C_v con il metodo di Taylor (Lancellotta, 2004)

Si riportano alcuni parametri ricavabili dall'esecuzione della prova edometrica:

Modulo edometrico M

Il modulo edometrico è espresso dalla relazione:

$$M = \frac{\sigma'_v}{\Delta \varepsilon_z} \quad [kPa] = \left[\frac{kN}{m^2} \right]$$

dove ε_z per ogni gradino di carico è la deformazione pari al rapporto tra il cedimento avvenuto e l'altezza iniziale del provino:

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta H}{H_0} \quad [-]$$

Conducibilità idraulica K

Per calcolare la conducibilità idraulica sapendo che:

$$c_v = \frac{K}{\gamma_w \cdot m_v} \left[\frac{m^2}{sec} \right]$$

c_v = coefficiente di consolidazione primaria

$m_v = \Delta \varepsilon_v / \Delta \sigma_v$ coefficiente di compressibilità (inverso del modulo edometrico)

γ_w = peso specifico dell'acqua pari a $9.80665 \left[\frac{kN}{m^3} \right]$

Poiché: $m_v = 1 / M$ dove M è il modulo edometrico si ha:

$$K = \frac{c_v \gamma_w}{M} \left[\frac{m}{sec} \right]$$

Curva di Compressibilità

Dopo aver per ogni gradino di carico, ottenuto le curve dei cedimenti in funzione del tempo, il passo successivo riguarda la costruzione della curva di compressibilità che si ottiene riportando i valori dell'indice dei vuoti (o alternativamente della deformazione verticale $\varepsilon_z = \frac{\Delta H}{H_0}$) in funzione del

logaritmo della tensione verticale efficace σ'_v . I cedimenti si possono riportare sia con riferimento alle 24 ore o i corrispondenti al t_{100} (fine consolidazione primaria). La curva di compressibilità così ottenuta, consente di caratterizzare il comportamento volumetrico del provino.

E' inoltre possibile ricavare i parametri di compressibilità che risultano essere i coefficienti angolari dei tratti di ricomprensione, compressione e scarico (ovvero i tre tratti a differente pendenza in cui si divide la curva edometrica). Questi parametri vengono definiti rapporto o indice a seconda che ci si riferisce alla curva ($\log \sigma_v, \varepsilon_z$) oppure alla curva ($\log \sigma_v, e$).

Rapporto di Ricomprensione $RR = \frac{\Delta \varepsilon_v}{\Delta \log \sigma_v}$

Indice di ricomprensione $C_r = \frac{-\Delta e}{\Delta \log \sigma_v}$

Identiche formule riferiti ai tratti di compressione e rigonfiamento (scarico) portano alla definizione del rapporto di compressione e indice di compressione, e rapporto di rigonfiamento (scarico) e indice di rigonfiamento (scarico).

Per quanto riguarda la procedura di prova va osservato che ancora oggi è prassi per molti laboratori riportare i risultati di una prova edometrica facendo riferimento alle deformazioni ricavate dopo un periodo di attesa di 24 h. Poiché il processo di consolidazione (dissipazione delle sovrappressioni interstiziali) si ha in meno di un'ora, le deformazioni alle 24 h inglobano un'aliquota non trascurabile di deformazioni viscosse. Ciò comporta una traslazione in basso dei punti sperimentali con una conseguente sottostima della tensione di preconsolidazione dell'ordine del 10%.

Indice dei vuoti (e)

L'indice dei vuoti iniziale (e_0) del campione può essere calcolato:

$$e_0 = \frac{G_s \gamma_w}{\gamma_d} - 1$$

con:

$$\gamma_d = \frac{W_s}{V} = \frac{\text{peso}_{secco}}{\text{volume}_{tot.}}$$

Per ciascuna fase di carico, l'indice dei vuoti al termine della relativa consolidazione, può essere calcolato a partire dall'indice dei vuoti iniziale del provino e dalla deformazione percentuale ε_z causata dall'applicazione del carico che si sta studiando. Con l'ipotesi di solido incompressibile e di provino in condizioni sature, la variazione delle varie fasi all'interno del provino e le relative altezze è schematizzata in fig. 3.28.

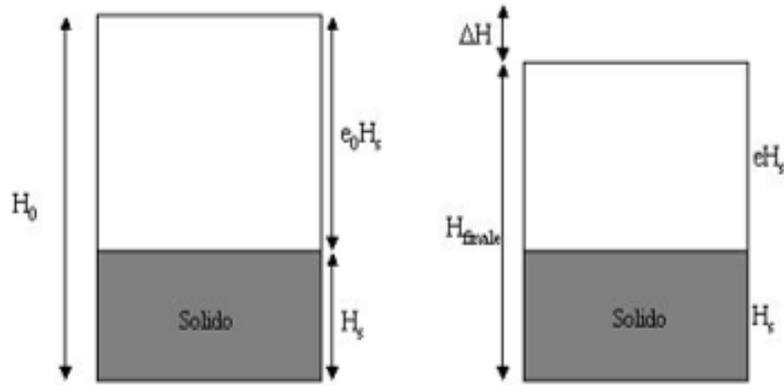


Fig. 3.28 – fasi presenti nel solido, prima e dopo l'applicazione del carico verticale

L'altezza della fase solida non cambia prima e dopo l'applicazione del carico mentre il cedimento ΔH è dovuto sostanzialmente alla variazione dell'indice dei vuoti.

Con riferimento alla fig. 3.28:

$$\Delta H = -(H_f - H_0) = -(H_s + H_s e - H_s - H_s e_0) = H_s (e_0 - e)$$

E anche:

$$\varepsilon_z = \frac{\Delta H}{H_0} = \frac{H_s (e_0 - e)}{H_s (1 + e_0)} = \frac{e_0 - e}{1 + e_0}$$

da cui posso ricavare l'indice dei vuoti e .

CAPITOLO 4

COMPORTAMENTO CHEMO-IDRO-MECCANICO DI MISCELE ILLITE-BENTONITE

Nel presente capitolo, si riportano i risultati della sperimentazione condotta su 5 miscele di illite-bentonite (entrambe nella loro forma sodica), con differenti frazioni mineralogiche, saturate sia con acqua distillata, che con soluzioni di cloruro di sodio NaCl a tre differenti concentrazioni molarari.

La caratterizzazione mineralogica e delle proprietà indice delle due argille, è stata eseguita mediante prove di diffrazione ai raggi x. Successivamente si sono determinati i limiti di Atterberg per tutte e 20 le combinazioni miscela-concentrazione.

Attraverso l'utilizzo dell'apparecchiatura di taglio anulare, si sono ricavati i parametri di resistenza al taglio, in particolare l'angolo di resistenza residuo e come varia l'involuppo di rottura. Ottenuti i valori si è studiata la dipendenza di tale angolo dall'indice di plasticità. La relazione tra angolo di resistenza al taglio residuo ed indice di plasticità, è stata quindi confrontata con relazioni analoghe di letteratura.

Per la valutazione del comportamento volumetrico, sono state eseguite 20 prove edometriche ad incremento di carico costante, imponendo un quantitativo d'acqua iniziale pari a 1,2 volte il valore del limite liquido. Mediante le curve edometriche ottenute si è valutato come gli indici di compressione e scarico dipendano dalla combinazione miscela-molarità e dall'indice dei vuoti.

I valori di conducibilità idraulica, dedotti dalle prove edometriche a partire dalle fasi di consolidazione monodimensionale, attraverso l'equazione di Terzaghi, sono stati confrontati con le previsioni del modello di Kozeny-Carman.

Parallelamente, si sono eseguite delle analisi con microscopio a scansione elettronica (SEM), preparando degli appositi campioni. Dagli ingrandimenti ottenuti, si è osservato come gli elettroliti presenti all'interno della soluzione salina modifichino la disposizione delle particelle.

4.1 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DI BASE

Diffrazione ai raggi x

Questa prova di caratterizzazione è stata eseguita preliminarmente all'intero studio, per verificare la purezza dei due minerali argillosi trattati (illite e bentonite, entrambe in forma sodica). Per tale motivo si è limitata esclusivamente ai due materiali puri e non alle varie miscele.

L'analisi è stata eseguita presso il DISAT del Politecnico di Torino. La strumentazione ha restituito un tabulato composto da coppie di valori $(2\theta, n)$, dal quale si ricavano i grafici ed i relativi picchi.

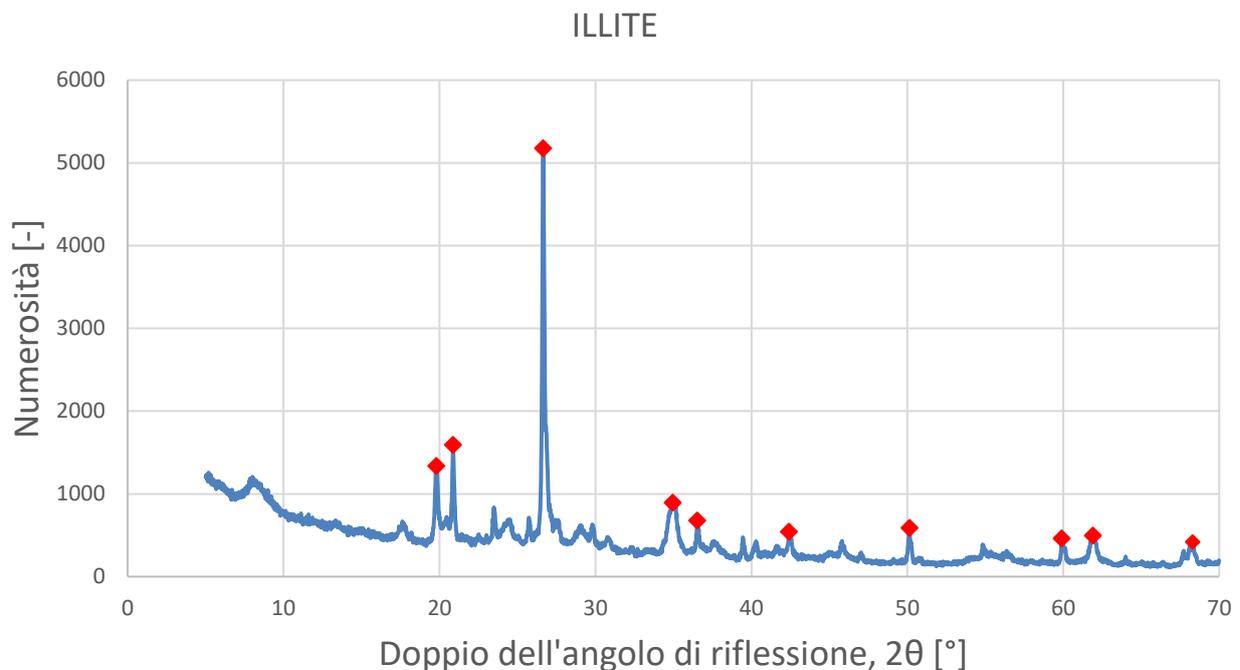


Fig. 4.1 – Prova diffrattometrica su illite e relativi picchi rilevati

Dal grafico in fig. 4.1 si nota immediatamente la presenza di un picco ad elevata numerosità, e di altri di entità minore. Scelti i picchi più rilevanti, invertendo la legge di Bragg:

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (4.1)$$

è stato possibile ricavare le distanze d e di conseguenza con l'ausilio della tab. 3.1 il minerale corrispondente a tale angolo di riflessione. (tab.4.1)

$2\theta [^\circ]$	$d [\text{Å}]$	<i>minerale</i>
19,825	4,473	illite, sepiolite
20,878	4,250	quarzo
23,543	3,774	feldspati
26,65	3,341	illite
35,035	2,558	illite, caolinite
36,582	2,454	clorite
42,471	2,126	quarzo,mica
50,154	1,817	quarzo
59,917	1,542	quarzo,illite
61,893	1,497	illite, caolinite
68,133	1,375	quarzo, clorite

Tab. 4.1 – Conversione da doppio dell'angolo di riflessione a distanza e relativi minerali (illite)

L'analisi conferma l'elevata purezza dell'illite, come si evince dal picco principale, corrispondente ad un angolo $2\theta=26,65^\circ$. Si rileva anche la presenza di quarzo, caolinite e clorite in minima parte.

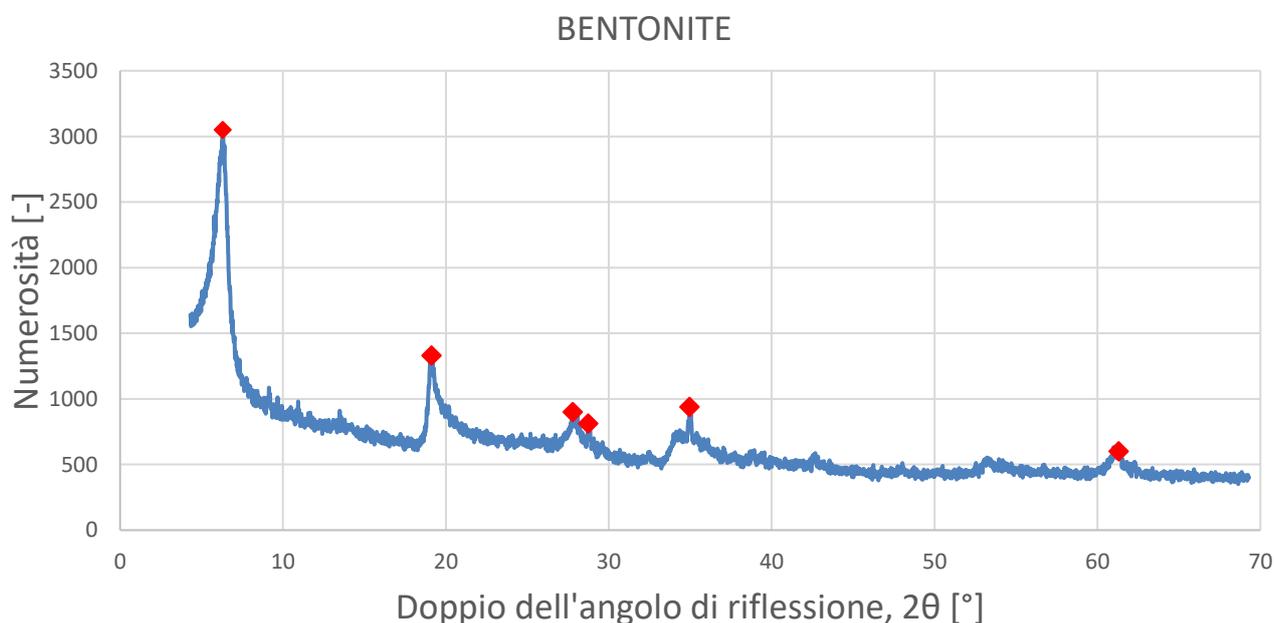


Fig. 4.2 – Prova diffrattometrica sulla bentonite e relativi picchi rilevati

Dal grafico (fig. 4.2) della prova su bentonite, si possono notare diversi picchi, in particolare il primo per bassi valori dell'angolo 2θ . La procedura è la medesima e si ottiene la tab.4.2.

$2\theta [^\circ]$	$d [\text{Å}]$	<i>minerale</i>
6,304	14,004	montmorillonite
19,135	4,633	vermiculite
27,793	3,206	mica, feldspati
28,742	3,052	montmorillonite
34,969	2,563	montmorillonite, feldspati
61,307	1,510	illite, caolinite

Tab. 4.2 – Conversione da doppio dell'angolo di riflessione a distanza e relativi minerali (bentonite)

Essendo la bentonite appartenente alla famiglia della montmorillonite, l'analisi anche in questo caso conferma la qualità del materiale come si evince dal primo picco (Fig. 4.2). Si rilevano anche modeste quantità di mica, feldspati e caolinite.

Peso specifico G_s

La bentonite presenta un peso specifico maggiore rispetto all'illite, con valori confrontabili ad altre montmorilloniti sodiche testate in studi precedenti (rif. Cap.2). Per ultimo si sono calcolati i pesi specifici delle 3 miscele di illite-bentonite, che vengono sempre indicate con i corrispettivi quantitativi (i: illite, b: bentonite) espressi in percentuale (tab. 4.3)

G_s	ILLITE	75 i 25 b	50 i 50 b	25 i 75 b	BENTONITE
$[\text{g}/\text{cm}^3]$	2,727	2,783	2,840	2,898	2,952

Tab. 4.3 – valori di G_s per miscele di illite-bentonite (percentuali riferite al peso secco)

Limiti liquidi

I limiti liquidi (W_L), ottenuti mediante prova con cucchiaio di Casagrande (rif. Cap. 3), sono riportati in Tab.4.4. Inoltre la dipendenza dei limiti liquidi dalla concentrazione di cloruro di sodio è riportata in figura 4.3.

W_L [%]	<i>MOLARITA'</i>			
	<i>0</i>	<i>0,5 M</i>	<i>1 M</i>	<i>4 M</i>
<i>ILLITE</i>	82,87	82,66	79,49	70,94
<i>75 I 25 B</i>	161,01	89,79	86,42	70,96
<i>50 I 50 B</i>	291,04	108,90	91,08	72,36
<i>25 I 75 B</i>	414,81	115,91	91,52	80,62
<i>BENTONITE</i>	534,51	131,87	93,63	82,93

Tab. 4.4 – Limiti liquidi per illite, bentonite e loro miscele, sottoposte a soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

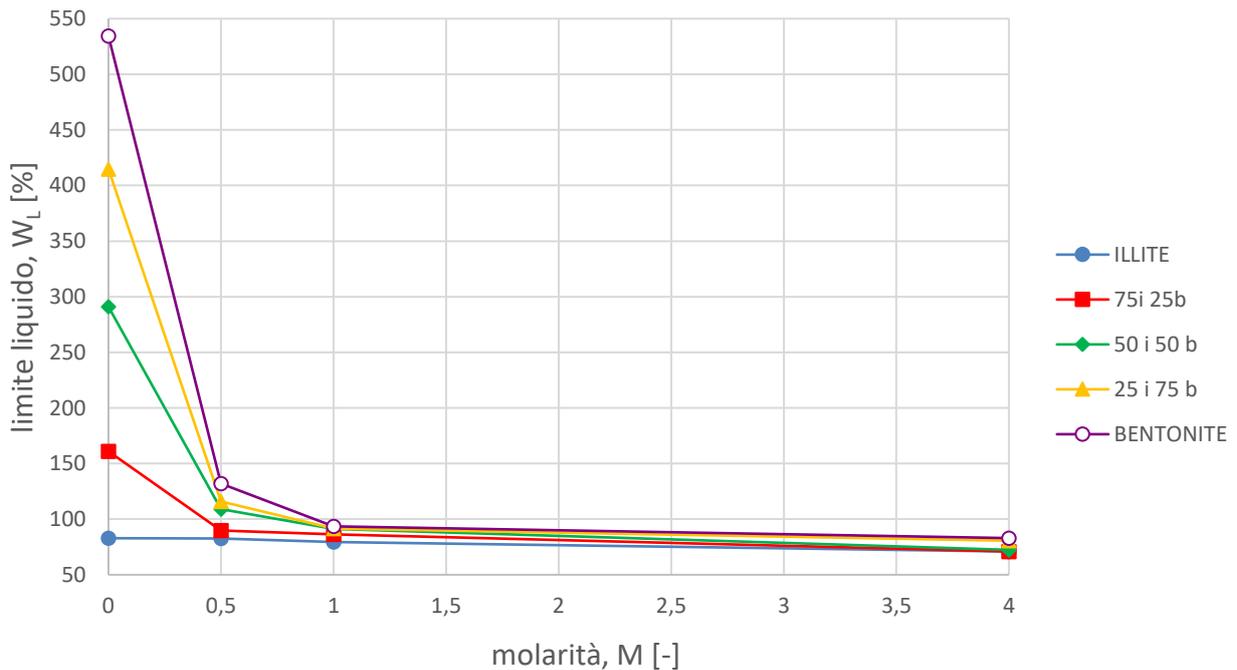


Fig. 4.3 – Limiti liquidi per illite, bentonite e loro miscele, saturate con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

Dai valori dei limiti liquidi per le varie miscele saturate con acqua distillata (0 M), si evince come la bentonite possiede un elevato limite liquido (oltre 500%), dovuto all'alta superficie specifica, al contrario l'illite risulta essere 6-7 volte inferiore. Analizzando i risultati sulle miscele si nota come i

limiti presentino valori intermedi rispetto ai due estremi e come un piccolo quantitativo di bentonite (25%) sia sufficiente per raddoppiare il limite liquido (da 82,87% per l'illite a 161.01% per la miscela 75 i - 25 b). Questo dato conferma l'elevata sensitività della bentonite all'acqua.

Dalle prove in presenza di cloruro di sodio, si nota come sia sufficiente una soluzione allo 0,5 M per abbattere notevolmente il valore nel caso della bentonite, mentre l'illite presenta un limite liquido quasi invariato. All'aumentare della concentrazione di cloruro di sodio i valori continuano a diminuire, fino ad avere quasi gli stessi valori per una concentrazione al 4 M. Questo fenomeno è dovuto alla variazione della disposizione particellare, come confermato dalle analisi al microscopio a scansione elettronica (SEM) (vedi Par. 4.4)

Limiti plastici

I valori dei limiti plastici (W_p) per le diverse miscele sono riportati in Tab. 4.5, mentre l'influenza della salinità può essere apprezzata in figura 4.4.

W_p [%]	MOLARITA'			
	0	0,5 M	1 M	4 M
ILLITE	33,38	35,04	36,50	30,88
75 I 25 B	51,25	42,18	39,94	35,42
50 I 50 B	64,58	54,80	47,59	39,91
25 I 75 B	69,76	56,95	47,87	40,17
BENTONITE	74,85	60,67	48,42	40,55

Tab. 4.5 – Limiti plastici per illite, bentonite e loro miscele, saturate con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

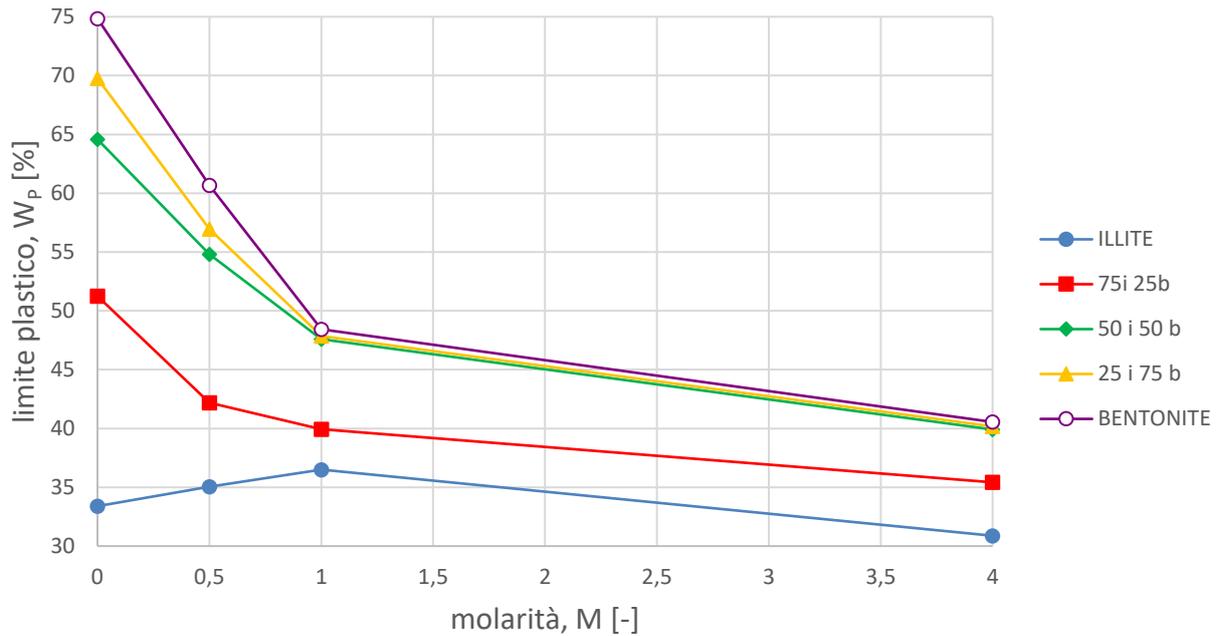


Fig. 4.4 – Limiti plastici per illite, bentonite e loro miscele, saturate con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

La bentonite risulta essere un'argilla maggiormente plastica rispetto all'illite, con un valore di tale limite doppio (74,85% contro 33,38%). Globalmente l'aumento della concentrazione salina comporta un abbassamento del limite plastico, più marcatamente nelle miscele contenenti elevate percentuali di bentonite.

Le prove su illite presentano un andamento differente, con un iniziale innalzamento del valore per basse molarità, seguito da una diminuzione al di sotto del valore in acqua distillata.

Indici di plasticità

Richiamando la definizione, ovvero:

$$PI = W_L - W_P \quad (4.2)$$

L'indice di plasticità (PI) è la differenza tra il valore del limite liquido e quello del limite plastico. I valori degli indici di plasticità, per le diverse miscele sono riportati in Tab. 4.6, mentre l'influenza della salinità può essere apprezzata in figura 4.5.

P.I. [%]	MOLARITA'			
	0	0,5 M	1 M	4 M
ILLITE	49,49	47,62	42,99	40,06
75 I 25 B	109,76	47,61	46,48	35,54
50 I 50 B	226,46	54,10	43,49	32,45
25 I 75 B	345,05	58,96	43,65	40,45
BENTONITE	459,66	71,20	45,21	42,38

Tab. 4.6 – Indice di plasticità per illite, bentonite e loro miscele, saturate con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

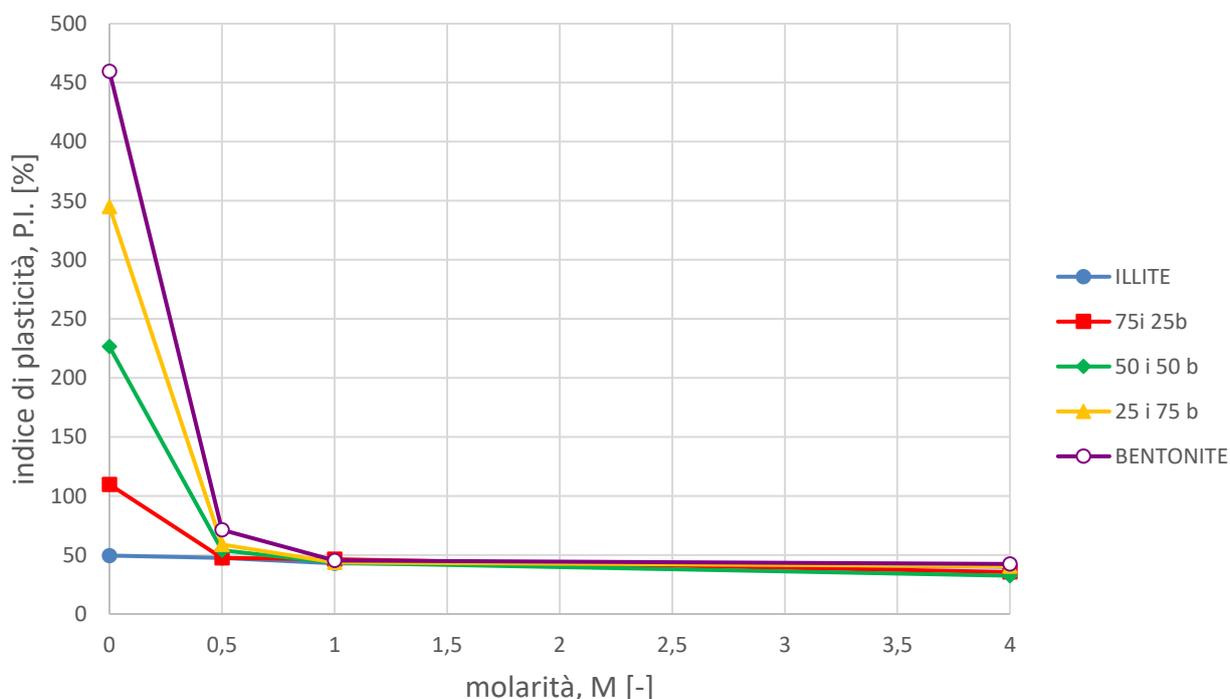


Fig. 4.5 – Indice di plasticità per illite, bentonite e loro miscele, saturate con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

Dai risultati ottenuti, si può osservare che l'indice di plasticità cresce con la frazione di bentonite e diminuisce con la concentrazione salina (per qualsiasi miscela).

4.2 RESISTENZA AL TAGLIO

La resistenza al taglio delle varie miscele di illite-bentonite, saturate da diverse soluzioni di cloruro di sodio, è stata studiata sperimentalmente con prove condotte nell'attrezzatura di taglio anulare. Quest'attrezzatura garantisce l'applicazione di sforzi di taglio su superfici a cui sono imposti spostamenti monotonicamente crescenti.

L'analisi è stata ridotta a soli 15 campioni, riportati in tabella 4.7.

	<i>MOLARITA'</i>			
	<i>0</i>	<i>0,5 M</i>	<i>1 M</i>	<i>4 M</i>
<i>ILLITE</i>	•	•		•
<i>75 I 25 B</i>	•	•		•
<i>50 I 50 B</i>	•	•		•
<i>25 I 75 B</i>	•	•		•
<i>BENTONITE</i>	•	•		•

Tab. 4.7 – Prove di taglio anulare eseguite su miscele di illite-bentonite, saturate con soluzioni di cloruro di sodio a differente concentrazione molare

4.2.1 RISULTATI PROVE DI TAGLIO ANULARE

La prova di taglio anulare prevede 3 livelli di carico e per ognuno di essi mediante l'elaborazione dei dati, si ottiene la tensione tangenziale residua relativa, infine si riportano le coppie di valori nel diagramma σ' / τ_r .

Utilizzando il criterio di resistenza di Mohr-Coulomb, si può ricavare la retta che meglio rappresenta l'involuppo di rottura, mediante un'interpolazione lineare. L'equazione seguente rappresenta il criterio di Mohr-Coulomb in condizioni residue:

$$\tau_r = \sigma' \cdot \operatorname{tg} \varphi'_r + c'_r \quad (4.3)$$

dove: φ'_r è l'angolo di resistenza al taglio residuo

c'_r è la coesione in condizioni residue

Per le miscele studiate in questo lavoro si ipotizza nulla la coesione, cioè si impone una retta avente un'intercetta nulla, da cui è possibile ottenere il valore dell'angolo di resistenza al taglio residuo.

Si riportano ora i risultati delle prove suddivisi in base alla miscela illite-bentonite sottoposta alle tre prove di taglio anulare. Per i singoli involuipi si rimanda all'appendice.

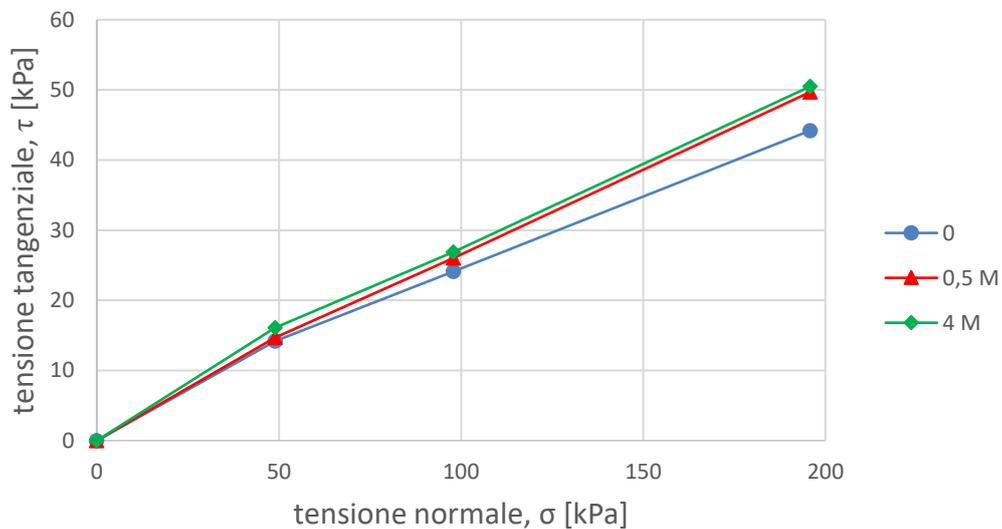


Fig. 4.6 – Involuipi di rottura, prove di taglio anulare su illite saturata con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

La resistenza al taglio dell'illite pura presenta una modesta dipendenza dalla concentrazione del liquido interstiziale (Fig.4.6). La presenza del cloruro di sodio innalza di poco il valore dell'angolo di resistenza che passa da $13,1^\circ$ a $14,8^\circ$. Gli involuipi si presentano quasi rettilinei.

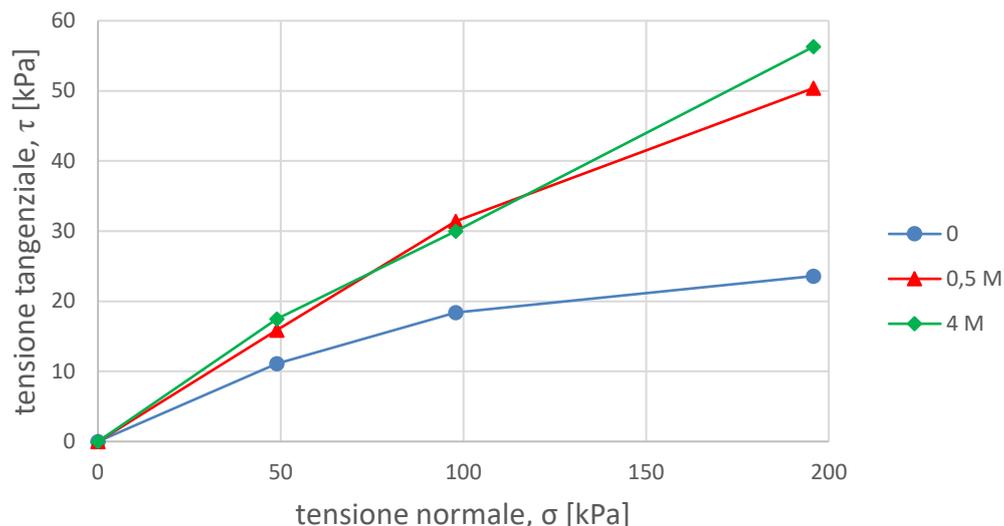


Fig. 4.7 – Involuppi di rottura, prove di taglio anulare su bentonite saturata con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

La bentonite (Fig. 4.7) al contrario, come già anticipato dall'analisi sui limiti liquidi, risulta essere un minerale molto sensibile alla presenza di soluzioni saline. Le differenze si apprezzano sia come valori di angolo di resistenza residuo che vale $7,9^\circ$ in acqua distillata e $16,4^\circ$ per la soluzione 4 molare (il doppio), sia come involucro di rottura. La prova in acqua distillata mostra un andamento fortemente non lineare, con un andamento curvilineo con concavità verso il basso. All'aumentare della concentrazione di cloruro di sodio, la curva tende a linearizzarsi.

Dall'ultima osservazione si evince come il criterio di rottura di Mohr-Coulomb non risulti particolarmente adatto per certe condizioni, si studia quindi una diversa legge per l'interpolazione dei dati sperimentali. La legge logaritmica (4.4) risulta essere la migliore:

$$\log \tau = \alpha \log \sigma' + \beta \quad (4.4)$$

Nel caso della bentonite saturata con acqua distillata, i coefficienti valgono $\alpha=0,90$ e $\beta= -0,57$

Si riportano anche i risultati delle prove sulle miscele illite-bentonite:

Comportamento chemo-idro-meccanico di miscele illite-bentonite

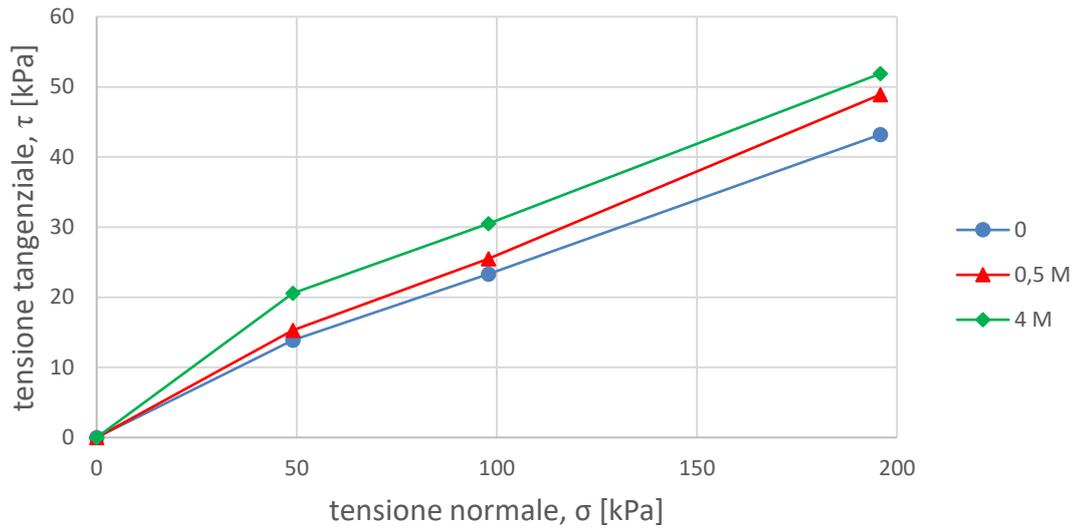


Fig. 4.8 – Involuppi di rottura, prove di taglio anulare su una miscela composta da 75% di illite e 25% di bentonite, saturata con soluzioni di cloruro di sodio a diverse molarità

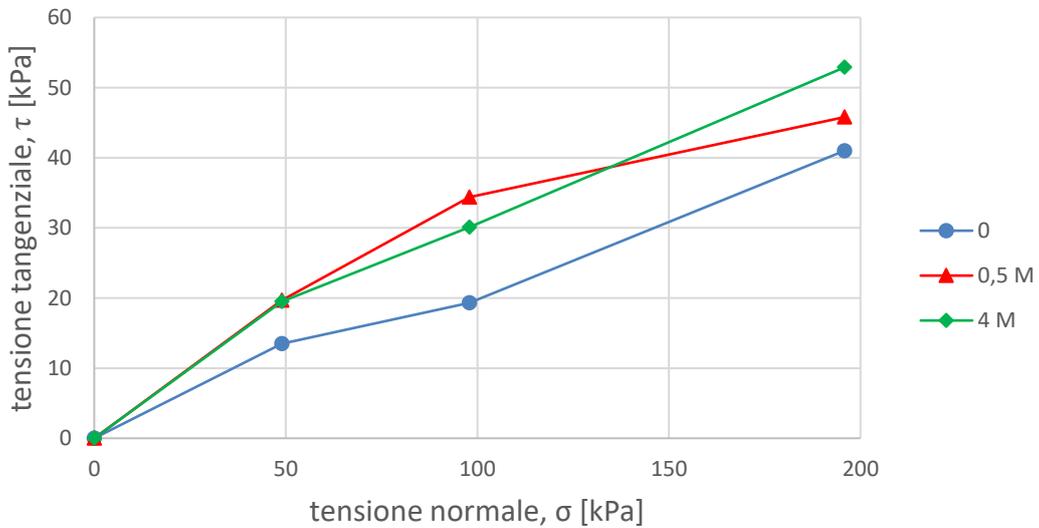


Fig. 4.9 – Involuppi di rottura, prove di taglio anulare su una miscela composta da 50% di illite e 50% di bentonite, saturata con soluzioni di cloruro di sodio a diverse molarità

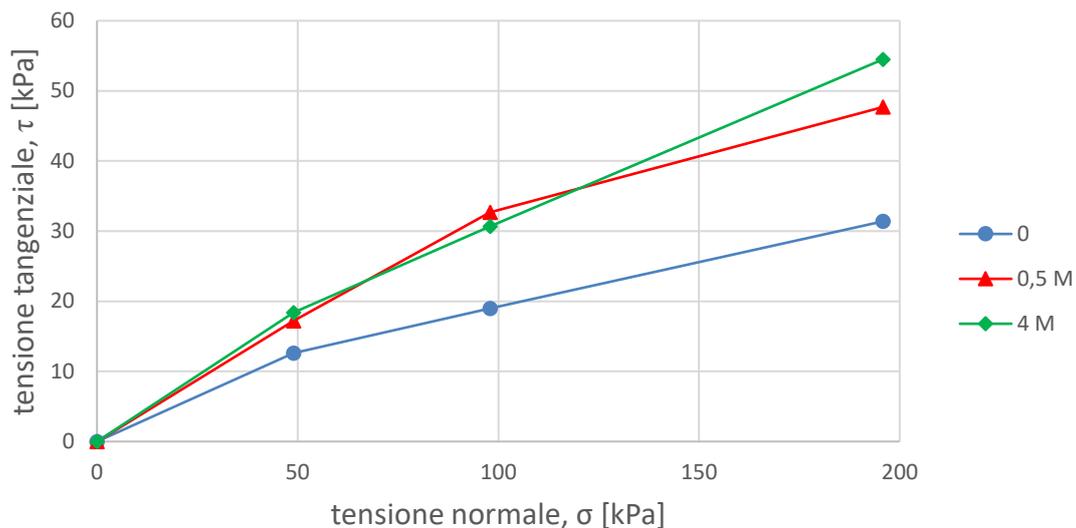


Fig. 4.10 – Involuppi di rottura, prove di taglio anulare su una miscela composta da 25% di illite e 75% di bentonite, saturata con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

Analizzando i grafici relativi alle diverse miscele (Fig. 4.8, 4.9 e 4.10), si può solo apprezzare come presentino andamenti in linea con le percentuali di materiale in esse presenti.

In tab. 4.8 si riporta la totalità dei valori di angolo di resistenza al taglio residui.

ϕ_r	MOLARITA'		
	0	0,5 M	4 M
ILLITE	13,1°	14,5°	14,8°
75 I 25 B	12,8°	14,3°	15,7°
50 I 50 B	11,9°	14,8°	15,8°
25 I 75 B	9,7°	14,9°	16,2°
BENTONITE	7,9°	15,2°	16,4°

Tab. 4.8 – Angoli di resistenza al taglio residui per campioni di illite, bentonite e loro miscele, saturate con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

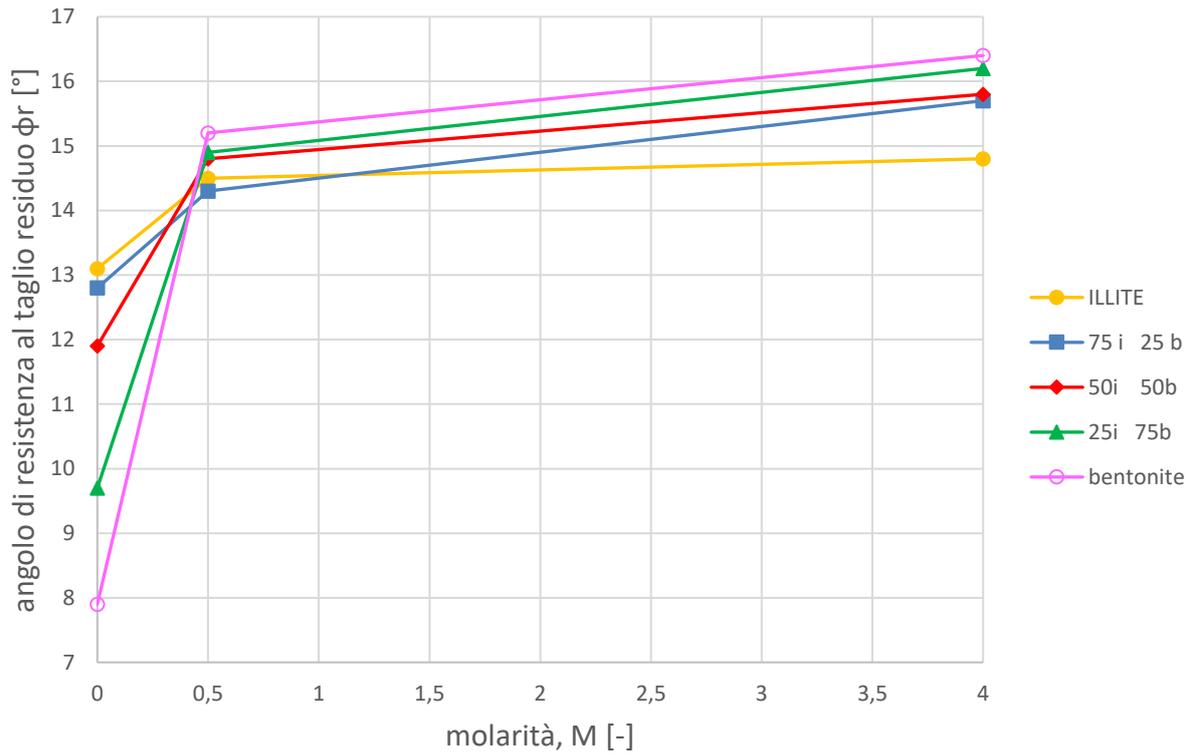


Fig. 4.11 – Angoli di resistenza al taglio residui per campioni di illite, bentonite e loro miscele, saturate con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

Dal grafico in fig. 4.11, si può notare come la bentonite risulti avere valori inferiori in presenza di acqua distillata e valori superiori per valori elevati di molarità di NaCl. Per valori di concentrazione molare pari ad 0.5 M, i cinque valori sono racchiusi in un intervallo inferiore ad un grado, il che però non si ritiene un dato caratterizzante per quest'analisi.

4.2.2 RELAZIONE TRA L'ANGOLO DI ATTRITO RESIDUO E L'INDICE DI PLASTICITA'

Diagrammando i valori di resistenza al taglio residui, in funzione dell'indice di plasticità, si ottiene il grafico in fig. 4.12.

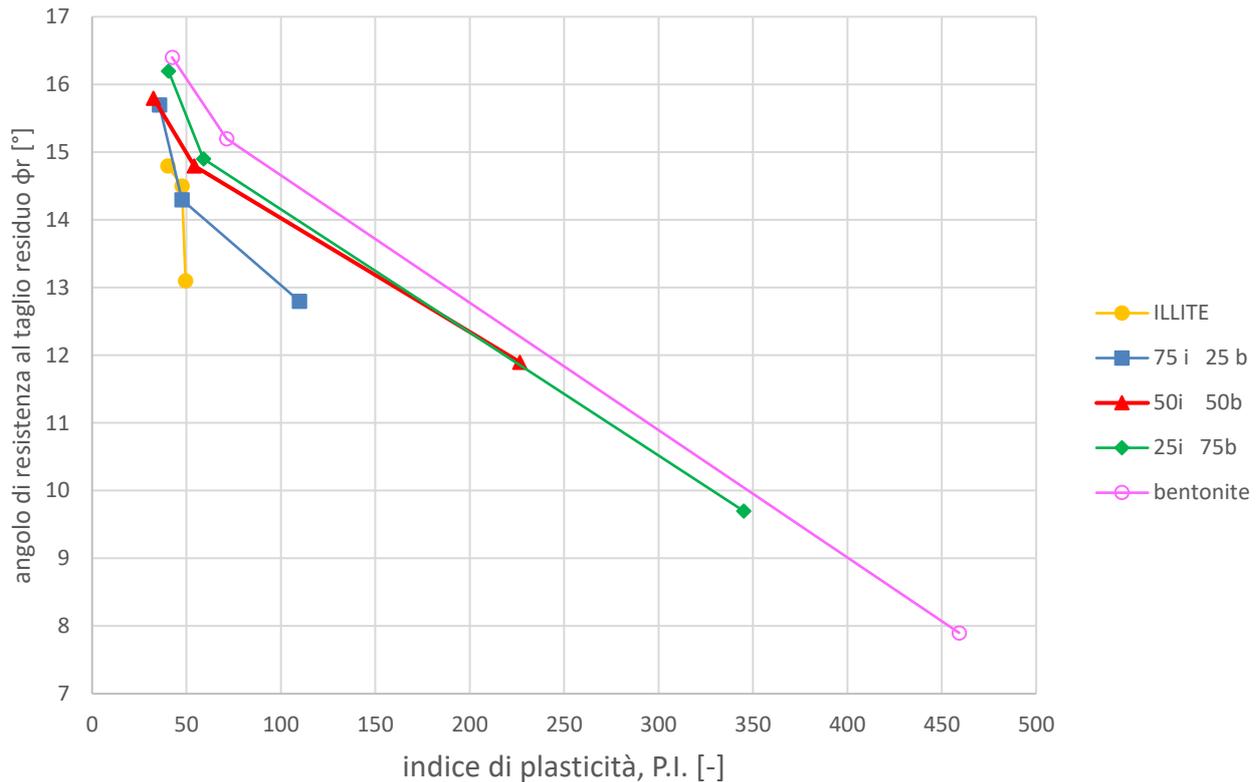


Fig. 4.12 – Angoli di resistenza al taglio residui in funzione dell'indice di plasticità, per illite, bentonite e loro miscele, saturate con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

Con riferimento all'opera di Lupini et. al (1981) si studia questo legame e la sua variabilità.

L'indice di plasticità risulta essere funzione dalla frazione argillosa e dai valori dei limiti di Atterberg relativi al materiale: la prima indica la quantità percentuale di particelle di terreno aventi diametro inferiore ai 0,002 mm, mentre i limiti dipendono dal grado di attività delle particelle argillose presenti nel materiale. Questi due fattori risultano inversamente proporzionali rispetto alle condizioni di taglio residuo, infatti all'aumentare della frazione argillosa e dei limiti di Atterberg, si manifesta una riduzione dell'angolo di resistenza al taglio residuo.

E' stato provato, che per valori molto bassi di frazione argillosa (<20%), l'angolo di resistenza al taglio residuo risulta essere controllato dalla frazione più grossolana, poiché in tali condizioni le resistenze residue sono dipendenti dalle particelle limoso-sabbiose subsferiche, al contrario per alte percentuali di frazione argillosa si ottengono valori di resistenza al taglio molto bassi controllati esclusivamente dall'attrito agente tra le particelle argillose di forma piatta.

Di conseguenza, l'andamento generale prevede una riduzione dei valori dell'angolo di resistenza al taglio residuo all'aumentare del valore dell'indice plasticità del materiale. Si riscontrano notevoli variazioni dell'angolo di resistenza nell'intervallo $0 < P.I. < 60$, mentre l'influenza di tale parametro risulta inferiore nell'intervallo $P.I. > 60$.

La forma delle particelle risulta essere un parametro di notevole importanza, assieme alla percentuale di frazione argillosa, per il comportamento del materiale in condizioni di scorrimenti prolungati nel tempo. Infatti, le condizioni residue vengono raggiunte solo quando, per scorrimenti significativi, avviene nella zona di taglio il *riorientamento* delle particelle di forma piatta in direzione parallela alla superficie di scorrimento. Si introduce quindi un nuovo parametro: il rapporto tra la percentuale di particelle di forma piatta e la percentuale di quelle aventi forma sferica in un dato materiale. Gli autori hanno dimostrato come il processo di taglio, a deformazioni elevate, avvenga con carattere *turbolento* nei terreni con maggiore percentuale di particelle di forma sferica o di forma piatta e per scivolamento quando al contrario risulta prevalente la frazione argillosa. Nel caso "turbolento" l'angolo di resistenza al taglio residuo assume valori maggiori, risultando influenzato solamente dalla forma delle particelle. Nel caso dello "scivolamento" l'angolo, al contrario, raggiunge gradualmente un valore minimo dipendendo esclusivamente dalla mineralogia delle particelle e dalle forze di attrito che agiscono tra di esse.

Diagrammando l'angolo di resistenza al taglio residuo, in funzione dell'indice di plasticità, si è costruito un fuso all'interno del quale, secondo Lupini et al. (1981), dovrebbe rientrare la maggior parte dei minerali argillosi. Sovrapponendo i risultati ottenuti in questa tesi al suddetto diagramma, si ottiene il grafico di fig.4.13.

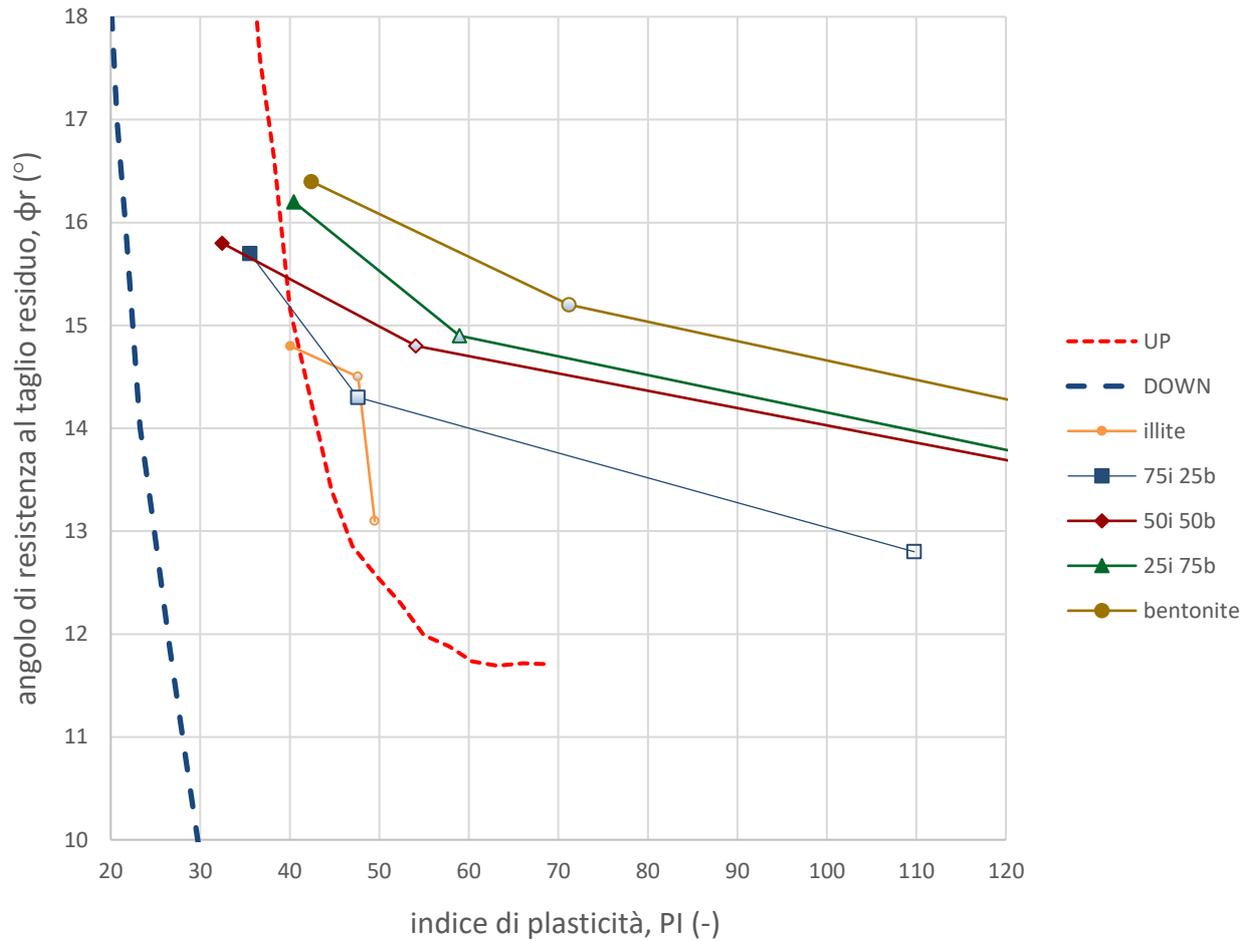


Fig. 4.13 – Angoli di resistenza al taglio residui in funzione dell'indice di plasticità, per illite, bentonite e loro miscele, saturate con di cloruro di sodio a differente molarità (Lupini et al., 1981)

Si può notare come le tre coppie di punti ricavate dalle prove sull'illite risultino le più corrispondenti a tale modello. Per quanto riguarda invece le miscele contenenti bentonite, solamente i campioni saturati con soluzione di cloruro di sodio 4 M si avvicinano al fuso teorico di Fig. 4.13.

L'andamento globale rispetta comunque la proporzionalità inversa tra angolo di attrito residuo ed indice di plasticità.

4.3 COMPORTAMENTO VOLUMETRICO

Al fine di valutare i parametri di compressibilità e la conducibilità idraulica, sono state eseguite delle prove edometriche ad incrementi di carico costante. Potendo usufruire di ben 6 edometri presenti nel laboratorio geotecnico, sono state analizzate tutte e 20 le combinazioni miscela illite-bentonite e concentrazione di cloruro di sodio, nel dettaglio in Tab. 4.8

	<i>MOLARITA'</i>			
	<i>0</i>	<i>0,5 M</i>	<i>1 M</i>	<i>4 M</i>
<i>ILLITE</i>	•	•	•	•
<i>75 I 25 B</i>	•	•	•	•
<i>50 I 50 B</i>	•	•	•	•
<i>25 I 75 B</i>	•	•	•	•
<i>BENTONITE</i>	•	•	•	•

Tab. 4.8 – Prove edometriche eseguite su miscele di illite-bentonite saturate con cloruro di sodio a differente concentrazione molare

Ciascun provino è stato preparato con un quantitativo d'acqua iniziale pari a 1,2 il limite liquido ottenuto per tale combinazione, così da avere campioni saturi e normal-consolidati.

4.3.1 RISULTATI PROVE EDOMETRICHE

Si riportano in questo paragrafo, i risultati delle prove suddivisi in base alla miscela illite-bentonite, sottoposta alle quattro differenti prove edometriche (Tab. 4.8)

Per i dati relativi alle singole prove si rimanda all'appendice.

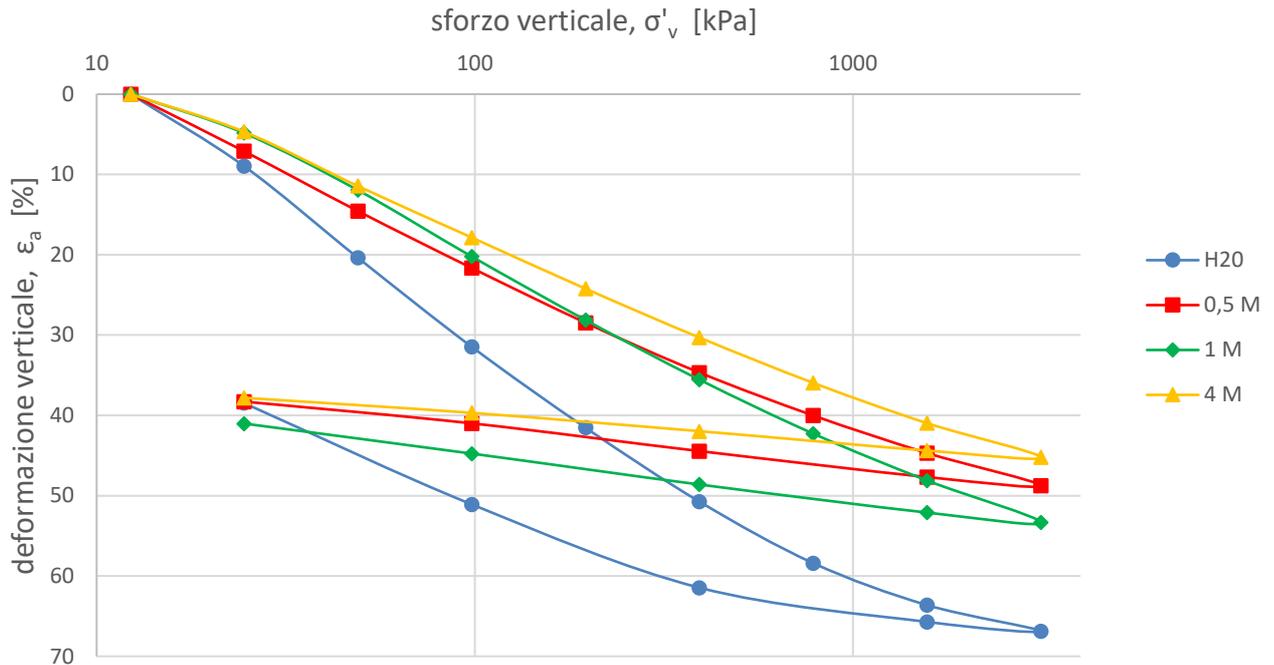


Fig. 4.14 – Curva edometrica in funzione della deformazione verticale, per illite saturata con soluzioni di cloruro di sodio a diverse molarità

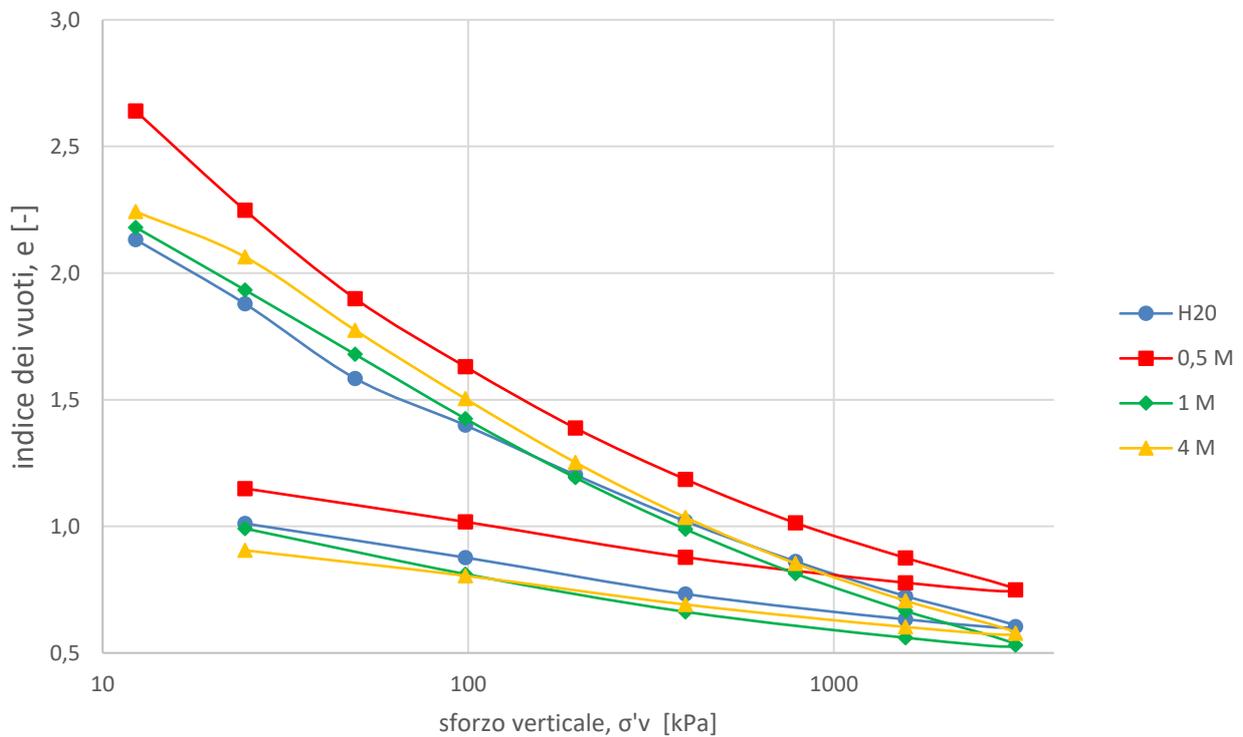


Fig. 4.15 – Curva edometrica in funzione dell'indice dei vuoti, per illite saturata con cloruro di sodio a diverse molarità

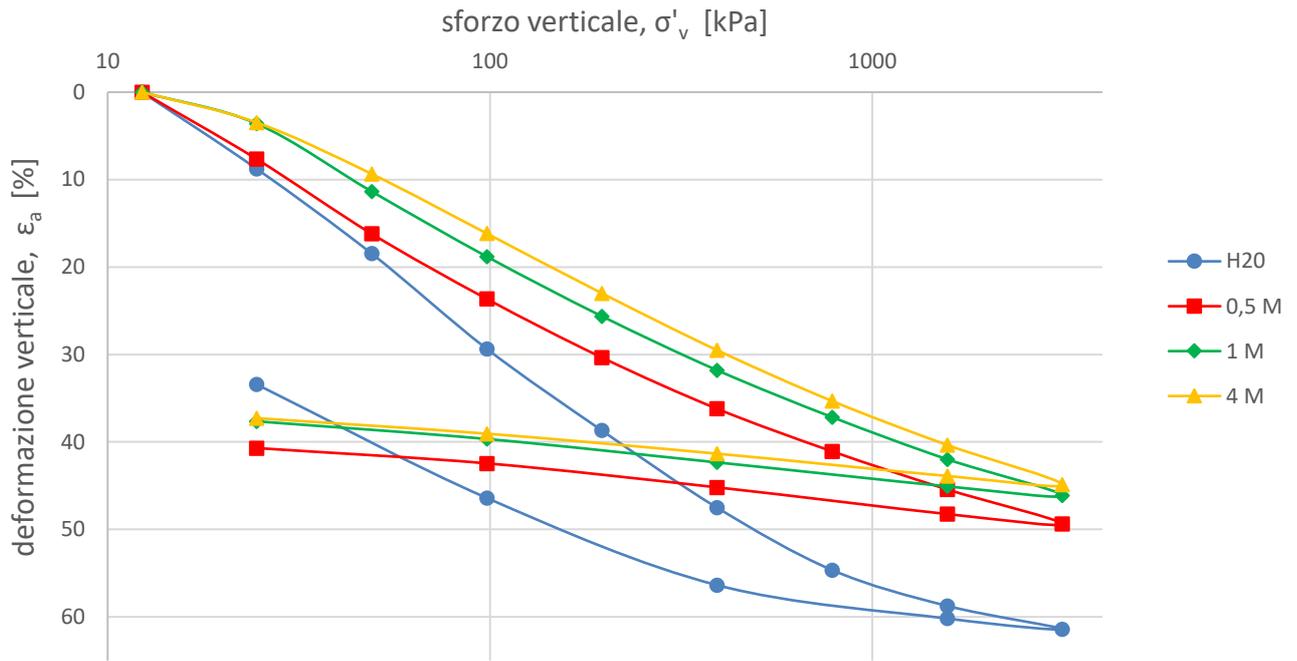


Fig. 4.16 – Curva edometrica in funzione della deformazione verticale, per bentonite saturata con soluzioni di cloruro di sodio a diverse molarità

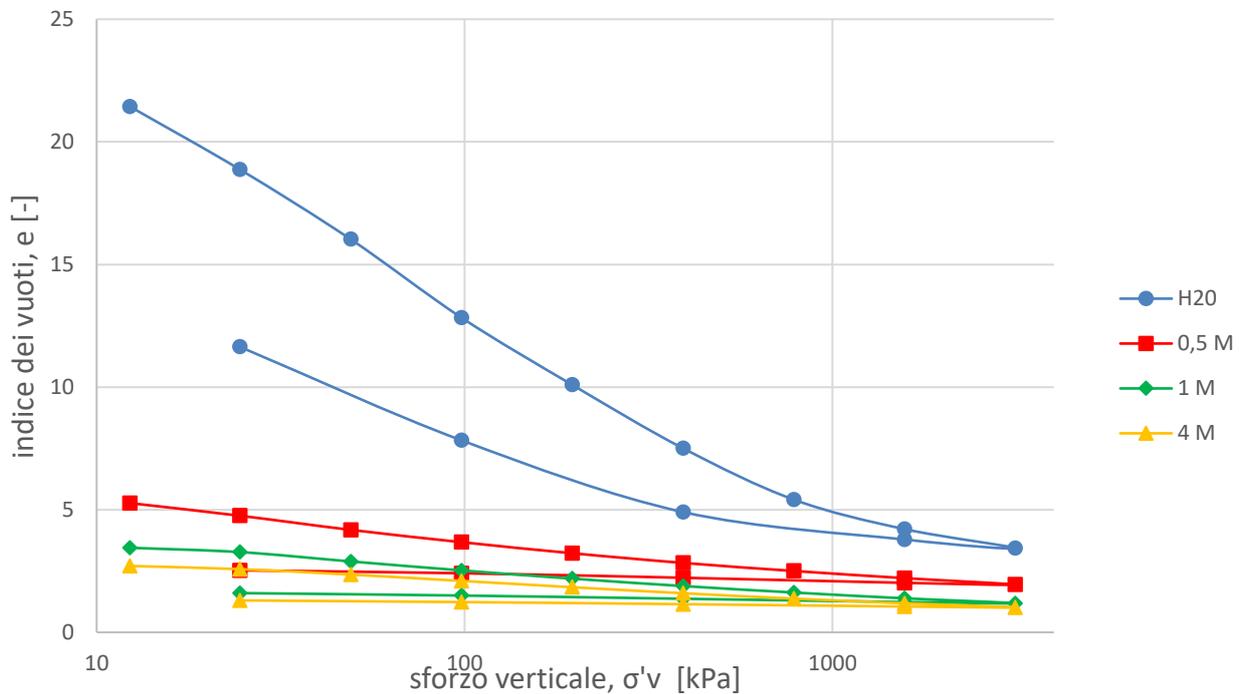


Fig. 4.17 – Curva edometrica in funzione dell'indice dei vuoti, per bentonite saturata con soluzioni di cloruro di sodio a diverse molarità

Analizzando le curve edometriche riferite alla deformazione verticale, si può notare come entrambi i rami della curva presentino due pendenze ben delineate. Unica eccezione è rappresentata dalla prova eseguita sulla bentonite in acqua distillata che presenta una forma più appiattita per elevati valori del carico applicato. La medesima combinazione, possiede inoltre un'elevata deformazione, seguita da un altrettanto notevole rigonfiamento, che conferma ancora una volta l'altissima suscettibilità all'acqua della bentonite.

Le altre curve presentano andamenti simili tra loro e all'aumentare della molarità, la deformazione diminuisce, ovvero tendono a irrigidirsi.

I risultati trovati sono in accordo con studi precedenti eseguiti su altre bentoniti, ad esempio il lavoro sulla bentonite di Ponza di Di Maio (1996) riportato nel capitolo 2.

Si riportano ora le curve relative alle prove sulle miscele illite-bentonite:

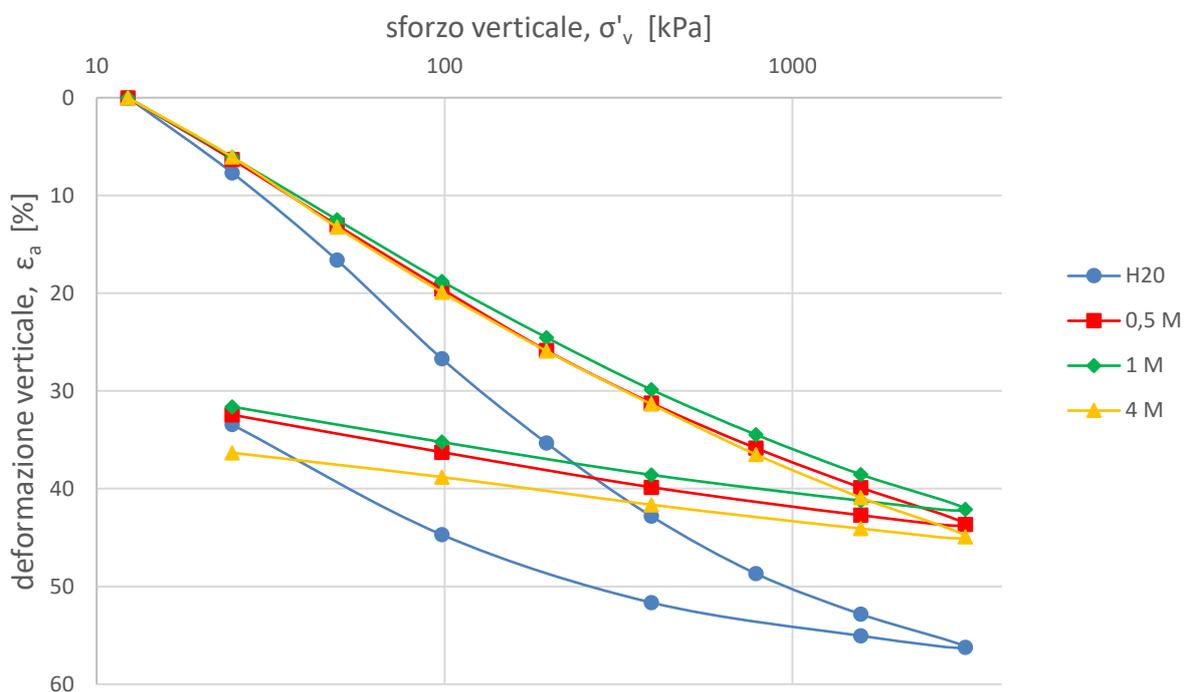


Fig. 4.18 – Curva edometrica in funzione della deformazione verticale, per una miscela composta da 75% di illite e 25% di bentonite, saturata con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

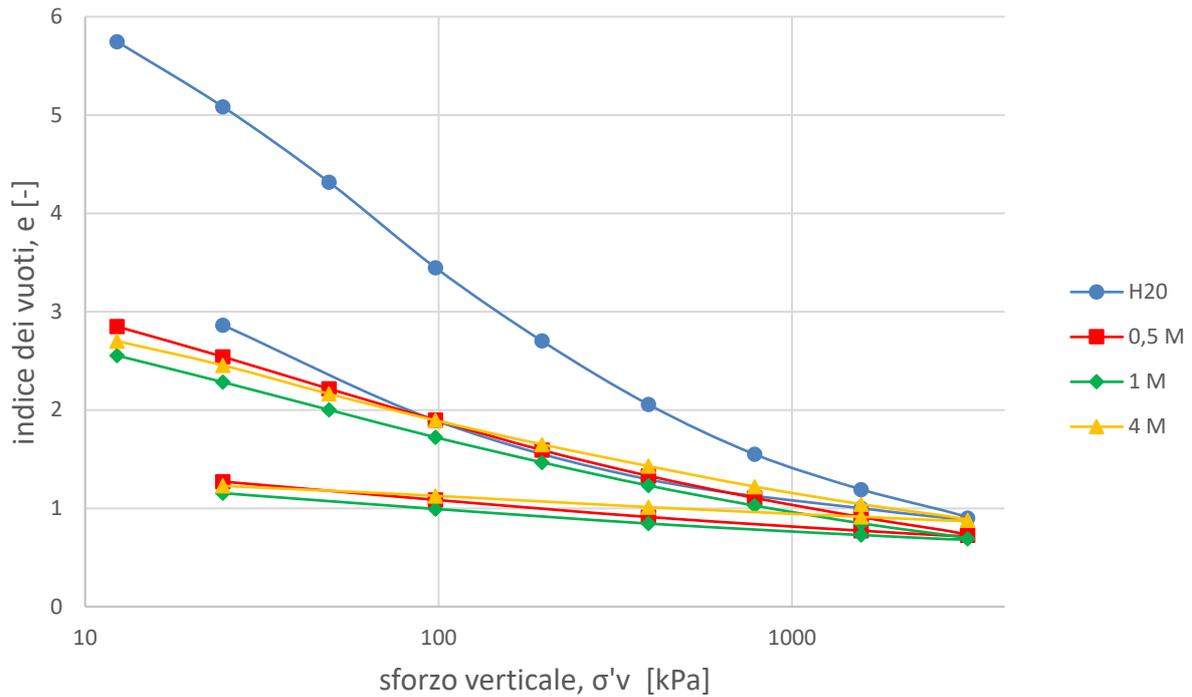


Fig. 4.19 – Curva edometrica in funzione dell'indice dei vuoti, per una miscela composta da 75% di illite e 25% di bentonite, saturata con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

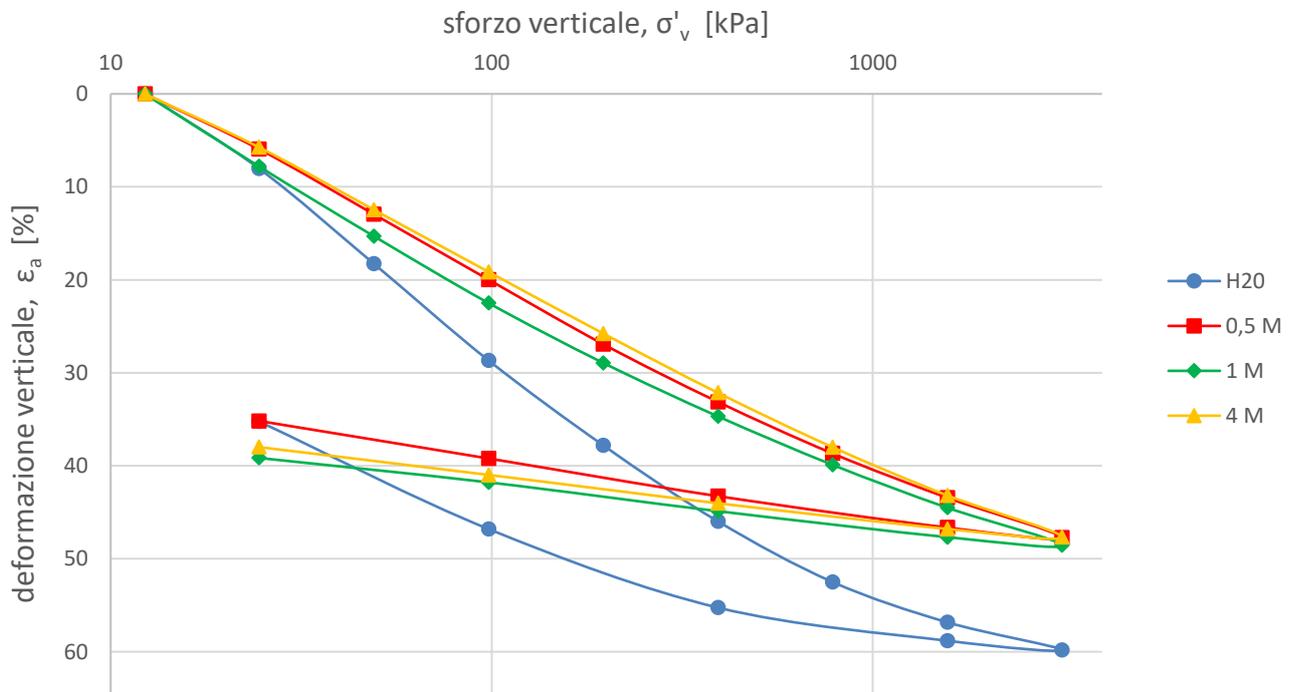


Fig. 4.20 – Curva edometrica in funzione della deformazione verticale, per una miscela composta da 50% di illite e 50% di bentonite, saturata con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

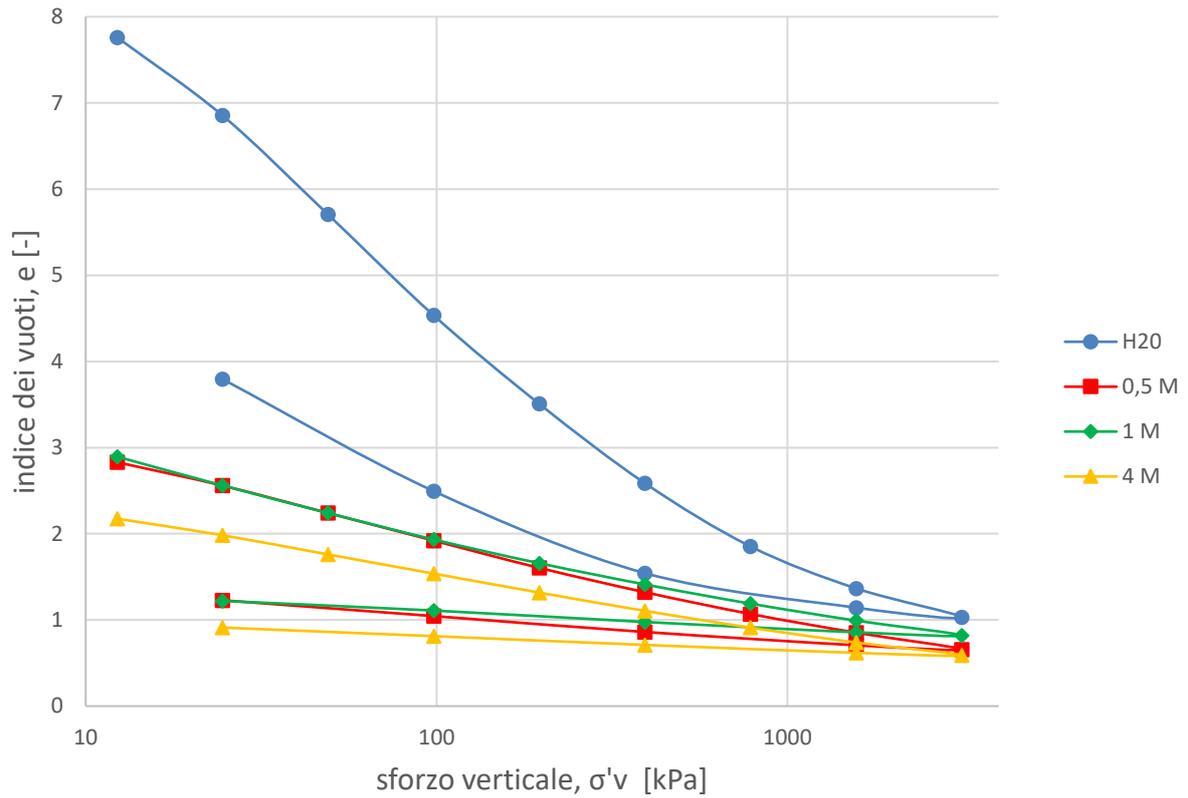


Fig. 4.21 – Curva edometrica in funzione dell'indice dei vuoti, per una miscela composta da 50% di illite e 50% di bentonite, saturata con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

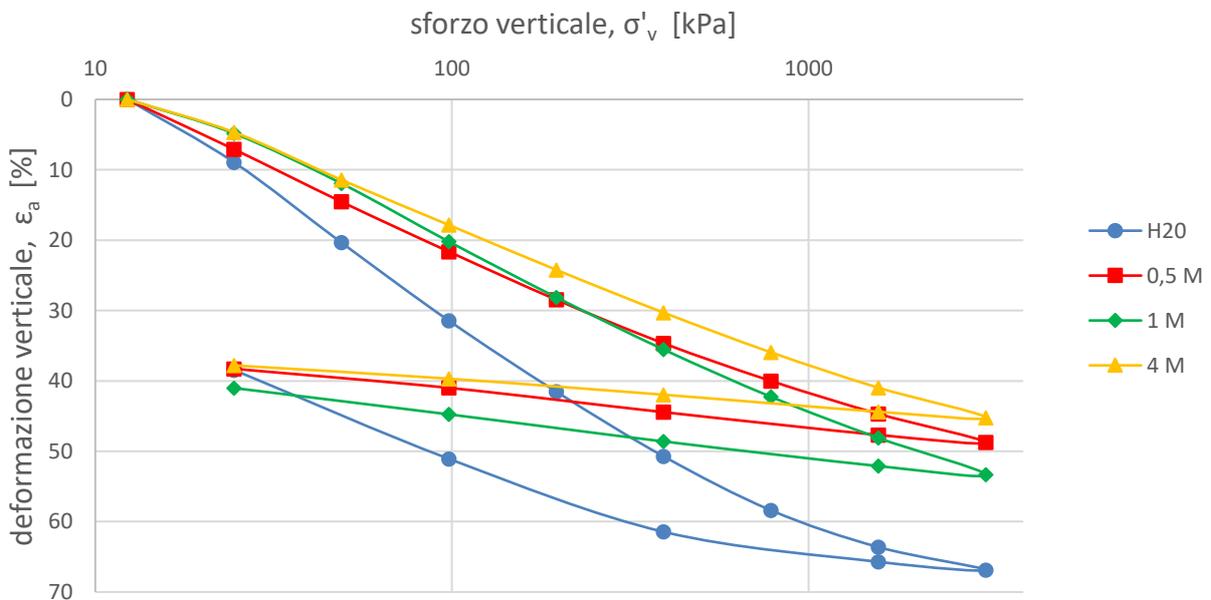


Fig. 4.22 – Curva edometrica in funzione della deformazione verticale, per una miscela composta da 25% di illite e 75% di bentonite, saturata con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

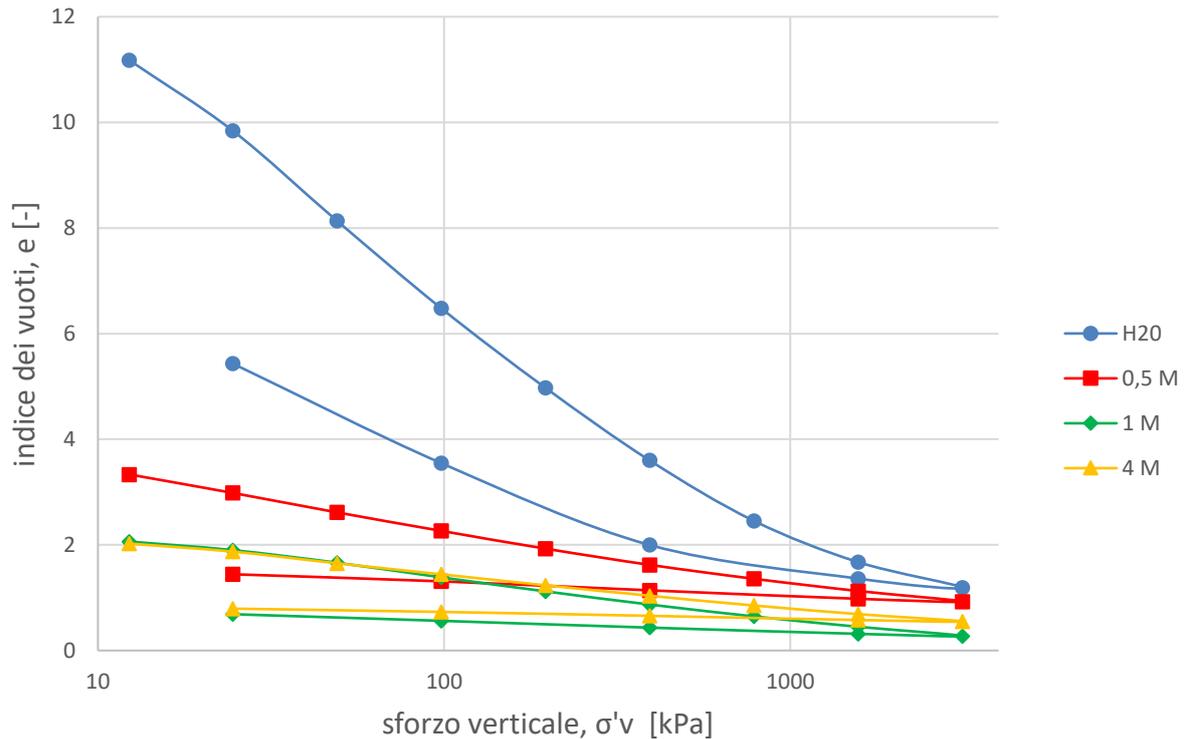


Fig. 4.23 – Curva edometrica in funzione dell'indice dei vuoti, per una miscela composta da 25% di illite e 75% di bentonite, saturata con soluzioni di cloruro di sodio a diverse molarità

Le curve riguardanti le miscele (dalla fig. 4.18 alla 4.23) presentano caratteristiche intermedie rispetto alle due riferite ai singoli materiali puri. La concentrazione salina porta sempre ad un irrigidimento globale (minori deformazioni) ed il tratto di scarico presenta la medesima pendenza (bentonite in acqua distillata esclusa).

Si può notare, come già indicato nei limiti liquidi, come nelle prove in acqua distillata, sia sufficiente una bassa percentuale (25%) di bentonite, per far tendere l'andamento della curva verso le sue caratteristiche (fig. 4.18).

4.3.2 INTERPRETAZIONE CONGIUNTA RELATIVA AL COMPORTAMENTO IN CONDIZIONI EDOMETRICHE

Con riferimento alle curve edometriche riferite all'indice dei vuoti si costruisce il grafico di fig.4.24.

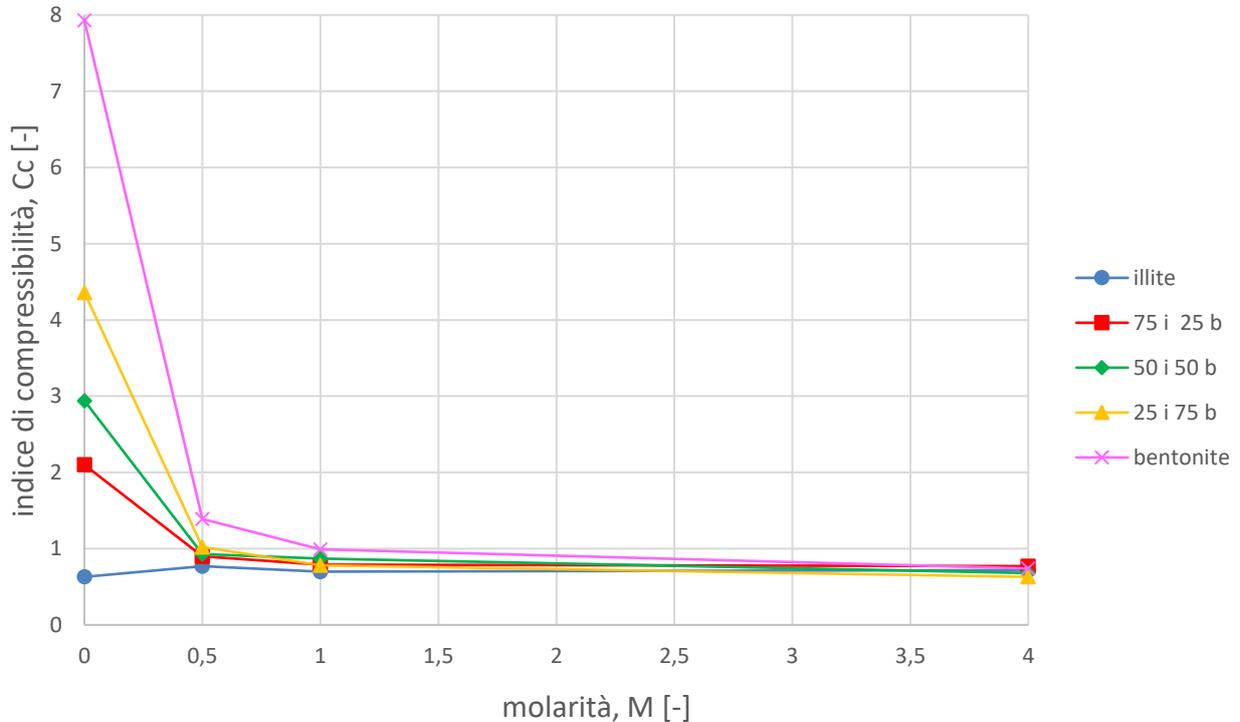


Fig. 4.24 – Indice di compressibilità per illite, bentonite e loro miscele saturate con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

Richiamando la definizione di indice di compressibilità:

$$c_c = \frac{-\Delta e}{\Delta \log \sigma_v} \quad (4.5)$$

Si nota come questo indice risulti molto elevato per le prove in acqua distillata, che presentano una pendenza del tratto di carico superiore. All'aumentare della concentrazione molare di cloruro di sodio, il valore decresce velocemente assumendo un valore asintotico per molarità superiori ad 1. Le medesime assunzioni rimangono valide anche per il tratto di scarico (fig.4.25)

Dalle quattro prove sull'illite invece si evince come il coefficiente rimanga poco invariato e senza un andamento ben definito, confermando la sua bassa suscettibilità alla soluzione di cloruro di sodio.

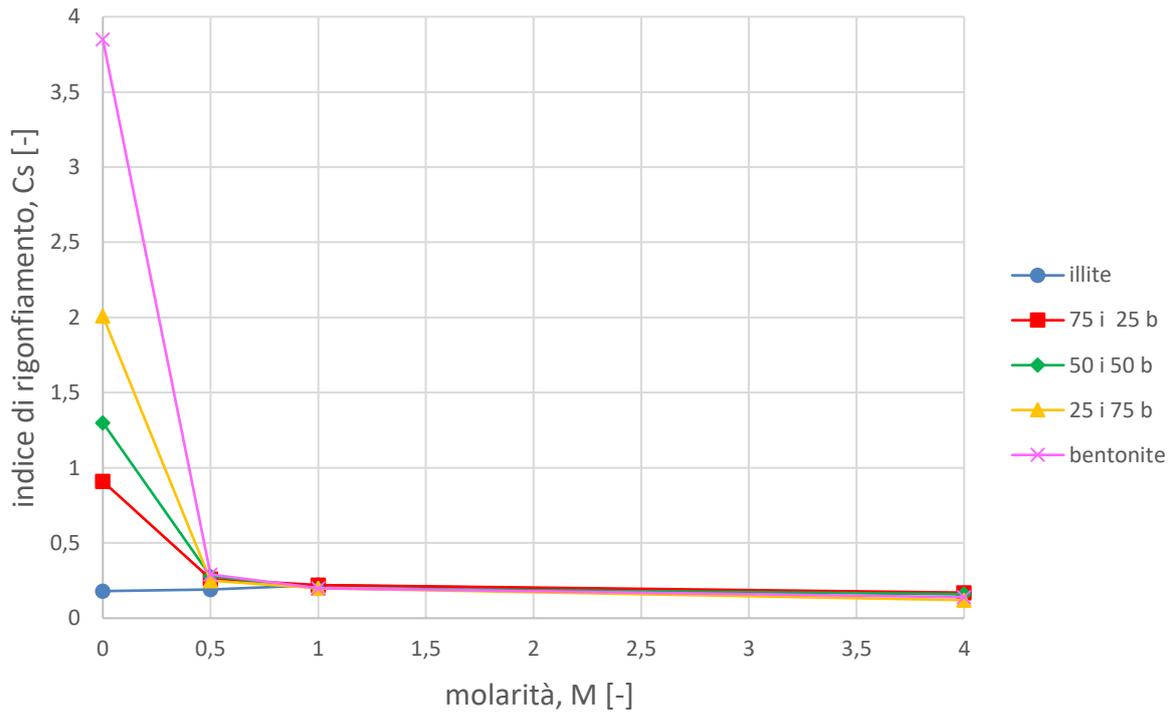


Fig. 4.25 – Indice di rigonfiamento per illite, bentonite e loro miscele, saturate con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

Con riferimento ai valori dell'indice dei vuoti iniziale e_0 , calcolato per uno stato tensionale di 12,3 kPa (tab. 4.9), si valuta la loro dipendenza dal coefficiente di compressibilità C_c .

C_c	illite	75i 25b	50i 50b	25i 75b	bentonite
0	0,63	2,1	2,94	4,36	7,93
0,5	0,77	0,9	0,93	1,02	1,39
1	0,70	0,79	0,87	0,78	0,99
4	0,72	0,77	0,68	0,63	0,74

e_0	illite	75i 25b	50i 50b	25i 75b	bentonite
0	2,181	5,854	7,705	11,129	21,811
0,5	2,666	2,936	2,885	3,412	5,274
1	2,204	2,694	2,901	2,069	3,664
4	2,245	2,878	2,231	2,072	2,733

Tab. 4.9 – Indice di rigonfiamento e indice dei vuoti iniziale per illite, bentonite e loro miscele, saturate con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

Con riferimento a studi passati si è valutato come nelle argille l'indice di compressibilità sia strettamente dipendente dal limite liquido (e di conseguenza all'indice dei vuoti iniziale).

Le argille a bassa sensibilità presentano valori di C_c inferiori all'unità, mentre altri materiali come ad esempio la bentonite possono superare anche le decine. Lancellotta (2004) ha diagrammato i risultati di prove edometriche su svariati terreni naturali e cercato delle relazioni che legassero i due parametri.

In fig. 4.26 si riportano i risultati sperimentali sovrapposti al suddetto lavoro, dove le due rette aventi pendenza minima e massima rappresentano i valori estremi riportati in letteratura.

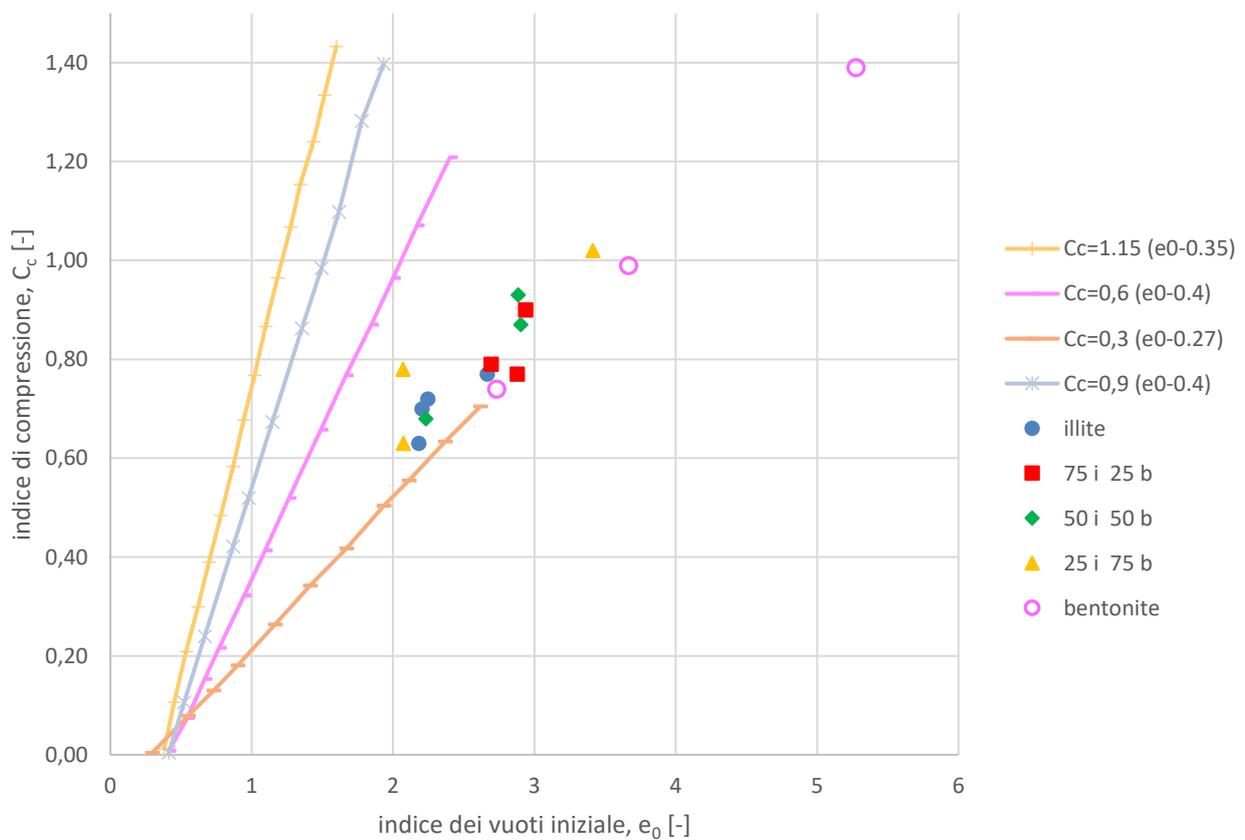


Fig. 4.26 – Indice di rigonfiamento in funzione dell'indice dei vuoti iniziale, per illite, bentonite e loro miscele, saturate con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità (Lancellotta, 2004)

4.3.3 STUDIO DELLA RELAZIONE TRA PERMEABILITA', INDICE DEI VUOTI E COMPOSIZIONE CHIMICA DELL'ACQUA INTERSTIZIALE

In fase di elaborazione dati per ogni gradino del tratto di carico si è calcolato il coefficiente di consolidazione primaria mediante il metodo di Taylor (rif. Par. 3.6.4)

$$c_v = \frac{K}{\gamma_w \cdot m_v} \left[\frac{m^2}{\text{sec}} \right] \quad (4.6)$$

Da cui invertendo la formula si ricava la conducibilità idraulica:

$$K = \frac{c_v \gamma_w}{M} \left[\frac{m}{\text{sec}} \right] \quad (4.7)$$

Si riportano tali valori in funzione dell'indice dei vuoti, costruendo un grafico per ogni miscela illite-bentonite al variare della concentrazione molare.

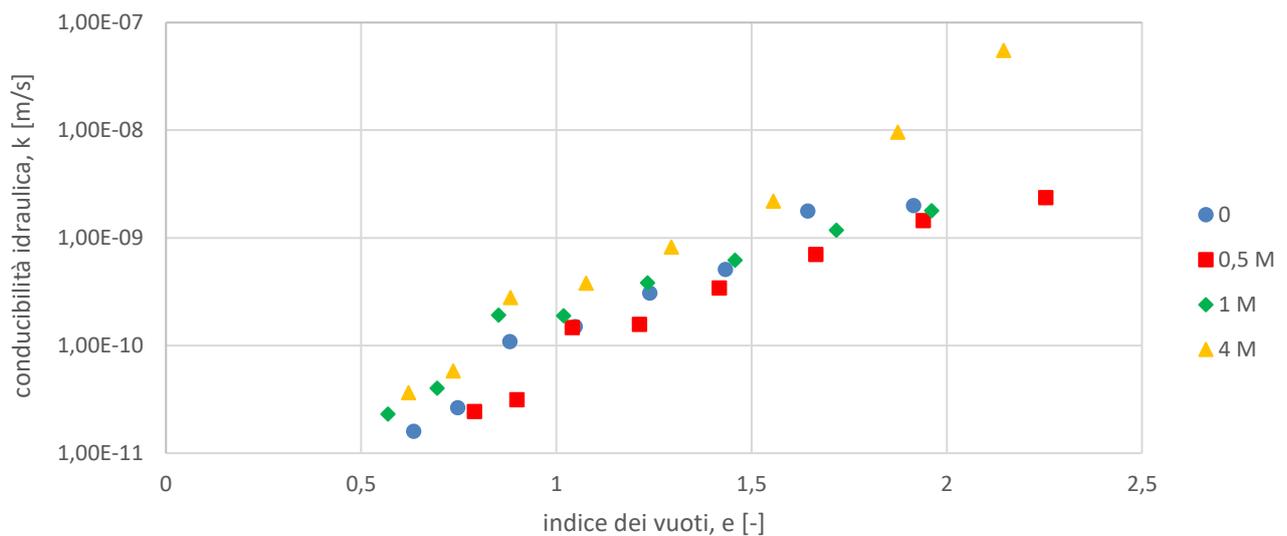


Fig. 4.27 – Conducibilità idraulica in funzione dell'indice dei vuoti, per illite saturata con soluzioni di cloruro di sodio a diverse molarità

L'illite presenta un andamento marcatamente lineare, nel piano semilogaritmico in fig. 4.27, per tutte e quattro le molarità investigate. La conducibilità cresce proporzionalmente all'indice dei vuoti ed all'aumentare della concentrazione di cloruro di sodio.

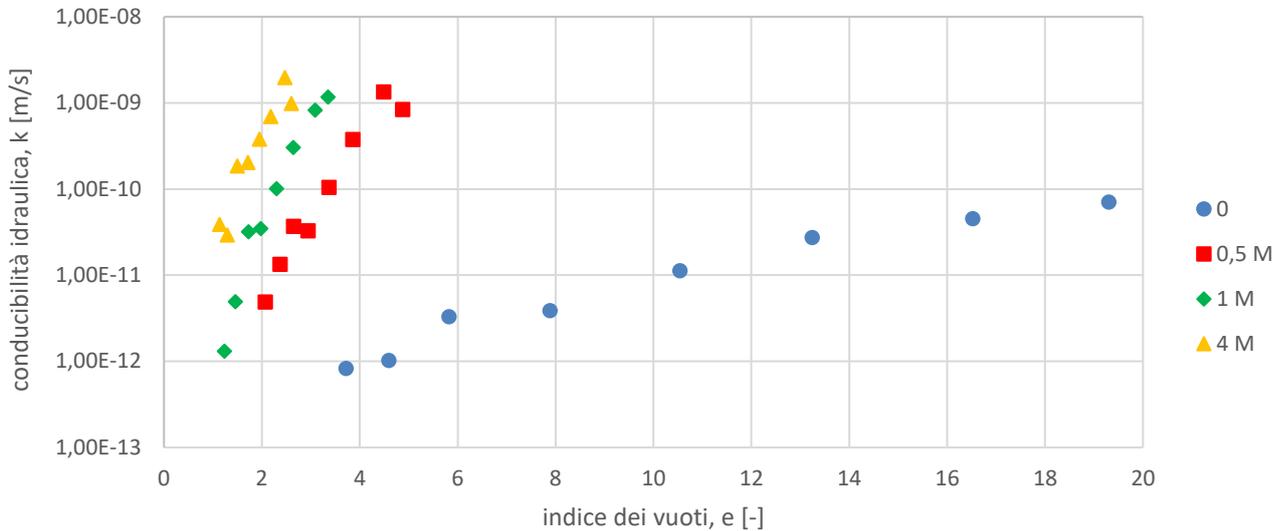


Fig. 4.28 – Conducibilità idraulica in funzione dell'indice dei vuoti, per bentonite saturata con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

La distribuzione delle coppie di punti ricavati dalla prova sulla bentonite saturata in acqua distillata, presenta una pendenza decisamente inferiore ed una relazione meno tendente alla linearità.

La bentonite avendo un'elevata superficie specifica, trattiene maggiormente l'acqua attorno alle proprie particelle, all'aumentare della concentrazione salina questa si riduce e la conducibilità aumenta notevolmente.

Nelle figure 4.29, 4.30 e 4.31 si riportano i medesimi grafici, per le prove eseguite sulle miscele illite-bentonite.

Comportamento chemo-idro-meccanico di miscela illite-bentonite

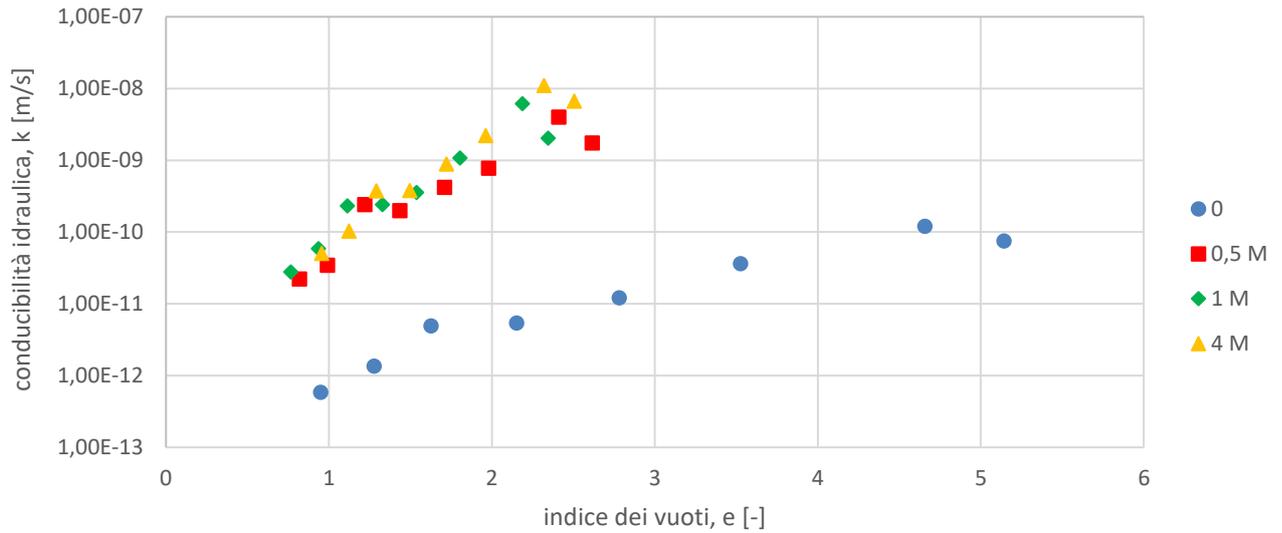


Fig. 4.29 – Conducibilità idraulica in funzione dell'indice dei vuoti, per una miscela composta da 75% di illite e 25% di bentonite, saturata con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

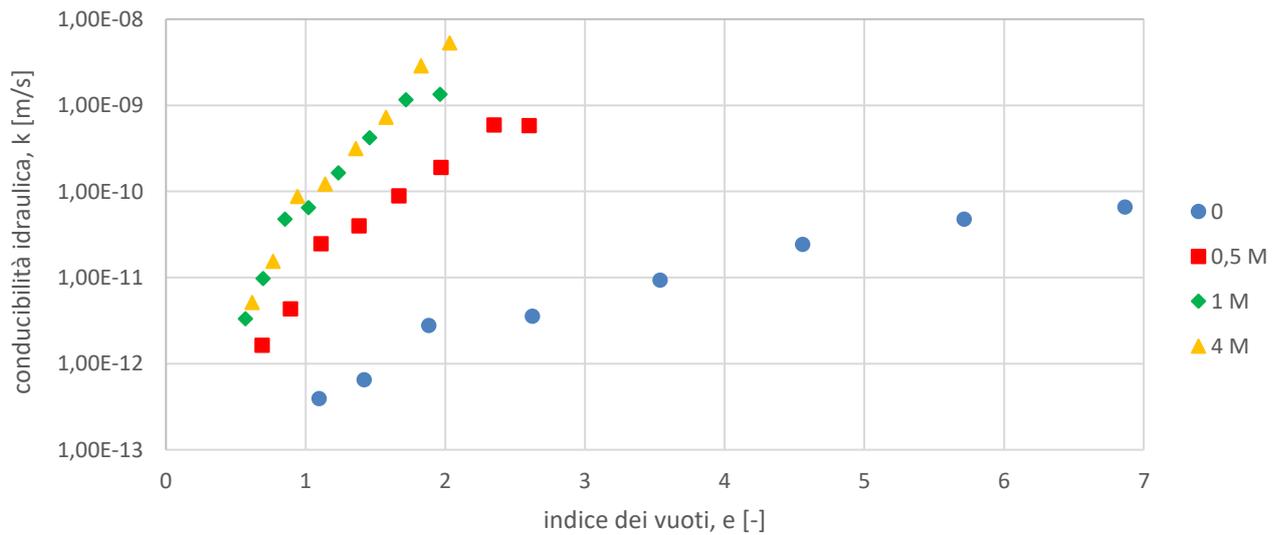


Fig. 4.30 – Conducibilità idraulica in funzione dell'indice dei vuoti, per una miscela composta da 50% di illite e 50% di bentonite, saturata con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

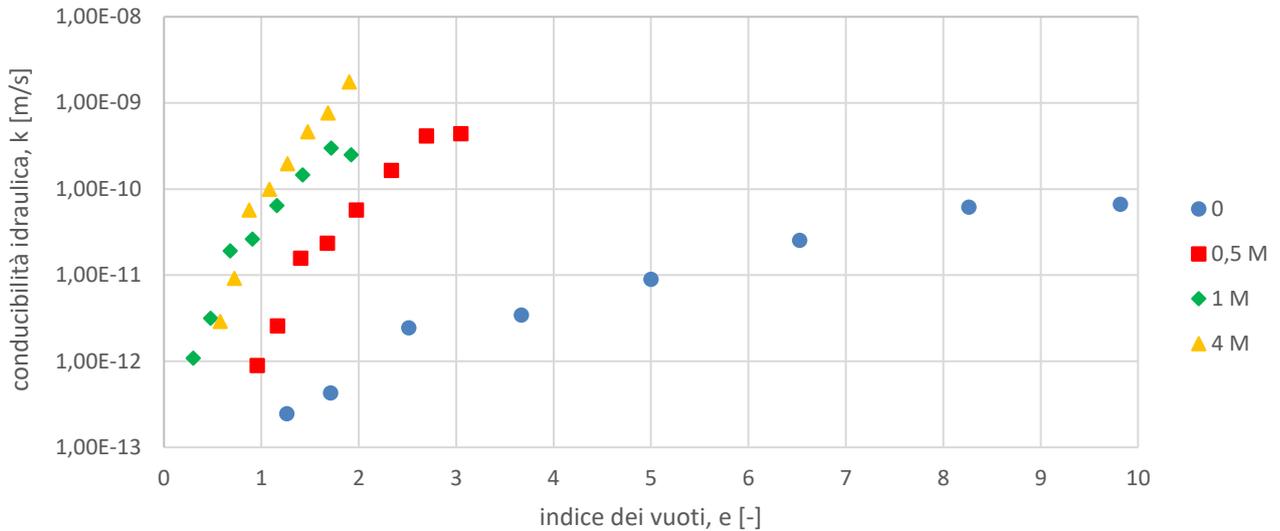


Fig. 4.31 – Conducibilità idraulica in funzione dell'indice dei vuoti, per una miscela composta da 25% di illite e 75% di bentonite, saturata con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

Le curve relative alle miscele presentano andamenti intermedi come previsto. Si nota come all'aumentare del contenuto di bentonite, nelle prove con soluzione salina, la sensibilità influisca notevolmente nella pendenza della retta. Nelle miscele a maggiore (o uguale) contenuto di illite (fig. 4.29 e 4.30) ciò non avviene ed i valori risultano meno ordinati.

Risulta interessante valutare anche come varia la conducibilità delle varie miscele illite-bentonite, per una prefissata molarità di cloruro di sodio.

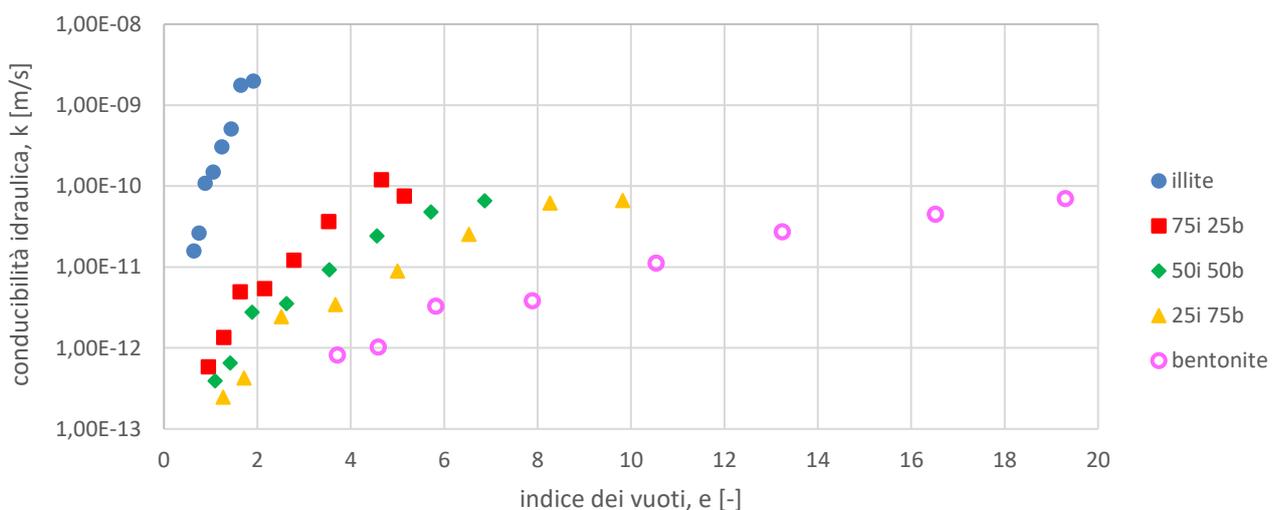


Fig. 4.32 – Conducibilità idraulica in funzione dell'indice dei vuoti, per differenti miscele di illite-bentonite, saturate con acqua distillata

Dal grafico in condizioni di acqua distillata in fig. 4.32, si evince immediatamente come l'illite presenti valori di conducibilità di un ordine di grandezza più elevati a parità di carico applicato. Anche in questo caso si possono riconoscere degli andamenti marcatamente lineari e definiti (in particolar modo per i primi 5-6 gradini di carico)

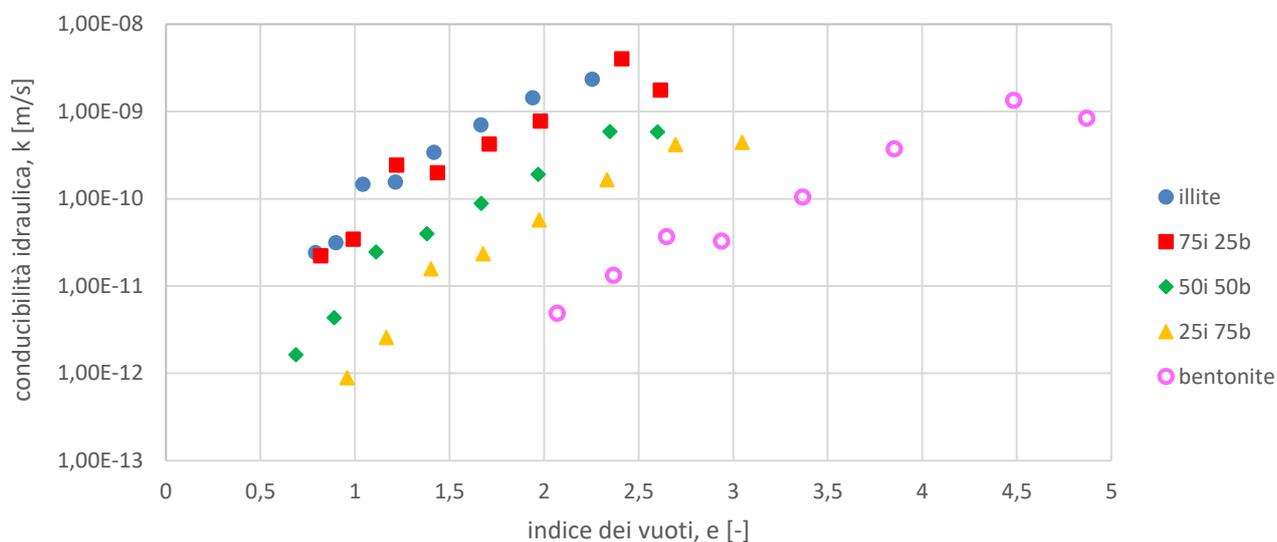


Fig. 4.33 – Conducibilità idraulica in funzione dell'indice dei vuoti, per differenti miscele di illite-bentonite, saturate con una soluzione di cloruro di sodio 0,5 molare

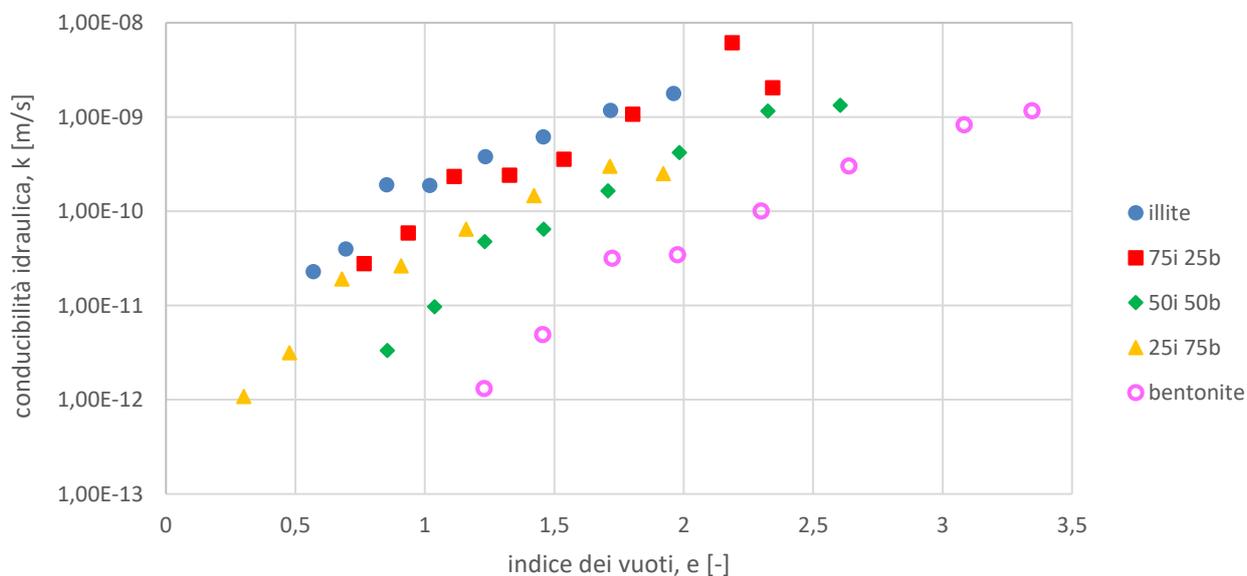


Fig. 4.34 – Conducibilità idraulica in funzione dell'indice dei vuoti, per differenti miscele di illite-bentonite, saturate con una soluzione di cloruro di sodio 1 molare

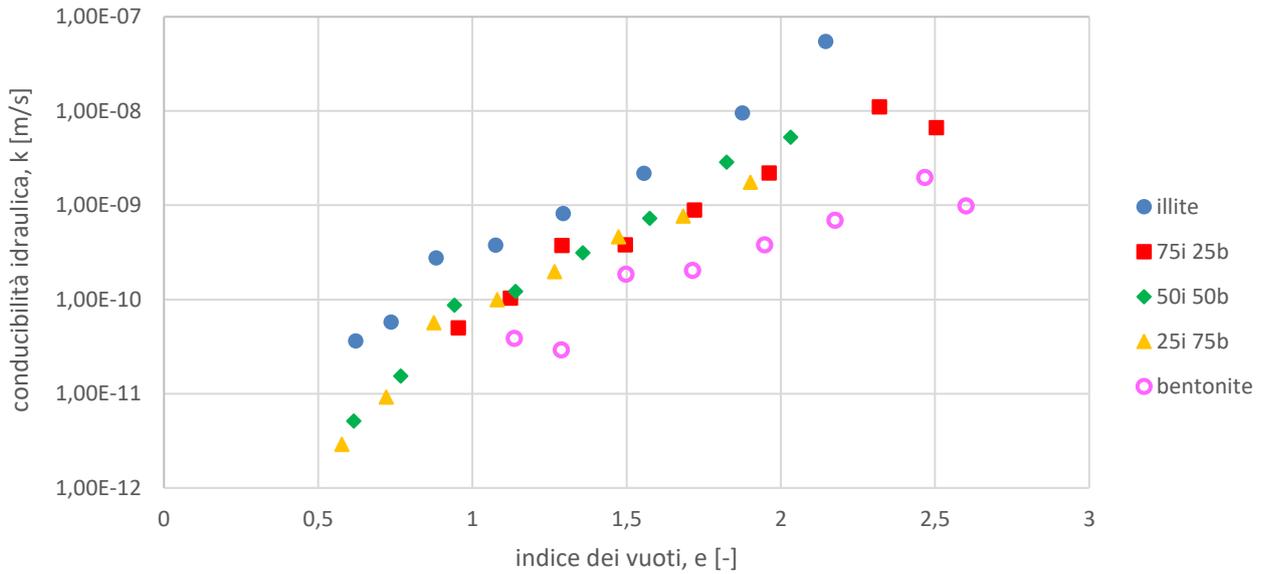


Fig. 4.35 – Conducibilità idraulica in funzione dell’indice dei vuoti, per differenti miscele di illite-bentonite, saturate con una soluzione di cloruro di sodio 4 molare

All’aumentare della concentrazione molare si ha una diminuzione dell’indice dei vuoti e un conseguente aumento della conducibilità idraulica. Nell’illite l’aumento consiste in un ordine di grandezza, mentre per la bentonite di 2 ordini a confermare la sua elevata suscettibilità.

Si nota infine come l’elevata concentrazione tenda ad omogeneizzare i valori nelle miscele, mentre nei due materiali puri la differenza resta ancora marcata.

4.3.4 INFLUENZA DELLA CONCENTRAZIONE DI SOLUZIONI DI CLORURO DI SODIO SULLA PERMEABILITA’ INTRINSECA DI CAMPIONI NORMALCONSOLIDATI E DI MISCELE ILLITE-BENTONITE

La legge di Darcy indica la diretta proporzionalità tra la velocità di filtrazione v_h o il flusso q_h ed il gradiente idraulico i_h :

$$v_h = k_h i_h \quad (4.8)$$

$$q_h = k_h i_h a \quad (4.9)$$

dove : a è la sezione normale alla direzione del flusso, k_h è la conducibilità idraulica

Per quanto riguarda lo studio nei terreni, si introduce la legge di Poiseuille che descrive la velocità media di filtrazione:

$$v_m = \frac{\gamma_p R^2}{8 \mu} i_h \quad (4.10)$$

dove: γ_p : peso specifico del liquido, μ : la viscosità, R il raggio del tubo di flusso.

Poiché i canali di filtrazione, all'interno dei terreni possono essere di svariate forme e dimensione, si introduce una nuova variabile, ovvero il raggio idraulico R_H , definito come il rapporto tra la sezione normale ed il perimetro bagnato P . Nel caso di sezione circolare interamente riempita, tale rapporto vale $R/2$, che risostituito nell'eq. (4.10) :

$$q_c = \frac{1}{2} \frac{\gamma_p}{\mu} R_H^2 i_h a \quad (4.11)$$

Generalizzando per eventuali sezioni differenti si introduce un coefficiente di forma C_s e la 4.11 diventa:

$$q = C_s \frac{\gamma_p}{\mu} R_H^2 i_h a \quad (4.12)$$

Introducendo il grado di saturazione S e la porosità n , il raggio idraulico diventa:

$$R_H = \frac{A_f}{P} = \frac{A_f L}{P L} = \frac{V_w}{V_s S_0} \quad (4.13)$$

Dove: $A_f = S \cdot n \cdot a$ superficie interamente riempita, V_s : volume della frazione solida

S_0 : superficie bagnata per unità di superficie

Il volume d'acqua V_w si ottiene introducendo l'indice dei vuoti e:

$$V_w = e V_s S \quad (4.14)$$

L'equazione 4.12 diventa:

$$q = C_s \frac{\gamma_p}{\mu} R_H^2 S n i_h a = C_s \frac{\gamma_p}{\mu} R_H^2 S \left(\frac{e}{1+e} \right) i_h a \quad (4.15)$$

E risostituendo il valore del raggio idraulico mediante le eq. 4.13 e 4.15 si ha:

$$q = C_s \left(\frac{1}{S_0^2} \right) \frac{\gamma_p}{\mu} S^3 \left(\frac{e^3}{1+e} \right) i_h a \quad (4.16)$$

Per analogia con la formula di Darcy (4.9) si ottiene la conducibilità idraulica:

$$k_h = C_s \left(\frac{1}{S_0^2} \right) \frac{\gamma_p}{\mu} S^3 \left(\frac{e^3}{1+e} \right) \left[\frac{m}{s} \right] \quad (4.17)$$

Nell'ipotesi di completa saturazione $S=1$ e che l'inverso del fattore di forma sia pari a $(K_o T^2)$, dove

K_o è il fattore di forma dei pori e T è la tortuosità. Con queste ultime ipotesi si ottiene l'equazione di Kozeny-Carman per la permeabilità intrinseca:

$$K = k_h \left(\frac{\mu}{\gamma_p} \right) = \left(\frac{1}{k_0 T^2 S_0^2} \right) \left(\frac{e^3}{1+e} \right) [m^2] \quad (4.18)$$

Noto il modello, si è cercato di verificarne l'attendibilità con i dati di conducibilità idraulica ottenuti in questa tesi.

Per prima cosa, si sono dovuti trasformare tutti i dati di conducibilità idraulica in permeabilità intrinseca, ovvero moltiplicare tutti i valori per il fattore $\left(\frac{\mu}{\gamma_p} \right)$.

La densità delle varie soluzioni di cloruro di sodio è stata calcolata, con le seguenti ipotesi iniziali:

Acqua distillata a 20 °C: 998,2 kg/m³; cloruro di sodio: 21600 kg/m³, ed è stata stimata in proporzione al quantitativo percentuale di sale presente in ciascuna delle tre molarità trattate.

Mentre per calcolare le viscosità si è utilizzata la seguente equazione:

$$\mu = \left(1 + X_s/0,3 \right) \mu_w \left[N s / m^2 \right] \quad (4.19)$$

Dove: X_s è la frazione in peso di cloruro di sodio in soluzione (0,3 max)

μ_w è la viscosità dell'acqua pari a 10000 $[N s / m^2]$

I risultati sono riportati in tab. 4.10

		0	0,5 M	1 M	4 M
γ	[N/m ³]	10000	10155	10306	11135
μ	[N s /m ²]	1,00E-03	1,10E-03	1,18E-03	1,63E-03
μ/γ	[m s]	1,00E-07	1,08E-07	1,15E-07	1,47E-07

Tab. 4.10 – rapporti viscosità-peso specifico per le differenti soluzioni molarie di cloruro di sodio

Convertiti tutti i valori di conducibilità idraulica in permeabilità intrinseca, si è applicato il modello di Kozeny-Carman. Dall'analisi eseguita e non risultando molto adatto per nessuna delle combinazioni miscela-molarità, si sono eseguiti dei tentativi variando l'esponente dell'indice dei vuoti dell'equazione 4.16, ossia mediante una legge di Kozeny-Carman modificata

$$K = \left(\frac{1}{k_0 T^2 S_0^2} \right) \left(\frac{e^x}{1+e} \right) [m^2] \quad (4.20)$$

L'analisi al variare di tale esponente è stata effettuata per tutti le prove, ma si riportano esclusivamente i risultati relativi alle seguenti due: illite e bentonite in acqua distillata.

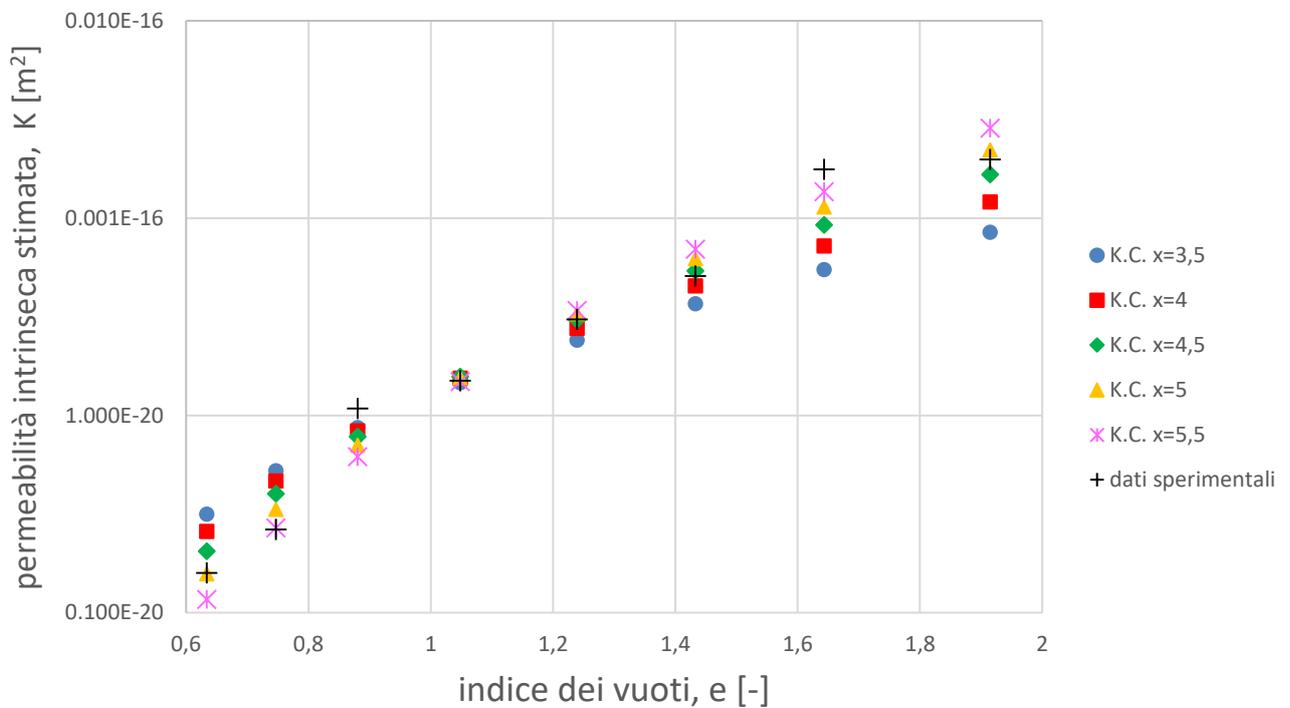


Fig. 4.36 – Curve permeabilità intrinseca stimata, al variare dell'esponente x dell'equazione di Kozeny-Carman modificata per illite, saturata con acqua distillata

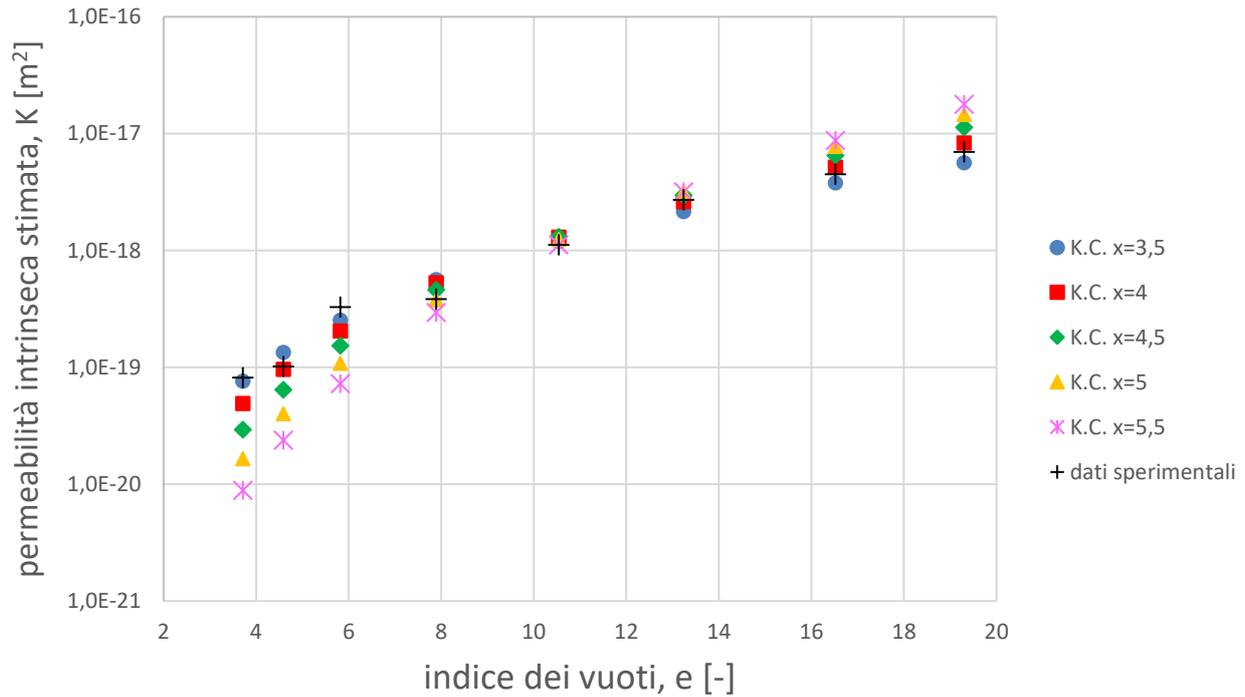


Fig. 4.37 – Curve permeabilità intrinseca stimata, al variare dell’esponente x dell’equazione di Kozeny-Carman modificata per bentonite, saturata con acqua distillata

Dai grafici in fig 4.36 e 4.37 si evince come globalmente l’esponente $x=4,5$ consenta il miglior riscontro tra previsioni e dati sperimentali. Per tale ragione le successive analisi verranno eseguite con tale valore.

4.3.5 ESTENSIONE DEL MODELLO DI KOZENY-CARMAN PER LA PERMEABILITA' INTRINSECA

Variando l’esponente nell’equazione di Kozeny-Carman da 3 a 4,5, l’equazione diventa:

$$K = k_h \left(\frac{\mu}{\gamma_p} \right) = \left(\frac{1}{k_0 T^2 S_0^2} \right) \left(\frac{e^{4.5}}{1+e} \right) [m^2] \quad (4.21)$$

Supponendo che la quantità racchiusa nella prima parentesi tonda risulti una costante, poiché composta da parametri geometrici delle particelle, indipendenti dalle fasi di prova, risulta valida la seguente equazione:

$$\frac{K}{\left(e^{4.5}/(1+e)\right)} = \frac{1}{cost} \quad (4.22)$$

La validità di questa assunzione è stata verificata mediante delle evidenze sperimentali

Si riporta in tab. 4.11 i valori per la prova con illite saturata con acqua distillata:

0						
e (t100)	k (t100)	K	e ^x / (1+e)	k/ (e ^x /(1+e)) = 1/cost	cost	k*
[-]	[m/s]	[m ²]				[m ²]
2,18079	-					
1,914209	1,98E-09	1,98E-16	6,3743	3,113E-17	3,2127E+16	1,663E-16
1,64313	1,76558E-09	1,77E-16	3,5351	4,994E-17	2,0023E+16	9,222E-17
1,432322	5,08945E-10	5,09E-17	2,0709	2,458E-17	4,0690E+16	5,402E-17
1,238951	3,06282E-10	3,06E-17	1,1714	2,615E-17	3,8245E+16	3,056E-17
1,047932	1,49609E-10	1,50E-17	0,6028	2,482E-17	4,0293E+16	1,572E-17
0,880024	1,08332E-10	1,08E-17	0,2993	3,620E-17	2,7625E+16	7,807E-18
0,746538	2,63821E-11	2,64E-18	0,1537	1,717E-17	5,8243E+16	4,008E-18
0,633711	1,58963E-11	1,59E-18	0,0786	2,023E-17	4,9435E+16	2,050E-18
				media cost* =	3,8335E+16	

Tab.4.11 - valori di permeabilità intrinseca sperimentale k e stimata k*, illite saturata con acqua distillata

Per confermare la validità del nuovo modello proposto si diagrammano le permeabilità intrinseche stimate in funzione di quelle sperimentali.

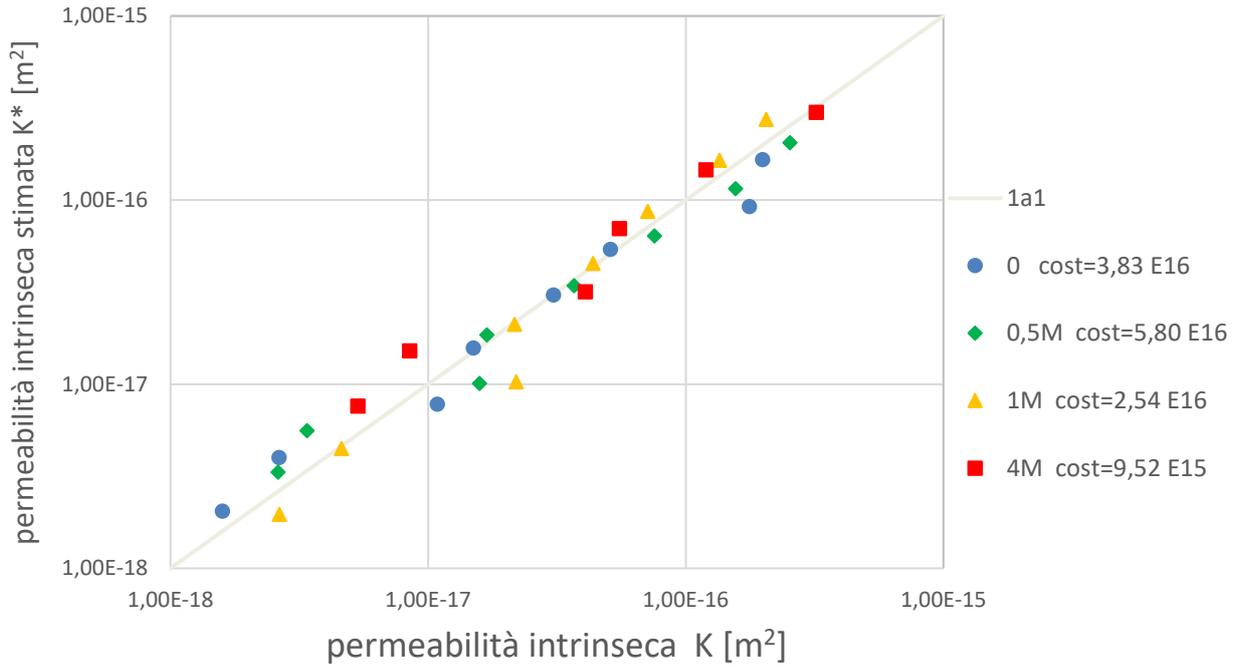


Fig. 4.38 – Stima della permeabilità intrinseca, con esponente di Kozeny-Carman pari a 4,5 per illite saturata con cloruro di sodio a differenti molarità

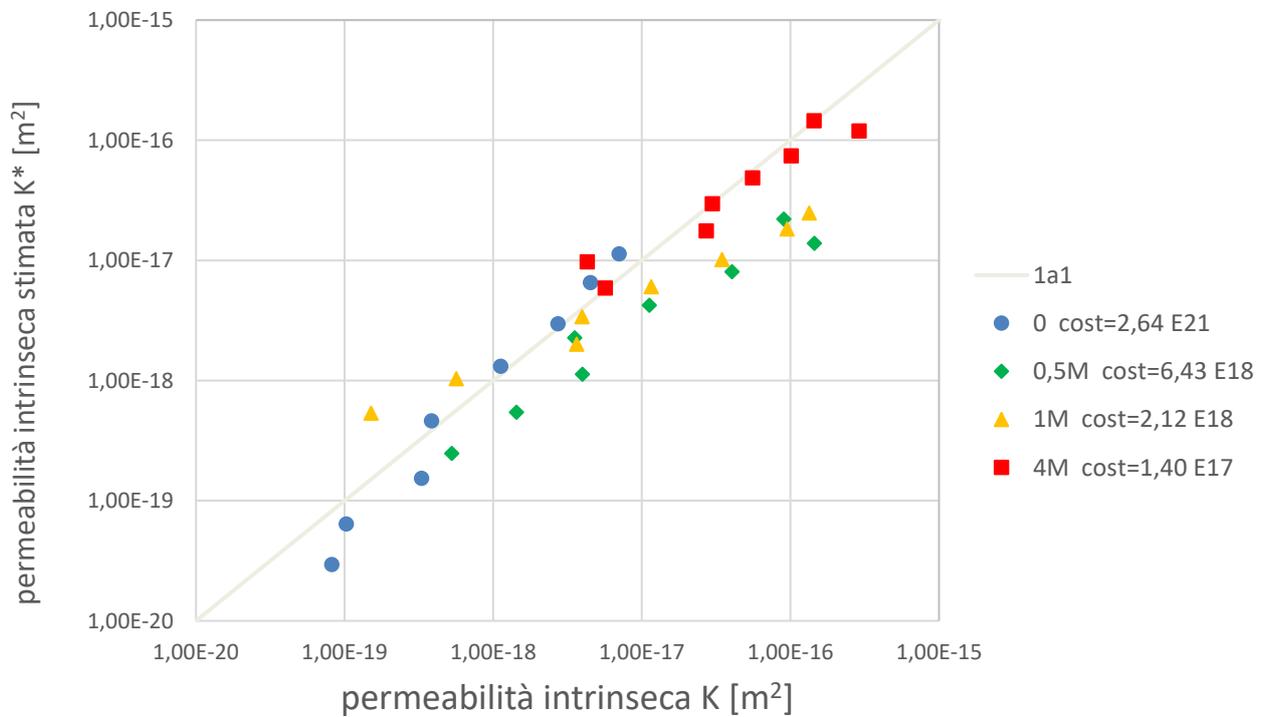


Fig. 4.39 – Stima della permeabilità intrinseca, con esponente di Kozeny-Carman pari a 4,5 per bentonite, saturata con cloruro di sodio a differenti molarità

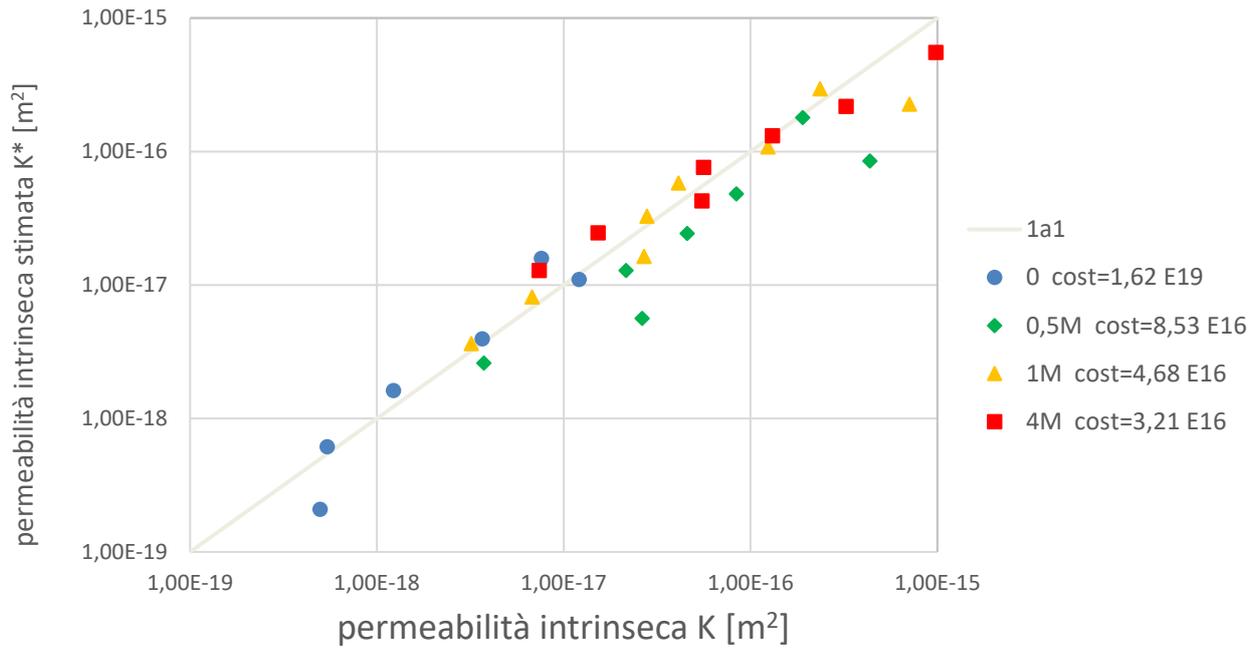


Fig. 4.40 – Stima della permeabilità intrinseca, con esponente di Kozeny-Carman pari a 4,5 per una miscela composta da 75% di illite e 25% di bentonite, saturata con cloruro di sodio a differenti molarità

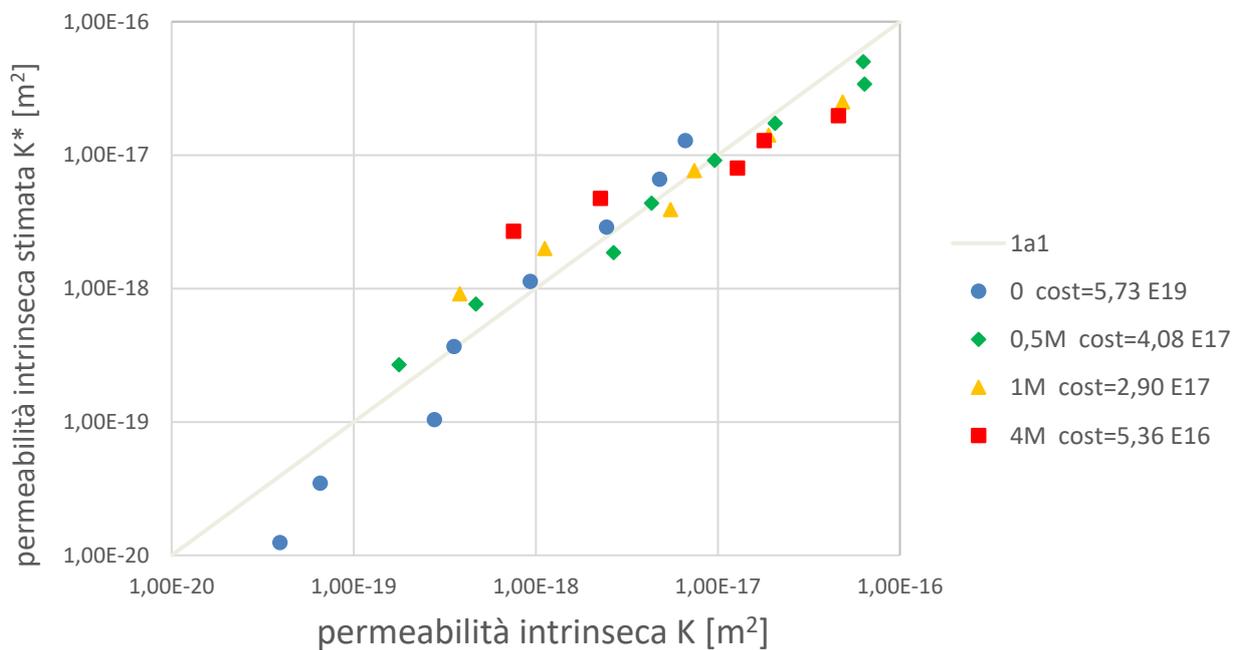


Fig. 4.41 – Stima della permeabilità intrinseca, con esponente di Kozeny-Carman pari a 4,5 per una miscela composta da 50% di illite e 50% di bentonite, saturata con cloruro di sodio a differenti molarità

I pesi specifici sono stati calcolati in precedenza (rif. Par. 4.1.2), mentre la stima della superficie specifica avviene con la seguente formulazione:

$$S_s = 1.8 w_L - 34 \left[m^2/g \right] \quad (4.22)$$

Dove: w_L è il limite liquido

Infine applicando l'equazione 4.23 si sono ricavati i valori di $k_0 T^2$

$$k_0 T^2 = \left(\frac{e^{4.5}}{1+e} \right)_{medio} / S_0^2 \quad (4.23)$$

Nel modello iniziale di Kozeny-Carman, tali fattori venivano supposti come segue:

$k_0 = 2.5$ e $T^2 = 2$, che moltiplicati danno 5.

Per valutare l'andamento di questo prodotto, per tutte le miscele trattate si sono costruiti due grafici in funzione della molarità (fig.4.43)

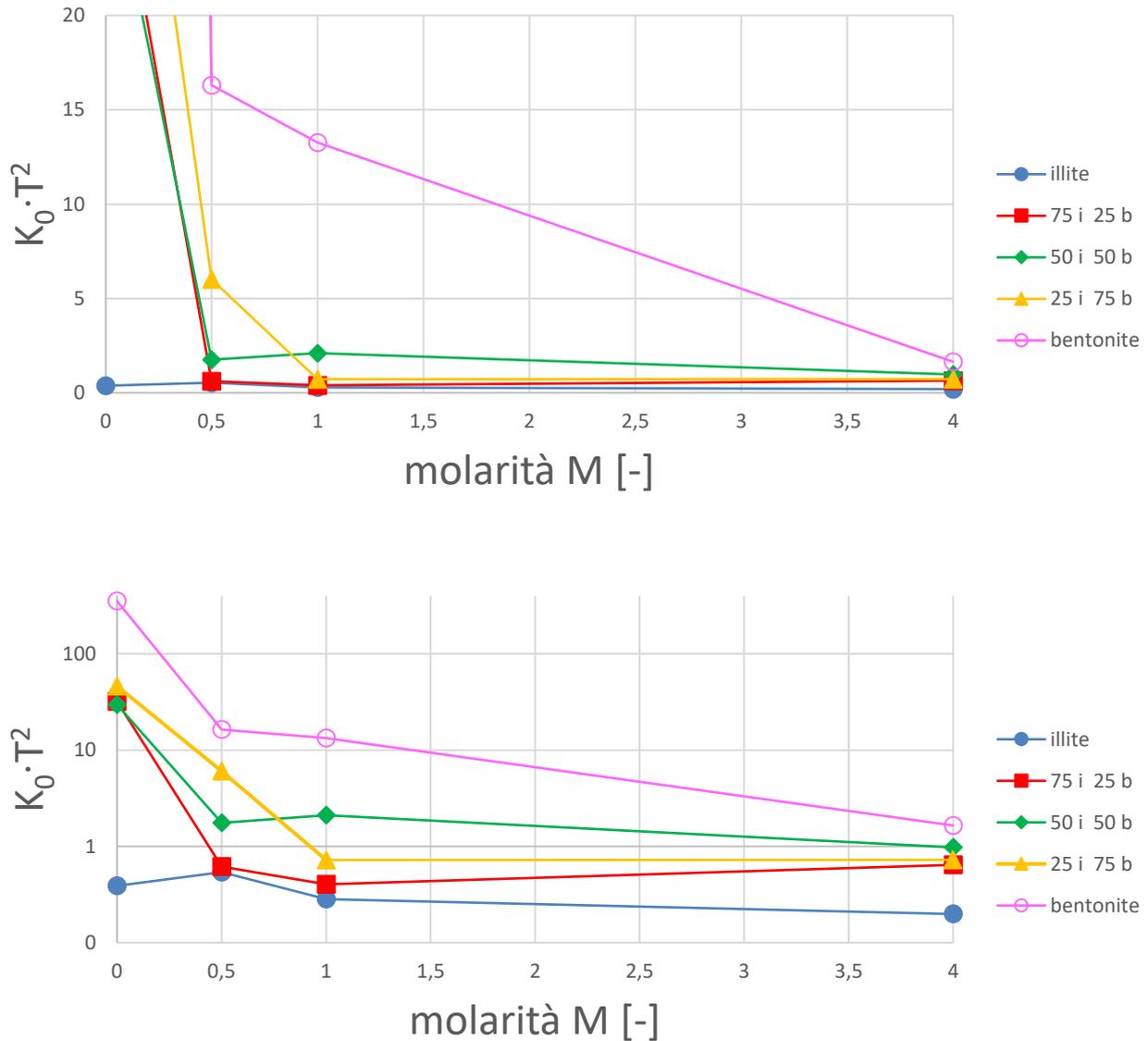


Fig. 4.43 – Stima del coefficiente $K_0 \cdot T^2$, con l'ipotesi di esponente di Kozeny-Carman pari a 4,5 per illite, bentonite e loro miscela, saturate con soluzioni di cloruro di sodio a differente molarità

Tale prodotto risulta quasi costante e prossimo al valore unitario per le tutte e cinque le prove eseguite ad elevata concentrazione (4M) di cloruro di sodio. Al diminuire della concentrazione l'intervallo tra i valori diventa sempre più ampio.

L'illite presenta un valore relativamente costante, poco dipendente dalla concentrazione salina, al contrario della bentonite che presenta un valore elevatissimo per la prova in acqua distillata.

4.4 OSSERVAZIONI MICROSTRUTTURALI (SEM)

Per studiare al meglio la composizione interna, dei minerali argillosi trattati in questa tesi, si sono eseguite delle analisi mediante il microscopio a scansione elettronica SEM. Le suddette sono state effettuate presso la facoltà di geologia dell'Università di Torino e con l'ausilio del Professor Emanuele Costa.

Obiettivo dell'indagine microscopica è l'investigazione dell'effetto della salinità della soluzione di cloruro di sodio sulla tessitura dei campioni ricostituiti. Inoltre l'obiettivo è stato anche il riconoscimento della struttura per miscele illite-bentonite aventi differenti rapporti di massa delle fasi solide.

Avendo a disposizione 20 combinazioni *miscela-soluzione* (vedi paragrafi precedenti), si è scelto di limitare quest'analisi solo a 7 di esse, considerate le più rappresentative.

In Tab. 4.12 sono riportate le combinazioni analizzate:

	MOLARITA'			
	0	0,5 M	1 M	4 M
ILLITE	•			•
75 I 25 B	•			
50 I 50 B				
25 I 75 B	•			•
BENTONITE	•			•

Tab. 4.12 – Combinazioni miscela-soluzione sottoposte ad analisi SEM

Per la preparazione dei campioni sono state necessarie due operazioni: per ottenere un provino consolidato è stata eseguita una prova edometrica (dettagli par. 3.3.2) seguita da un trattamento di liofilizzazione (dettagli par. 3.3.3). terminate queste due fasi, i campioni sono stati conservati in una campana di vetro per non alterarne il quantitativo d'acqua, fino alla data delle analisi di tipo SEM.

Le fotografie ottenute presentano volutamente differenti risoluzioni, per caratterizzare al meglio la disposizione particellare e stimare la grandezza delle particelle. Nelle immagini ad ingrandimento più elevato si può notare inoltre l'aspetto tridimensionale che questo tipo di analisi al microscopio garantisce.

a) Illite saturata con acqua distillata

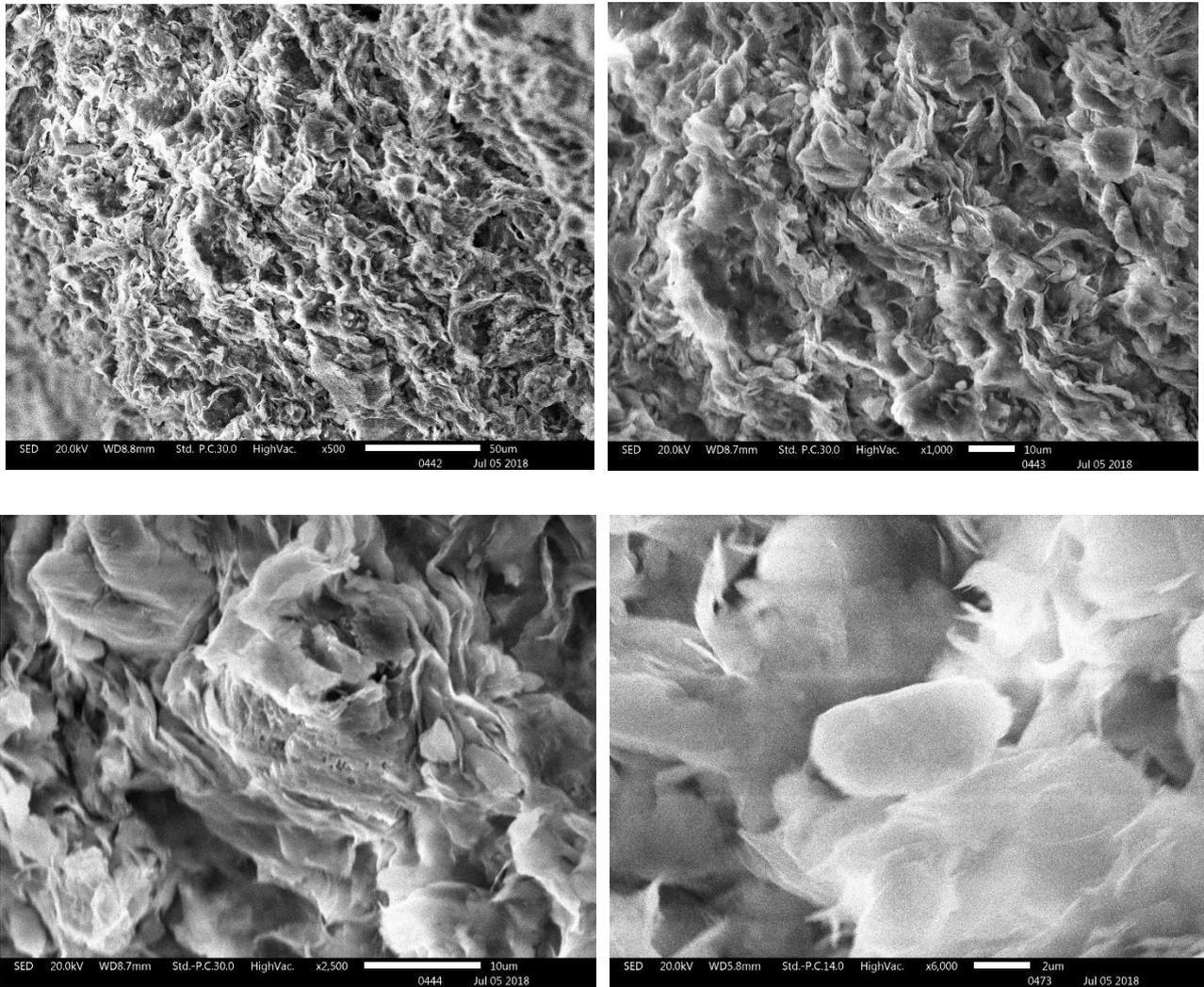


Fig. 4.44 – Ingrandimenti a differente risoluzione, su un campione di illite saturata con acqua distillata

L'illite pura in fig. 4.44, presenta delle particelle di forma esagonale, disposte senza un preciso orientamento. Dall'ultima immagine, avente ingrandimento x6000 si può stimare la dimensione di tale particella attorno ai 5 μm. Dalla tridimensionalità dell'immagine, si può anche supporre che tali particelle non presentino una dimensione trascurabile rispetto alle altre due.

b) Illite saturata con una soluzione di cloruro di sodio 4M

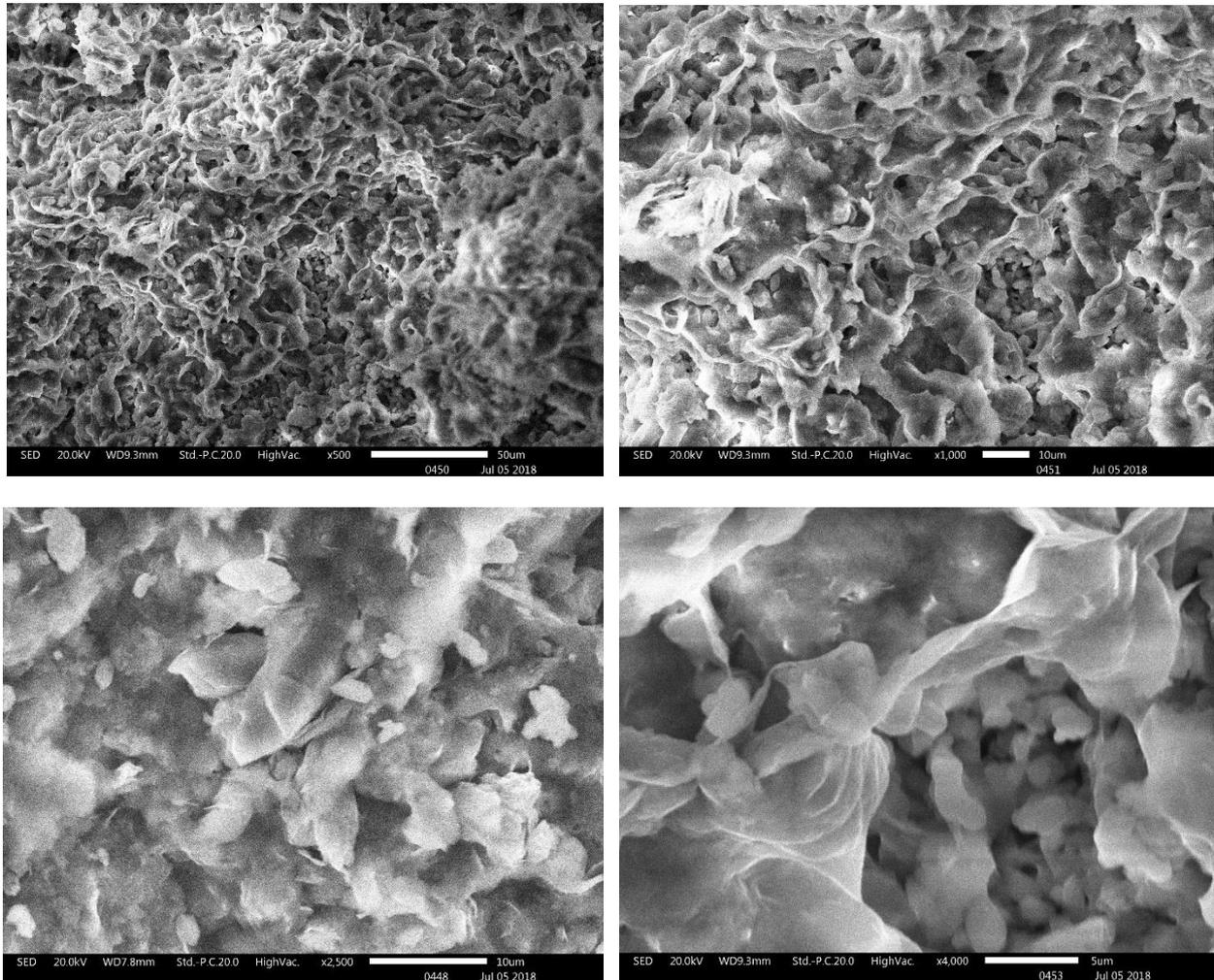


Fig. 4.45 – Ingrandimenti a differente risoluzione, su un campione di illite saturata con una soluzione di NaCl 4M

L'illite saturata con cloruro di sodio avente una molarità 4 (Fig. 4.45), per bassi ingrandimenti non sembra presentare differenze con il caso omologo in acqua distillata. Aumentando l'ingrandimento si notano sempre i cristalli di forma esagonale ed anche maggiori spazi tra le particelle, fatto che conferma l'aumento della conducibilità idraulica in presenza di cloruro di sodio.

c) Bentonite saturata con acqua distillata

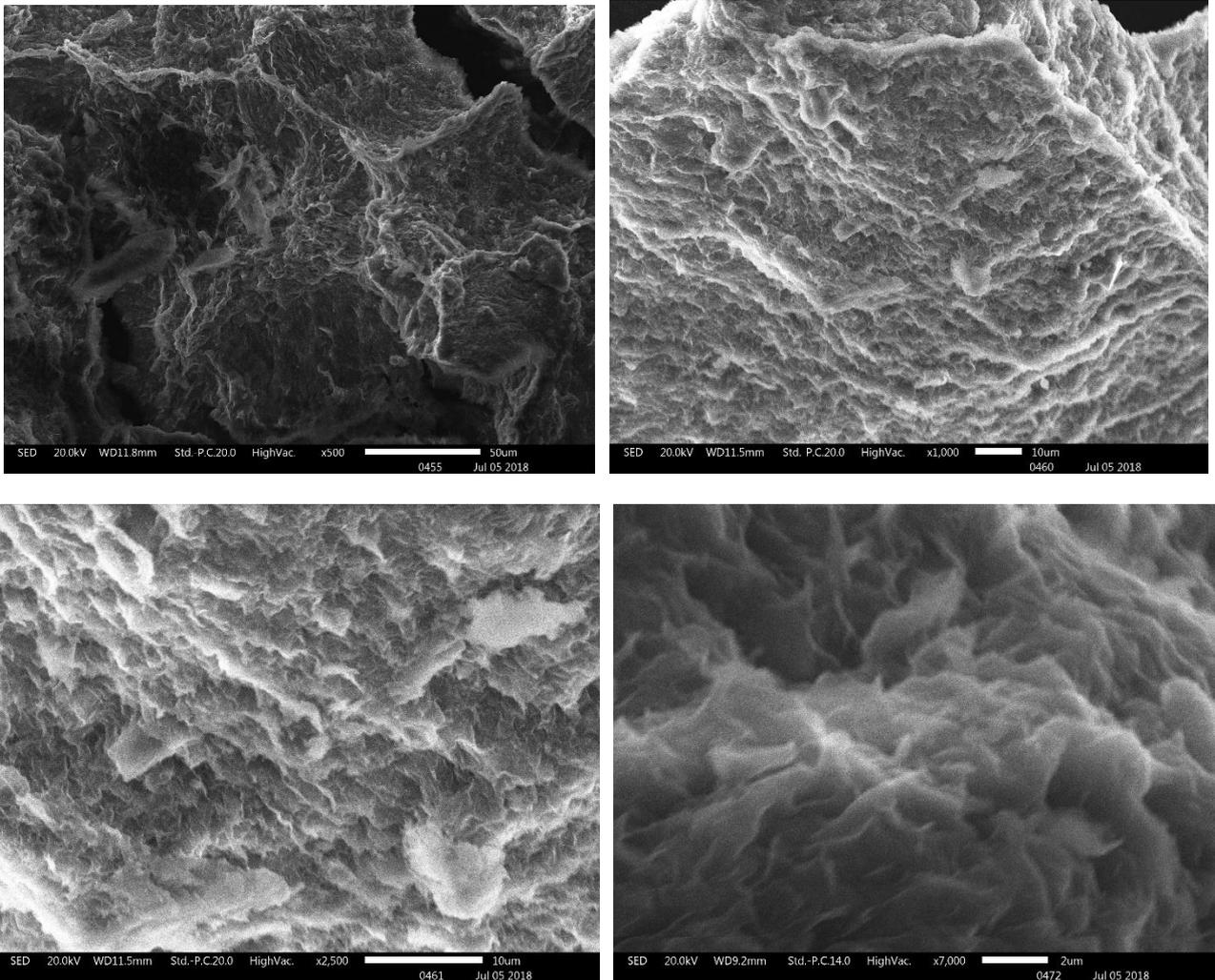


Fig. 4.46 – Ingrandimenti a differente risoluzione, su un campione di bentonite saturata con acqua distillata

La bentonite saturata con acqua distillata (Fig. 4.46) si presenta con una disposizione particellare “a foglietti” tipica delle montmorilloniti. Lo spessore di tali foglietti risulta quasi nullo e le particelle tendono a disporsi a strati paralleli, fatto che conferma l’elevato valore della superficie specifica della bentonite, che influenza l’elevato limite liquido e la bassa conducibilità idraulica

d) Bentonite saturata con una soluzione di cloruro di sodio 4M

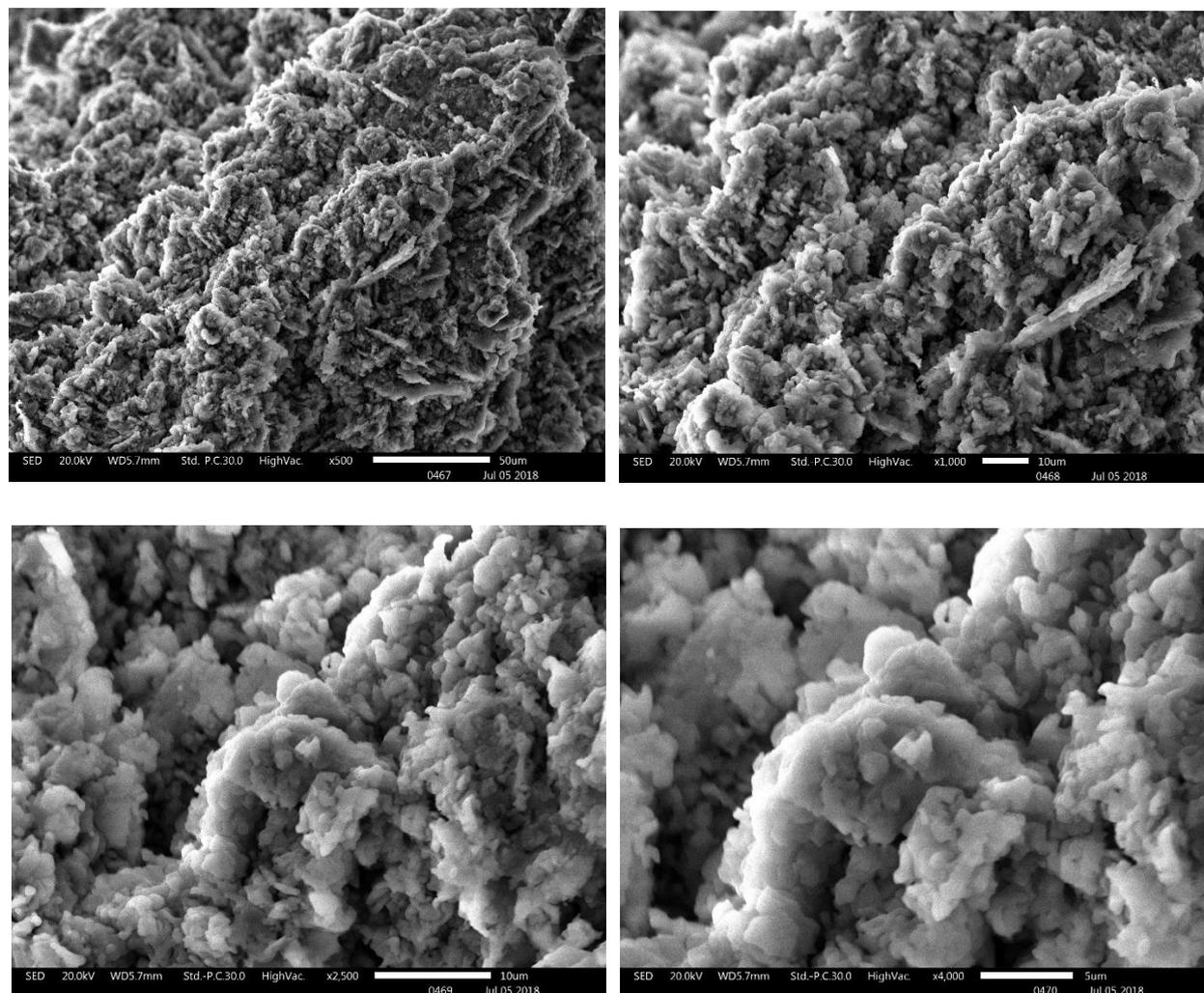


Fig. 4.47 – Ingrandimenti a differente risoluzione, su un campione di bentonite saturata con una soluzione di NaCl 4M

Nel caso della bentonite saturata con cloruro di sodio avente una molarità 4 (Fig. 4.47), si può apprezzare già dalle immagini a basso ingrandimento come la presenza di tale soluzioni muti la struttura particellare. Non sono più presenti i caratteristici “foglietti” che tendono a ritrarsi e globalmente presenta una disposizione completamente differente rispetto al caso in cui veniva saturata con acqua distillata. La bentonite risulta essere altamente sensiva al cloruro di sodio, come ampiamente confermato dai risultati sperimentali trattati in questo capitolo.

e) Miscela 75%illite-25%bentonite saturata con acqua distillata

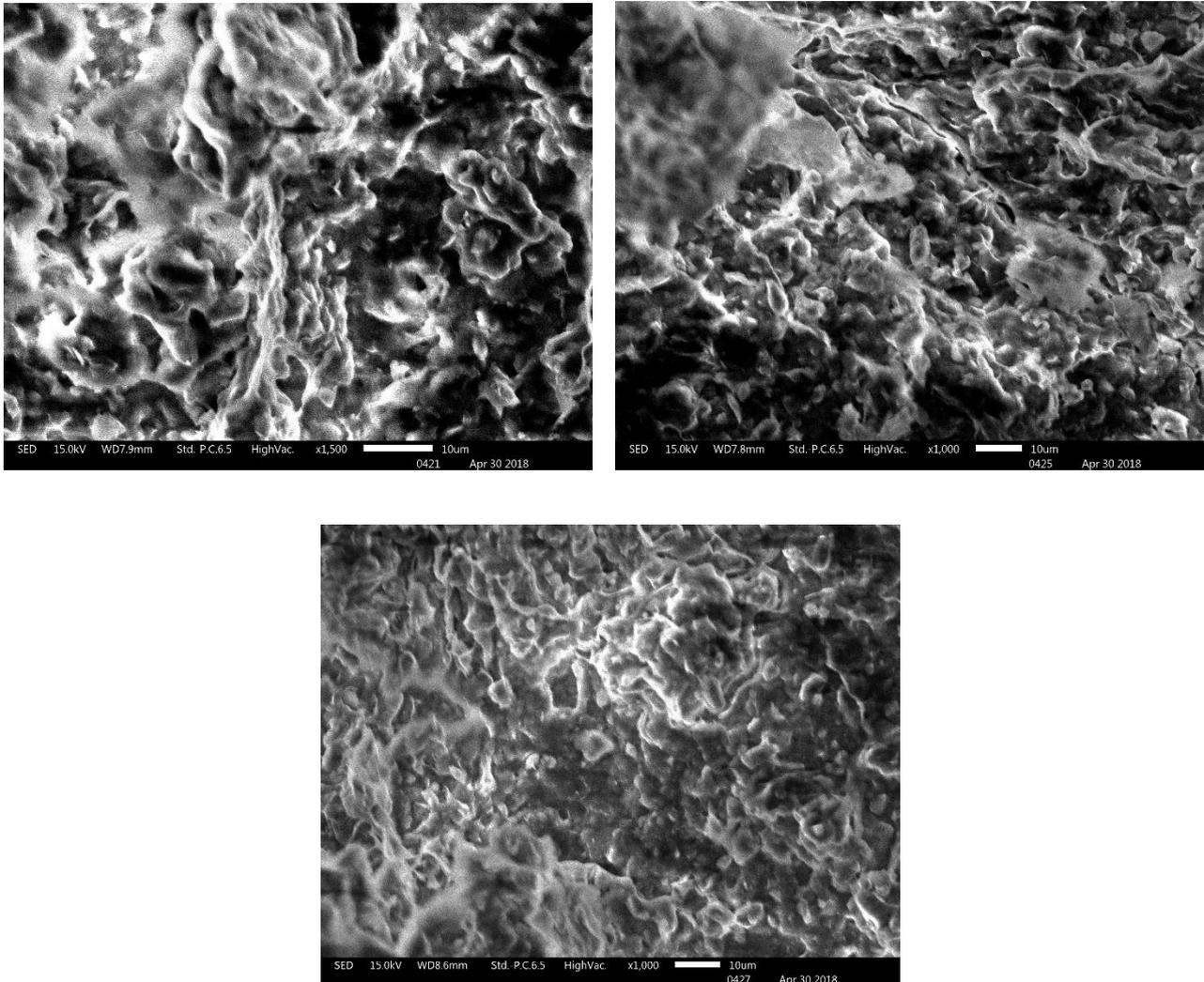


Fig. 4.48 – Ingrandimenti a differente risoluzione su una miscela composta al 75% da illite e dal 25% da bentonite, saturata con acqua distillata

L'illite pura presenterebbe delle particelle di forma esagonale, in questa miscela avente il 75% di illite ed il 25% di bentonite (Fig. 4.48), si può notare come piccoli quantitativi di bentonite siano sufficienti a far perdere quasi completamente questa caratteristica. In alcune zone questo fenomeno si nota maggiormente, probabilmente a causa della non perfetta omogeneizzazione della miscela. Come grandezza le particelle si presentano con dimensione dell'ordine del μm .

f) Miscela 25%illite-75%bentonite saturata con acqua distillata

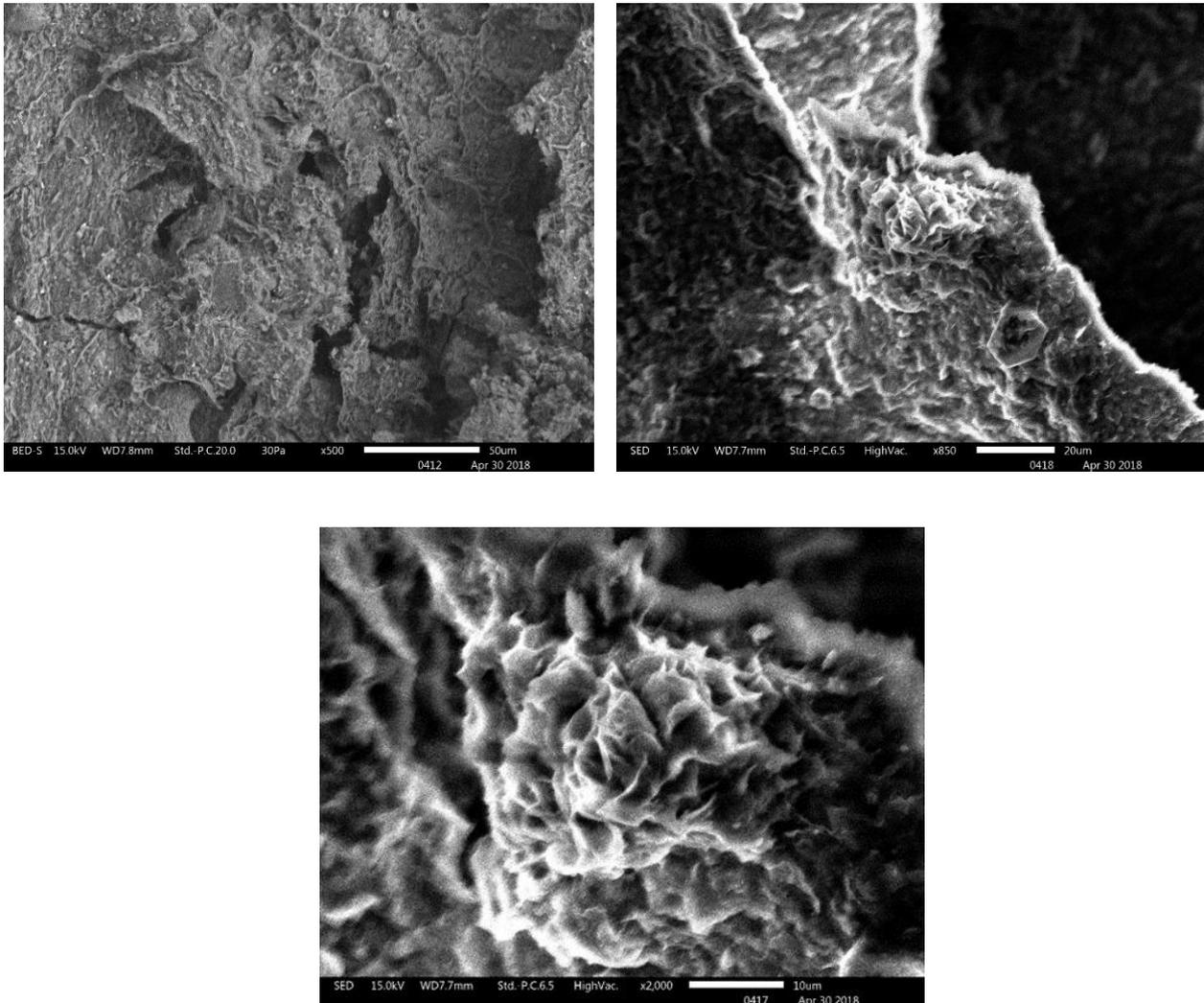


Fig. 4.49 – Ingrandimenti a differente risoluzione su una miscela composta al 25% da illite e dal 75% da bentonite, saturata con acqua distillata

In questa miscela a prevalente composizione bentonitica (75%) in Fig. 4.49, si può apprezzare come le particelle tendano a disporsi a “foglietti” o “petali” di dimensione di qualche μm . Dalle immagini aventi ingrandimento superiore (850x e 2000x) si può notare l’elevata superficie specifica delle particelle, il che conferma l’elevato valore di limite liquido trovato per la corrispettiva combinazione di miscela-soluzione (ovvero 414,81). Si conclude che l’illite risulta poco influente sulla disposizione particellare se presente in percentuali così basse nella miscela con la bentonite.

g) Miscela 25%illite-75%bentonite saturata con una soluzione di cloruro di sodio 4M

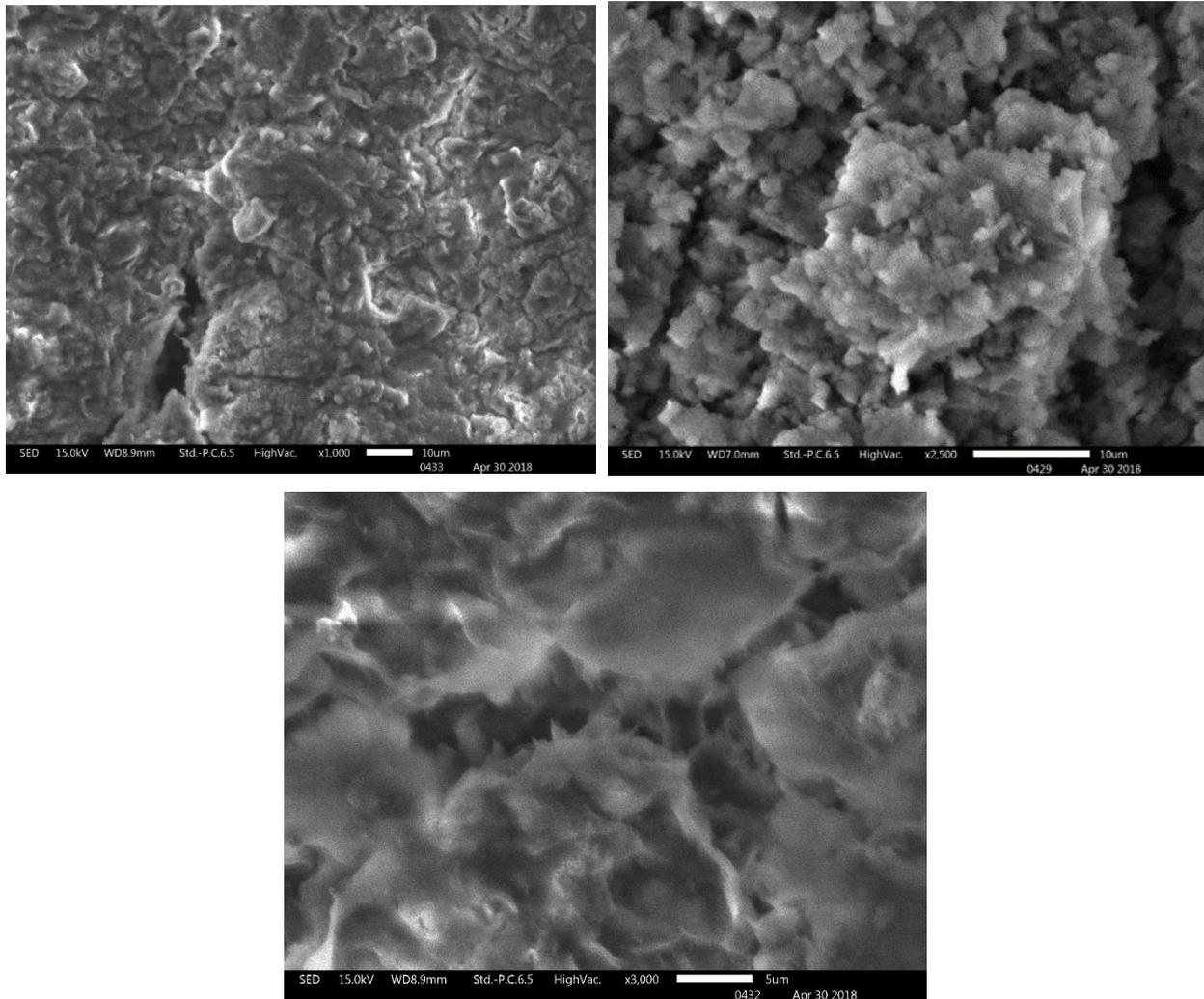


Fig. 4.50 – Ingrandimenti a differente risoluzione su una miscela composta al 25% da illite e dal 75% da bentonite, saturata con una soluzione di NaCl 4M

In questa miscela ad elevati, contenuto di bentonite (75%) e concentrazione di cloruro di sodio (4M), in Fig. 4.50, si può apprezzare come le particelle tendano ad una disposizione simile alla medesima miscela in acqua distillata. La presenza del sale ad elevata concentrazione tende a ridurre la superficie specifica, formando dei cristalli tra i vari *foglietti* di bentonite, che tendono a ritrarsi, come nella bentonite “pura”. Questo fenomeno tende ad abbassare notevolmente il limite liquido in esame (80,62). Le particelle cambiano forma ma non la loro dimensione che rimane di qualche μm .

CAPITOLO 5

CONCLUSIONI

La presente tesi ha avuto come oggetto lo studio del comportamento chemo-meccanico di due minerali argillosi, quali l'illite e la bentonite (entrambe nella loro forma sodica) e di loro miscele saturate, con soluzioni aventi differenti concentrazioni molari di cloruro di sodio (NaCl).

Si è investigato come la concentrazione elettrolitica di ioni sodio Na^+ , influisca sul comportamento idro-meccanico e di come i due diversi materiali (e loro miscele) reagiscono al variare di tale concentrazione molare.

La sperimentazione su tali minerali argillosi, è stata eseguita presso il Laboratorio di Geotecnica del (DISEG) Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica del Politecnico di Torino; attraverso lo studio degli effetti della salinità sui parametri indice, sulla resistenza al taglio e sulla rigidità.

Parallelamente si è eseguita una caratterizzazione mineralogica (mediante prove di diffrazione ai raggi x) ed un'analisi al microscopio a scansione elettronica (SEM), realizzata presso la Facoltà di Geologia dell'Università di Torino.

I limiti di Atterberg sono particolari valori del contenuto d'acqua che per i materiali coesivi, ne caratterizzano la consistenza (solido, semisolido, plastico). Sono stati eseguiti una miscela alla volta per ognuna delle quattro concentrazioni molari previste (acqua distillata, 0,5 M, 1M e 4 M). I risultati ottenuti, in particolar modo, quelli relativi al limite liquido della bentonite, sono coerenti con gli studi analoghi richiamati al capitolo 2. La bentonite sottoposta ad acqua distillata presenta un elevatissimo limite liquido (oltre 500), al contrario dell'illite che si attesta attorno al valore 80. L'aumento della concentrazione molare produce un abbassamento del limite liquido per tutte le combinazioni miscela-concentrazione analizzate, in particolar modo per la bentonite, che si

definisce un materiale altamente suscettibile. Le tre miscele presentano andamenti intermedi tra i due materiali, ma con predominanza delle caratteristiche tipiche della bentonite.

Dalla prova di diffrattometria, si voleva principalmente confermare la purezza delle due argille e tutto ciò è stato ampiamente confortato dai risultati di laboratorio, nei quali si è riscontrato una netta prevalenza dei rispettivi minerali rappresentativi, con picchi isolati di caolinite e quarzo.

L'analisi al microscopio a scansione elettronica, è stata eseguita per investigare la disposizione particellare dei due minerali e come essa varia, miscelando illite e bentonite, ma soprattutto in presenza di soluzioni saline. Le particelle di bentonite in acqua distillata, presentano la caratteristica forma a "foglietti" da cui segue l'elevata superficie specifica (elevato limite liquido), l'illite al contrario si presenta sotto forma di cristalli esagonali. All'aumentare della molarità i foglietti di bentonite tendono a ritrarsi, diminuendo la propria superficie, mentre la struttura dell'illite sembra non subire grossi mutamenti.

Le prove di taglio anulare, sono state eseguite per stimare l'angolo d'attrito residuo, parametro di notevole importanza in applicazioni geotecniche quali il calcolo della capacità portante o la stabilità dei pendii. E' noto come la presenza di soluzioni saline, tenda ad innalzare tale valore e i risultati sperimentali hanno confermato questa tendenza per tutte le miscele analizzate.

La bentonite presenta un basso valore in condizioni normali (7.9°) ed un valore più che raddoppiato (16.4°) in presenza di cloruro di sodio 4M, confermandosi un minerale altamente suscettibile anche rispetto al comportamento a taglio. La bentonite pura e le miscele aventi almeno il 50% di essa, presentano un involuppo di rottura in assenza di soluzioni saline, non lineare con concavità verso il basso, suggerendo l'utilizzo di un differente criterio di rottura rispetto a quello di Mohr-Coulomb. L'illite risulta essere poco suscettibile, alla presenza di soluzioni saline ed il suo angolo di resistenza residuo varia debolmente, da un minimo di 13.1° ad un massimo di $14,8^\circ$.

Si è inoltre studiato, il legame tra angolo di resistenza residuo ed indice di plasticità, i quali risultano inversamente proporzionali, per tutte le combinazioni di miscela-molarità analizzate, in analogia con studi di Lupini et. al. (1981) su altri terreni.

Infine è stato valutato il comportamento volumetrico, con prove edometriche ad incrementi di carico costante, eseguite per tutte e venti le combinazioni precedentemente descritte. La preparazione dei provini, è stata eseguita imponendo un contenuto d'acqua iniziale pari a 1,2 volte

il limite liquido precedentemente calcolato, per avere campioni normal-consolidati e saturi. Dalle curve di compressibilità, si è potuto notare come la bentonite abbia un'elevata pendenza in entrambi i rami della curva, tendenza che diminuisce all'aumentare della concentrazione salina e del quantitativo di illite. Presenta inoltre notevoli deformazioni (90%) nel caso in acqua distillata, portando quasi la strumentazione al limite operativo. L'illite presenta minori deformazioni ed anche in questa tipologia di prova, si dimostra poco sensibile alla presenza del cloruro di sodio nel liquido di cella. Dalle curve sulle miscele, che presentano andamenti intermedi, non si rilevano dati di particolare interesse.

Infine si è valutata la relazione tra indice dei vuoti, salinità e conducibilità idraulica. Dalla semplice correlazione con l'indice dei vuoti, si è visto come risultino direttamente proporzionali, in tutte le condizioni e come l'aumentare della molarità, porti ad un aumento della conducibilità. In acqua distillata, la bentonite possiede una conducibilità idraulica inferiore rispetto all'illite, a causa dell'elevata superficie specifica delle sue particelle. In presenza di cloruro di sodio, come descritto in precedenza, tende a perdere questa caratteristica e la sua conducibilità cresce fino a due ordini di grandezza.

La permeabilità assoluta delle miscele studiate è ben riproducibile con espressioni del tipo "Kozeny-Carman" con esponenti modificati (4,5 invece di 3), per tenere conto dell'elevata tortuosità delle argille.

BIBLIOGRAFIA

- BROMHEAD E.N. (1979). A simple ring shear apparatus, *Ground Engineering*, 12, 40 – 44.
- DI MAIO C. (1996). Exposure of bentonite to salt solution: osmotic and mechanical effects. *Géotechnique* 46 (4), 695 – 707.
- DI MAIO C. & FENELLI G. B. (1994). Residual strength of kaolin and bentonite: the influence of their constituent pore fluid. *Géotechnique* 44, No. 4, 211-226.
- DI MAIO C., SANTOLI L., SCHIAVONE P. (2004). Volume change behaviour of clays: the influence of mineral composition, pore fluid composition and stress state. *Mechanics of Materials* 36, 435–451.
- LANCELLOTTA R. (2005). *Geotecnica*, 3a ed., Zanichelli Editore, Bologna, 481 pp.
- LUPINI J.F., SKINNER A.E., VAUGHAN P.R. (1981). The drained residual strength of cohesive soils. *Géotechnique* 31, No. 2, 181-213.
- MESRI G. & OLSON R.E. (1970). Shear strength of montmorillonite. *Géotechnique* 20, No.3, 261-270.
- MITCHELL K.M. & SOGA K. (2005). *Fundamentals of soil behaviour*, 3rd edition, John Wiley & Sons. Inc., Hoboken, New Jersey, 558 pp.
- MULLER-VONMOOS M. & LOKEN T. (1989). The shearing behaviour of clays. *Applied Clay Science*, 4, 125-141.
- MUSSO G., CHIGHINI S., ROMERO E. (2008). Mechanical sensitivity to hydrochemical process of Monastero Bormida Clay, *Water Resources Research*, vol. 44.
- OLSON R.E. (1974). Shearing strengths of kaolinite, illite and montmorillonite, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, vol.100, No. GT11.
- SANTAMARINA J.C., KLEIN K.A., WANG Y.H., PRENCKE E. (2002), Specific surface: determination and relevance. *Canadian Geotechnical Journal* 39, 233–241.