

POLITECNICO DI TORINO



Collegio di Ingegneria Civile

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile

Tesi di Laurea Magistrale

**Ruolo della composizione chimica del
fluido interstiziale sul comportamento
idromeccanico e sulla microstruttura di
argille sature**

Relatore

Prof. Guido Musso

Correlatrice

Prof.ssa Vanessa Magnanimo (University of Twente)

Candidato

Paolo Trischitta

Dicembre 2018

Sommario

Indice delle figure.....	7
Indice delle tabelle	13
Introduzione	15
1. Caratteristiche mineralogiche dei minerali argillosi e interazione con i fluidi bagnanti .	17
1.1. Generalità.....	17
1.2. Struttura dei minerali argillosi.....	19
1.3. Idratazione delle argille e interazione fra le particelle	20
1.4. Teoria del Doppio strato e DLVO	22
2. Stato dell'arte sulla conducibilità idraulica delle argille a fluidi non acquosi	25
2.1. Fernandez & Quigley (1985).....	26
2.1.1. Test con una sola fase di permeazione	28
2.1.2. Test con due fasi di permeazione	31
2.1.3. Test con tre fasi di permeazione.....	34
2.2. Fernandez & Quigley (1988).....	37
2.2.1. Permeazione con etanolo.....	38
2.2.2. Permeazione con diossano	39
2.3. Fernandez & Quigley (1991).....	40
2.3.1. Permeazione con liquidi organici puri solubili in acqua	41
2.3.2. Permeazione con miscele di percolato di rifiuti urbani e liquidi organici	45
2.4. Bowders & Daniel (1987).....	50
2.4.1. Materiali	50
2.4.2. Procedure.....	50
2.4.3. Risultati	50
2.5. Uppot & Stephenson (1989).....	54
2.5.1. Materiali	54
2.5.2. Procedure.....	54

2.5.3.	Risultati	55
2.6.	Abdul et al. (2000).....	57
2.6.1.	Materiali	57
2.6.2.	Procedure.....	57
2.6.3.	Risultati	58
2.7.	Granapragasam et al. (1995).....	59
2.7.1.	Materiali	59
2.7.2.	Procedure.....	59
2.7.3.	Risultati	59
2.8.	Hueckel et al. (1997)	61
2.8.1.	Influenza della degradazione chimica della conducibilità idraulica sul trasporto convettivo di contaminanti attraverso uno strato omogeneo.....	61
2.8.2.	Modellazione della permeabilità intrinseca dei terreni argillosi.....	65
2.8.3.	Modello per la permeabilità all'acqua della frazione fine	66
2.8.4.	Modellazione dell'evoluzione della permeabilità intrinseca dovuta alla disidratazione chimica.....	70
2.8.5.	Modello per la variazione dei pori	71
2.8.6.	Modello per la migrazione delle particelle	72
2.8.7.	Modello per la variazione di connettività	74
2.8.8.	Modello per la flocculazione	76
2.8.9.	Conclusioni	79
3.	Sperimentazione in laboratorio	80
3.1.	Metodologia sperimentale	82
3.1.1.	Classificazione delle terre sulla base del limite liquido	82
3.1.2.	Prove di conducibilità idraulica con permeametro.....	84
3.1.3.	Prove di compressione Edometrica	92
3.1.4.	Analisi della microstruttura attraverso prove ad intrusione di mercurio su campioni liofilizzati.....	97

4. Comportamento idromeccanico delle argille: risultati sperimentali a scala macroscopica	100
4.1. Caratterizzazione Geotecnica di base	100
4.1.1. Limiti liquidi e plastici dei materiali sottoposti a sperimentazione	102
4.2. Risultati prove di conducibilità idraulica: Bentonite e Acqua distillata con permeametro a pareti flessibili.	105
4.3. Risultati prove di conducibilità idraulica: Bentonite e olio di paraffina con permeametro a pareti rigide.....	108
4.4. Risultati prove edometriche	110
4.4.1. Prove edometriche con campioni ricostituiti.....	111
4.4.2. Prove edometriche con campioni compattati	117
4.5. Confronto risultati.....	120
5. Modellazione numerica	125
5.1. Cenni teorici sul metodo agli elementi discreti (DEM).....	126
5.2. Codice di calcolo MercuryDPM.....	130
5.3. Caso studio	131
5.4. Ipotesi per la formulazione del modello DEM	134
5.5. Valutazione dell'interazione elettrochimica e meccanica tra gli aggregati	142
5.6. Calibrazione dei parametri per la simulazione DEM	146
5.7. Risultati dell'analisi numerica	150
6. Conclusioni e possibili sviluppi futuri	154
Bibliografia.....	157
Appendice.....	159
A.1. Grafici dei risultati ottenuti mediante procedura con il cucchiaio di Casagrande per la valutazione dei limiti liquidi del caolino e della bentonite	159
A.2. Curve di consolidazione dei campioni ricostituiti di bentonite saturati con olio di paraffina	162

A.3. Curve di consolidazione dei campioni ricostituiti di caolino saturati con acqua distillata	165
A.4. Curve di consolidazione dei campioni ricostituiti di caolino saturati con olio di paraffina	168
A.5. Curve di consolidazione dei campioni compattati di bentonite saturati con acqua distillata	171
A.6. Curve di consolidazione dei campioni compattati di bentonite saturati con olio di paraffina	174
A.7. Esempio di foglio di calcolo per il modello sovraconsolidato con acqua distillata ...	177

Indice delle figure

Figura 1-1 Valori approssimati della superficie specifica per alcuni minerali argillosi e per le sabbie (Burghignoli).....	17
Figura 1-2 Distizione tra argille attive, normali e inattive (Tarantino).....	18
Figura 1-3 Unità tetraedriche di silicio combinate in un reticolo piano a maglia esagonale (Burghignoli).....	19
Figura 1-4 Unità ottaedriche e loro combinazione in un reticolo piano (Burghignoli).....	19
Figura 1-5 Schema di una particella di argilla con gli strati di acqua adsorbita e di ioni diffusi (Burghignoli).....	20
Figura 1-6 Azioni risultanti tra le particelle (Burghignoli).....	21
Figura 1-7 Variazione del potenziale elettrico con la distanza dalla superficie della particella di argilla secondo il modello semplificato di Gouy-Chapman (Mitchell & Soga, 2005)	22
Figura 2-1 Schematizzazione del permeametro usato nella sperimentazione (sinistra) e della cella del permeametro (destra) (Fernandez & Quigley, 1985).....	26
Figura 2-2 Andamento della permeabilità per diverse tipologie di permeanti in funzione dell'indice dei vuoti (Fernandez & Quigley, 1985).....	28
Figura 2-3-Andamento della permeabilità in funzione della costante dielettrica per un indice dei vuoti unitario (Fernandez & Quigley, 1985).....	29
Figura 2-4-Influenza della costante dielettrica sul potenziale elettrico del doppio strato (Fernandez & Quigley, 1985).....	29
Figura 2-5 Permeabilità e concentrazione dell'effluente in funzione della permeazione valutata in volumi di pori (Fernandez & Quigley, 1985).....	31
Figura 2-6- Influenza dell'etanolo sulla flocculazione delle particelle di argilla in una sospensione di argilla in acqua: (a) sistema disperso acqua argilla; (b) inizio processo di formazione dei flocculi in seguito all'aggiunta di etanolo; (c) flocculi maturi (Fernandez & Quigley, 1985).....	32
Figura 2-7-Sistema argilla-acqua-xylene: (a) aggiunta di xylene ad una sospensione di argilla in acqua; (b) aggiunta di acqua ad una sospensione di argilla in xylene (Fernandez & Quigley, 1985).....	32
Figura 2-8 Permeabilità e concentrazione dell'effluente in funzione della permeazione sequenziale acqua-etanolo-benzene (Fernandez & Quigley, 1985)	34
Figura 2-9-Permeabilità e concentrazione dell'effluente in funzione della permeazione sequenziale benzene-etanolo-acqua (Fernandez & Quigley, 1985).....	35

Figura 2-10-Andamento della viscosità e della costante dielettrica in funzione della concentrazione di liquido organico (Fernandez & Quigley, 1988).....	37
Figura 2-11- Andamento della conducibilità idraulica (sinistra) e della permeabilità intrinseca (destra) al variare della concentrazione di etanolo (Fernandez & Quigley, 1988)	38
Figura 2-12-Andamento della conducibilità idraulica (sinistra) e della permeabilità intrinseca (destra) al variare della concentrazione di diossano (Fernandez & Quigley, 1988)	39
Figura 2-13 Andamento della conducibilità idraulica in funzione della tensione verticale efficace applicata (Fernandez & Quigley, 1991)	41
Figura 2-14-Risultati dei test di conducibilità idraulica con applicazione post-danno della tensione verticale (Fernandez & Quigley, 1991)	43
Figura 2-15-Andamento della conducibilità idraulica in funzione di diverse concentrazioni di diossano in un percolato di rifiuti urbani (Fernandez & Quigley, 1991)	45
Figura 2-16-Andamento della conducibilità idraulica in funzione di diverse concentrazioni di etanolo in un percolato di rifiuti urbani (Fernandez & Quigley, 1991)	46
Figura 2-17-Andamento della conducibilità idraulica e dei cedimenti in funzione della tensione verticale applicata (Fernandez & Quigley, 1991)	47
Figura 2-18-Andamento della conducibilità idraulica in funzione dell'entità della tensione verticale applicata nella condizione di pre-danno (Fernandez & Quigley, 1991).....	49
Figura 2-19 Risultati per la caolinite permeata con diverse concentrazioni di metanolo (Bowders & Daniel, 1987)	51
Figura 2-20 Risultati per l'illite- clorite permeata con diverse concentrazioni di metanolo (Bowders & Daniel, 1987)	51
Figura 2-21 Risultati per la caolinite permeata con diverse concentrazioni di acido acetico (Bowders & Daniel, 1987)	51
Figura 2-22 Risultati per l'illite-clorite permeata con diverse concentrazioni di acido acetico (Bowders & Daniel, 1987)	52
Figura 2-23 Risultati per la caolinite e per l'illite-clorite permeate con eptano puro e con concentrazione pari a 53mg/L (Bowders & Daniel, 1987)	52
Figura 2-24 Risultati per la caolinite e per l'illite-clorite permeate con tricloroetilene puro e con concentrazione pari a 1,100 mg/L (Bowders & Daniel, 1987)	53
Figura 2-25 Schematizzazione della strumentazione utilizzata durante la sperimentazione (Uppot & Stephenson, 1989).....	54
Figura 2-26 Risultati delle prove di conducibilità idraulica nel caso di permeazione con Acido acetico (sinistra) e Metanolo (destra) (Uppot & Stephenson, 1989).....	55

Figura 2-27 Schematizzazione del permeametro usato nella sperimentazione (Abdul, Gibson, & Rai, 1990).....	57
Figura 2-28 Risultati delle prove con permeametro per i materiali indagati (10^{-7} cm/s) (Abdul, Gibson, & Rai, 1990)	58
Figura 2-29 Risultati delle prove di conducibilità delle miscele sabbia-bentonite (Gnanapragasam, Lewis, & Finno, 1995)	59
Figura 2-30 Modello di flusso puramente convettivo attraverso uno strato omogeneo (Hueckel et al., 1997).....	61
Figura 2-31-Andamento della velocità del fluido (sinistra) e dell'avanzamento del fronte contaminato nel tempo (destra) (Hueckel et al., 1997)	63
Figura 2-32-Andamento del carico idraulico e delle pressioni idrauliche in funzione della profondità (Hueckel et al., 1997)	63
Figura 2-33-Cella elementare del modello (Hueckel et al., 1997).....	66
Figura 2-34-Disposizione delle piastrine di argilla (Hueckel et al., 1997)	67
Figura 2-35-Andamento del flusso nella cella elementare (Hueckel et al., 1997).....	67
Figura 2-36-Valori sperimentali ottenuti da Fernandez e Quigley (Hueckel et al., 1997).....	70
Figura 2-37-Modellazione con fascio di sottocanali paralleli di uguale dimensione (Hueckel et al., 1997).....	72
Figura 2-38-Modellazione con migrazione e occlusione dei pori (Hueckel et al., 1997).....	73
Figura 2-39-Espansione dei cluster a spese dei canali più grandi (Hueckel et al., 1997).....	74
Figura 2-40-Migrazione delle particelle per effetto del gradiente delle pressioni (Hueckel et al., 1997).....	75
Figura 2-41-Rotazione dei cluster dovuta alle forze attrattive (Hueckel et al., 1997)	76
Figura 2-42-Modello di calcolo per la soluzione di Denn (Hueckel et al., 1997).....	76
Figura 2-43 Ipotesi di base del modello di Denn (Hueckel et al., 1997)	77
Figura 3-1 Cucchiario di Casagrande	83
Figura 3-2 Permeametro a pareti flessibili: (a) Cella del permeametro, (b) Volumometri, (c) Pannello di controllo delle pressioni	85
Figura 3-3 Consolidometro del laboratorio di Geotecnica del Politecnico di Torino	86
Figura 3-4 Fasi di: (a) Fustellamento campione, (b) Saturazione circuiti del permeametro, (c) Installazione campione sul permeametro	88
Figura 3-5 Permeametro a pareti rigide.....	90
Figura 3-6 Edometro del laboratorio di Geotecnica del Politecnico di Torino	93
Figura 3-7 Tipica curva cedimenti-tempo per il generico gradino di carico.....	94

Figura 3-8 Metodi per l'interpretazione delle curve di consolidazione: (a) Casagrande e (b) Taylor	95
Figura 3-9 Curva edometrica nel piano $e\text{-}\log(\sigma'_v)$	96
Figura 3-10 Esempio curva di densità della distribuzione dei pori ottenibile con MIP (Musso, Romero, & Jommi, 2012).....	98
Figura 3-11 Liofilizzatore del Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia del Politecnico di Torino.....	99
Figura 4-1 Preparazione miscele Bentonite e Olio per il cucchiaino di Casagrande	103
Figura 4-2 Differenti consistenze tra le miscele Bentonite-Acqua (sinistra) e Bentonite-Olio (destra).....	104
Figura 4-3 Volume d'acqua totale uscente dal campione durante la fase di consolidazione .	105
Figura 4-4 Conducibilità idraulica del campione di bentonite permeato con acqua.....	107
Figura 4-5 Andamento della conducibilità idraulica della miscela bentonite e olio di paraffina	109
Figura 4-6 Differenza della microstruttura tra (a)un campione compattato a secco e (b)un campione slurry (Musso, Romero, & Della Vecchia, 2013).....	110
Figura 4-7 Curva edometrica campione ricostituito di Bentonite con olio di paraffina	111
Figura 4-8 Andamento del Modulo Edometrico del campione ricostituito di Bentonite con olio di paraffina	112
Figura 4-9 Conducibilità idraulica del campione ricostituito di Bentonite con olio di paraffina	112
Figura 4-10 Curva edometrica del campione ricostituito di Caolino con Acqua distillata	113
Figura 4-11 Andamento del Modulo Edometrico del campione ricostituito di Caolino con Acqua distillata.....	113
Figura 4-12 Conducibilità idraulica del campione ricostituito di Caolino con Acqua distillata	114
Figura 4-13 Curva edometrica del campione ricostituito di Caolino con olio di paraffina ...	115
Figura 4-14 Andamento del Modulo Edometrico del campione di Caolino con olio di paraffina	115
Figura 4-15 Conducibilità idraulica del campione ricostituito di Caolino con olio di paraffina	116
Figura 4-16 Curva edometrica del campione compattato con acqua distillata	117
Figura 4-17 Conducibilità idraulica del campione compattato con acqua distillata	117
Figura 4-18 Curva edometrica campione compattato di Bentonite con Olio di paraffina	118

Figura 4-19 Conducibilità idraulica campione compattato di Bentonite con Olio di paraffina	118
Figura 4-20 Curva edometrica campione compattato di Bentonite con Aria.....	119
Figura 4-21 Confronto tra le conducibilità idrauliche dei campioni ricostituiti di caolino....	120
Figura 4-22 Confronto tra le permeabilità intrinseche dei campioni ricostituiti di bentonite	121
Figura 4-23 Confronto tra le permeabilità intrinseche dei campioni ricostituiti di caolino ...	121
Figura 4-24 Confronto curve edometriche tra i campioni ricostituiti di bentonite	122
Figura 4-25 Confronto curve edometriche dei campioni ricostituiti di caolino	122
Figura 4-26 Confronto conducibilità idraulica bentonite valutata con le diverse tipologie di prova.....	123
Figura 4-27 Variazione della microstruttura:(a)Flocculazione e (b) Collasso dell'aggregato	124
Figura 5-1 Overlap tra due particelle	127
Figura 5-2 Legge adesiva elasto plastica.....	129
Figura 5-3 Curve di densità della distribuzione della dimensione dei pori (PSD) per le varie concentrazioni molari (Musso, Romero, & Della Vecchia, 2013).....	132
Figura 5-4 Andamento della conducibilità idraulica della bentonite FEBEX saturata con soluzioni saline di NaCl con diverse concentrazioni molari (Musso et al., 2013).....	133
Figura 5-5 Curve edometriche della bentonite FEBEX (Castellanos et al., 2005)	133
Figura 5-6 Variazione della PSD in seguito al rigonfiamento e valutazione della soglia tra micro e macro porosità	135
Figura 5-7 Curva cumulata dell'indice dei vuoti intruso	136
Figura 5-8 Calcolo del d_{poro} con il metodo di uguaglianza delle aree	137
Figura 5-9 Schemi di arrangement "fabric": a) cubico, b) tetraedrico, c) piramidale, d) cubico tetraedrico, e) tetragonale sfenoidale	138
Figura 5-10 Celle elementari quadrata e triangolare	140
Figura 5-11 Risultante delle azioni di natura elettrochimica per Acqua distillata e Soluzione di NaCl 5.5M.....	143
Figura 5-12 Modello Hertziano per il contatto tra due particelle.....	143
Figura 5-13 Legge costitutiva viscoelastica lineare semplificata per il contatto tra particelle	144
Figura 5-14 Leggi di interazione tra particelle semplificate con componente elettrochimica e meccanica	144
Figura 5-15 Schematizzazione delle fasi dell'analisi numerica:(a) Creazione dominio, (b) Compressione isotropa e (c) Compressione edometrica	147

Figura 5-16 Punti iniziali per la calibrazione dei parametri.....	148
Figura 5-17 Risultati analisi numerica sul campione di bentonite FEBEX con acqua distillata	151
Figura 5-18 Risultati analisi numerica sul campione di bentonite FEBEX con soluzione salina di NaCl 5.5M.....	152

Indice delle tabelle

Tabella 1 Valori dei tempi adimensionalizzati in funzione dei cedimenti normalizzati	96
Tabella 2 Limite Liquido per i materiali indagati	102
Tabella 3 Valori di diametro medio dei pori e indici dei vuoti dedotti dal MIP	138
Tabella 4 Valori di indice dei vuoti relativo alla macroporosità e rapporti tra i diametri del poro e dell'aggregato per i diversi modelli semplificativi	140
Tabella 5 Entità dello spessore del doppio strato	142
Tabella 6 Parametri per il modello con Acqua distillata	150
Tabella 7 Parametri per il modello con soluzione salina di NaCl 3.5M	150
Tabella 8 Risultati analisi numerica sul campione di bentonite FEBEX con acqua distillata	150
Tabella 9 Risultati analisi numerica sul campione di bentonite FEBEX con soluzione salina di NaCl 5.5M	152

Introduzione

In funzione delle dimensioni granulometriche e delle caratteristiche mineralogiche, le argille rappresentano da sempre oggetto di grande interesse nel campo dell'ingegneria geotecnica. Svariate, infatti, sono le applicazioni in campo ambientale in cui vengono sfruttati tali materiali. Basti pensare, per esempio, a quelli che sono i sistemi di incapsulamento dei siti contaminati, quali le discariche. Per evitare la diffusione dell'inquinante nel sottosuolo, lo si va a circoscrivere mediante la realizzazione di una "gabbia" costituita solitamente da una copertura, diaframmi laterali e sistemi di isolamento di fondo. In Europa, solitamente, un sistema di questo tipo viene realizzato con miscele di cemento e bentonite. Si va a sfruttare, in tal modo, quella che è la modesta conducibilità idraulica che contraddistingue un materiale argilloso come la bentonite. L'efficacia a lungo termine di interventi di questo tipo, però, risulta essere fortemente influenzata dalla tipologia di fluido che interagisce con il materiale. Infatti, essendo caratterizzate da una elevata superficie specifica, le argille risultano contraddistinte da una intensa attività chimica superficiale, che ne determina in maniera cruciale il comportamento idromeccanico.

Studi sperimentali condotti nel passato sulla conducibilità idraulica delle argille hanno evidenziato una forte dipendenza del valore di conducibilità idraulica dei campioni dalla tipologia di fluido permeante considerato. In particolar modo, è stato attribuito al valore della costante dielettrica del fluido la possibile causa di tale fenomeno. Questa, infatti, entra in gioco nel doppio strato, condizionando fortemente l'interazione tra le particelle e, pertanto, la microstruttura del materiale. Misure di porosimetria ad intrusione di mercurio nei campioni analizzati, hanno confermato una variazione della tessitura del materiale. La permeazione con fluidi non acquosi, a cui è associata una costante dielettrica inferiore a quella dell'acqua, causano una riduzione della forza repulsiva tra le particelle ed un concomitante incremento dei macropori accessibili al flusso, a cui è stata associata la variazione repentina di conducibilità idraulica mostrata dagli esperimenti condotti in laboratorio.

Comunque, la comprensione dei meccanismi che governano la dipendenza della conducibilità idraulica delle argille dal fluido bagnante rimane tutt'oggi abbastanza limitata. Il presente elaborato si pone, pertanto, l'obiettivo di approfondirne lo studio, cercando di coglierne gli aspetti più significativi.

In particolar modo, il lavoro svolto si può suddividere in due fasi:

1. Sperimentazione in laboratorio;
2. Modellazione numerica delle evidenze sperimentali.

Con la prima, si vuole dare seguito a quello che è il lavoro condotto precedentemente e confermare la validità delle ipotesi avanzate, in primis, da Fernandez e Quigley e, successivamente, anche da altri autori, sottoponendo ad analisi materiali diversi da quelli studiati in passato (bentonite e olio di paraffina). Sono state eseguite non solo prove di conducibilità idraulica con permeametro, ma anche di compressione edometrica.

Con la seconda, invece, sfruttando il codice di calcolo agli elementi discreti (DEM) *Mercury DPM*, si vuole rappresentare numericamente ciò che i risultati sperimentali hanno mostrato. In particolar modo, l'obiettivo è quello di rappresentare attraverso un modello micromeccanico il fenomeno che si percepisce a livello macroscopico.

Il presente elaborato è stato strutturato sulla base di capitoli in cui, inizialmente, si affronterà una breve descrizione delle proprietà mineralogiche e granulometriche delle argille. Seguirà una sezione descrittiva dello stato dell'arte sulla conducibilità idraulica di argille a fluidi non acquosi. Quindi, ampio spazio sarà dedicato all'attività svolta per la redazione di tale elaborato a partire dalla sperimentazione in laboratorio sino alla modellazione numerica, eseguita all'Università di Twente.

Infine, un apposito capitolo conclusivo è stato redatto per l'esposizione di un'analisi globale dei risultati ottenuti e dei futuri sviluppi che potrà avere lo studio effettuato.

1. Caratteristiche mineralogiche dei minerali argillosi e interazione con i fluidi bagnanti

Questo capitolo è dedicato ad una breve introduzione sulla natura mineralogica e sulla struttura elementare delle particelle che costituiscono un'argilla, in maniera tale da giustificare, a partire dalla scala microscopica, i fenomeni macroscopici osservati durante la sperimentazione in laboratorio, ampiamente discussi nei capitoli seguenti.

1.1. Generalità

Argilla è il termine che definisce un sedimento non litificato estremamente fine (dimensioni delle particelle inferiori a $2\mu\text{m}$ di diametro) costituito principalmente da alluminosilicati idrati appartenenti alla classe dei fillosilicati. I minerali che compongono l'argilla sono tutti appartenenti alla sottoclasse dei fillosilicati e definiti collettivamente minerali argillosi. In generale, le particelle che costituiscono la fase solida di un terreno interagiscono fra loro mediante azioni sia di carattere meccanico che elettro-chimico. Le prime derivano da forze di massa e dalla pressione del fluido interstiziale presente all'interno del terreno, le seconde invece sono direttamente collegate all'attività superficiale delle particelle. L'entità di queste ultime dipende fortemente dalla composizione mineralogica delle particelle e dalla estensione della loro superficie. In particolar modo, il valore della superficie specifica cresce esponenzialmente al diminuire della dimensione delle particelle. Questo comporta, pertanto, un'attività superficiale molto intensa nei materiali a grana fine rispetto a quella che si può avere in materiali quali sabbie o ghiaie, per i quali risulta essere nettamente trascurabile. Per tal motivo, l'interazione superficiale influenza fortemente il comportamento di una terra a grana fine. A titolo di esempio si riporta in Figura 1-1, per alcuni minerali argillosi e per una sabbia, i valori di superficie specifica, data dal rapporto tra la superficie e la massa della particella.

Granuli di terreno	Dimensione media	Superficie specifica (m^2/g)
ARGILLE		
Montmorillonite	$10\text{\AA}$	fino a 840
Illite	$0.03 - 0.1\ \mu$	$65 \div 200$
Caolinite	$0.1 - 4\ \mu$	$10 \div 20$
SABBIA	2 mm	$2 \cdot 10^{-4}$

Figura 1-1 Valori approssimati della superficie specifica per alcuni minerali argillosi e per le sabbie (Burghignoli)

Le particelle costituenti lo scheletro solido delle terre a grana fine sono, quindi, contraddistinti da un'intensa attività, essi infatti interagiscono tra di loro e con il fluido interstiziale non solo per effetto delle forze di massa, ma anche e soprattutto per quelle di superficie.

È possibile definire un *Indice di attività* nel seguente modo:

$$I_a = \frac{I_p}{CF} \quad (1.1)$$

con I_p indice plastico e CF percentuale in peso di argilla ($d < 0.002$ mm).

Sulla base di tale parametro, un'argilla può essere attiva, normale o inattiva (Figura 1-2):

- Attiva se $I_a > 1.25$;
- Normale se $0.75 < I_a < 1.25$;
- Inattiva se $I_a < 0.75$.

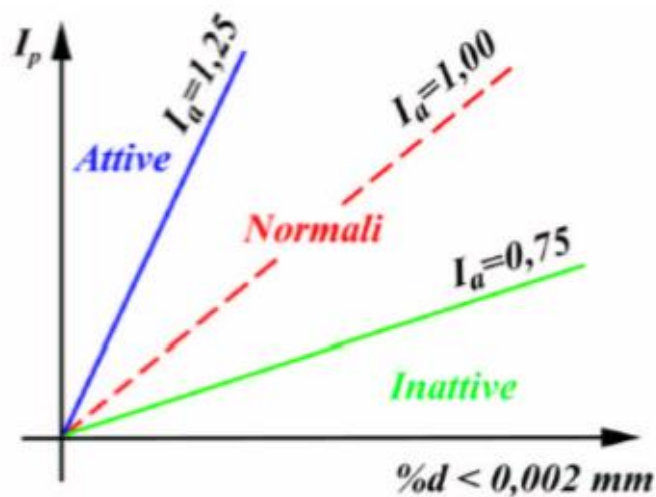


Figura 1-2 Distizione tra argille attive, normali e inattive (Tarantino)

1.2. Struttura dei minerali argillosi

I minerali argillosi sono silicati idrati a struttura lamellare che rientrano nel gruppo dei fillosilicati. Le unità fondamentali della struttura dei minerali argillosi sono tetraedri ed ottaedri collegati tra loro a formare maglie piane. Queste maglie sono a loro volta collegate, in direzione normale al loro piano, sia direttamente che indirettamente, cioè mediante altri ioni. Nell'unità tetraedrica, il silicio costituisce l'atomo centrale ed è collegato a quattro ioni ossigeno posti ai vertici del tetraedro. I tetraedri sono collegati fra loro attraverso ioni ossigeno, formando un reticolo piano a maglia esagonale (Figura 1-3).

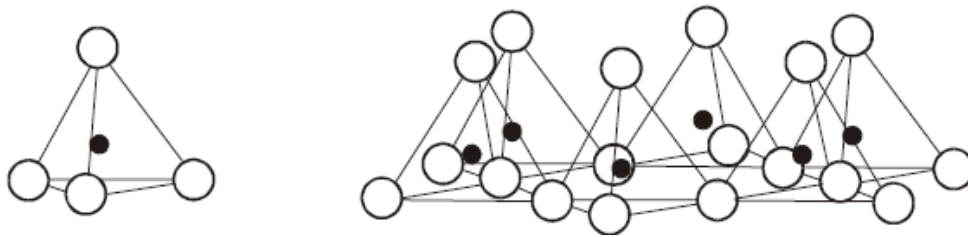


Figura 1-3 Unità tetraedriche di silicio combinate in un reticolo piano a maglia esagonale (Burghignoli)

L'unità ottaedrica, costituita da uno ione di alluminio (o magnesio) e sei ioni ossigeno, dà luogo a reticoli formati da due piani di ioni ossigeno che contengono un piano di ioni alluminio (Figura 1-4).

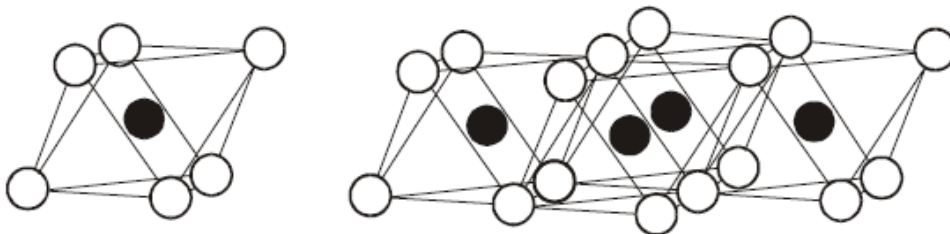


Figura 1-4 Unità ottaedriche e loro combinazione in un reticolo piano (Burghignoli)

La singola particella non è altro che il frutto della combinazione delle unità tetraedriche ed ottaedriche in “pacchetti elementari” e successivamente da quella di più pacchetti.

Alcuni cationi nelle unità tetraedriche ed ottaedriche sono sostituiti da cationi di valenza minore secondo un processo di *sostituzione isomorfa*, che conferisce alla superficie della particella argillosa una carica negativa netta.

Pertanto, la generica particella può interagire con altre particelle, con il fluido interstiziale e con eventuali ioni in esso disciolti. Tutto ciò ha conseguenze importanti sulle modalità di aggregazione fra le particelle e quindi sulle caratteristiche meccaniche dei materiali argillosi.

1.3. Idratazione delle argille e interazione fra le particelle

Le particelle argillose sono sempre circondate da uno o più strati di molecole d'acqua definita come "acqua adsorbita". Tali molecole devono essere considerate come parte integrante della particella stessa e non come acqua libera di muoversi all'interno dei pori. L'acqua è attratta dalla superficie delle particelle, parzialmente negativa, sia perché le sue molecole dipolari tendono a saturare tale carica, sia perché interagisce tramite legami H^+ OH^- con gli atomi d'ossigeno. Ulteriori legami di questo tipo possono formarsi fra il primo strato di molecole d'acqua ed altre molecole d'acqua, ma la forza di legame tende man mano a diminuire con l'aumentare della distanza. Quindi, pian piano, l'acqua perde progressivamente le caratteristiche di acqua adsorbita fino ad assumere quelle di acqua "interstiziale", ovvero libera di muoversi all'interno dei pori tra le particelle. La parziale carica negativa sulla superficie delle particelle viene neutralizzata dai cationi disciolti in nell'acqua. La presenza di molecole d'acqua e ioni diffusi nell'intorno della singola particella, crea un complesso di cariche elettriche come quello rappresentato in Figura 1-5.

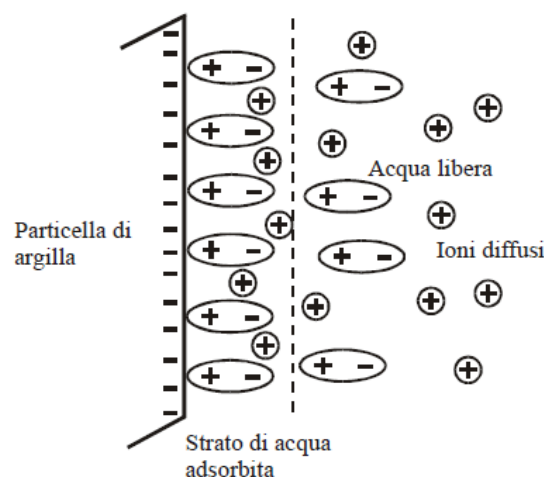


Figura 1-5 Schema di una particella di argilla con gli strati di acqua adsorbita e di ioni diffusi (Burghignoli)

Ciò che è rappresentato nell'immagine soprastante viene indicato solitamente con il termine di "Doppio strato", riferendosi appunto ad una superficie della particella parzialmente negativa saturata da uno strato di acqua adsorbita, immobile, e ioni in essa disciolti. Quest'ultimo, come si vedrà nel seguito, gioca un ruolo fondamentale nel fenomeno di incremento della conducibilità idraulica in campioni di argilla permeati con liquidi non acquosi.

A causa di questa parziale carica negativa superficiale, le particelle delle argille esercitano una reciproca azione repulsiva che decresce all'aumentare della distanza. A questa azione, si oppone l'attrazione dovuta alle forze di Van der Waals, prodotte dal campo magnetico

generato dal moto degli elettroni intorno ai nuclei. Anche queste ultime si riducono al crescere della distanza.

Pertanto, in funzione della distanza e della concentrazione elettrolitica, si avrà una forza risultante agente sulla singola particella, data dalla combinazione delle due azioni sopradescritte (Figura 1-6).

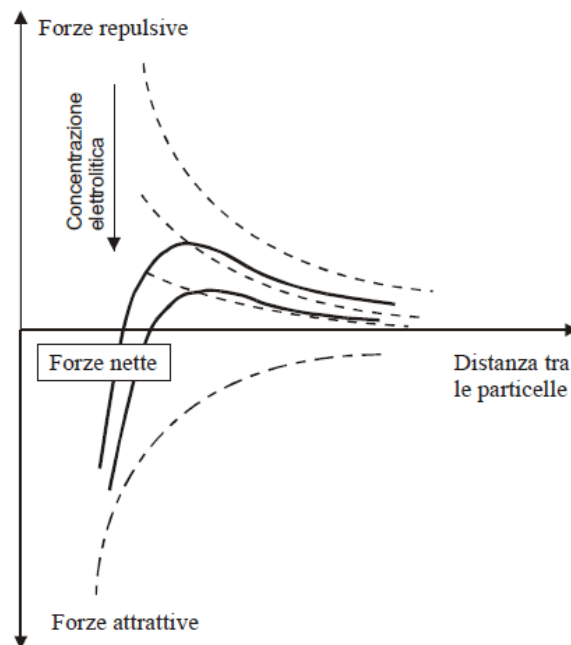


Figura 1-6 Azioni risultanti tra le particelle (Burghignoli)

Quella mostrata in Figura 1-6 è più comunemente conosciuta come *teoria DLVO*, dal nome degli autori che l'hanno formulata (Derjaguin, Landau, Verwey e Overbeek, 1940). Di questa si darà un'esplicitazione nel paragrafo successivo.

1.4. Teoria del Doppio strato e DLVO

Come accennato precedentemente, la superficie delle particelle di argilla risulta essere contraddistinta da una parziale carica negativa. Questa viene neutralizzata dai dipoli d'acqua e dagli ioni in essa disciolti come mostrato in Figura 1-5. Quello rappresentato in tale figura viene comunemente definito *doppio strato* e riveste un ruolo fondamentale nell'interazione tra le particelle di argilla. In sostanza, la superficie della generica particella può essere vista come la piastra di un condensatore, soggetta ad una determinata carica negativa, capace di generare un campo elettrico nel suo intorno. L'energia potenziale di uno ione in un campo elettrico può essere scritta come:

$$E_i = v_i e \Psi \quad (1.2)$$

dove v_i è la valenza ionica, e la carica elettrica (1.602×10^{-19} C) e Ψ il potenziale elettrico nel generico punto. Il potenziale elettrico è definito come il lavoro necessario per portare una carica positiva da uno stato di riferimento ad uno specifico punto nel campo elettrico. Sulla base della teoria di Gouy-Chapman, il potenziale varia con la distanza dalla superficie della particella di argilla secondo una legge esponenziale del tipo mostrato in Figura 1-7:

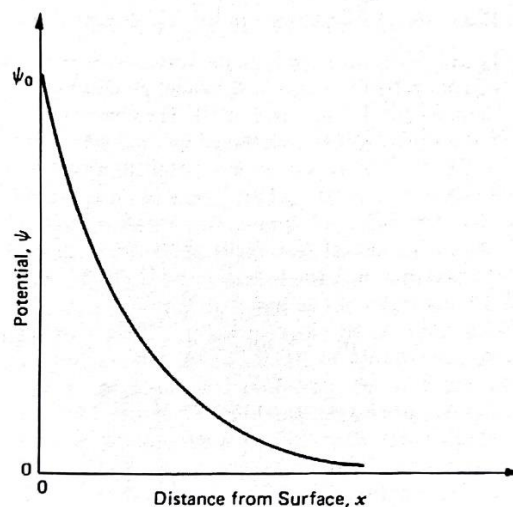


Figura 1-7 Variazione del potenziale elettrico con la distanza dalla superficie della particella di argilla secondo il modello semplificato di Gouy-Chapman (Mitchell & Soga, 2005)

Secondo tale teoria, pertanto, allontanandoci dalla superficie della particella di argilla i legami tra i dipoli d'acqua o ioni e la carica superficiale stessa risulteranno essere sempre più tenui. Quindi, si prenda in considerazione l'equazione differenziale del doppio strato elettrico, la quale descrive l'andamento del potenziale elettrico nello spazio antistante un piano elettricamente carico:

$$\frac{d^2\Psi}{dx^2} = \frac{2n_0ve}{\varepsilon} \sinh \frac{ve\Psi}{kT} \quad (1.3)$$

dove x è la distanza, n_0 è la concentrazione di ioni allo stato di riferimento, ε è la costante dielettrica del mezzo, k la costante di Boltzman e T la temperatura.

È possibile definire uno spessore medio del doppio strato attraverso la:

$$\frac{1}{K} = \left(\frac{\varepsilon_0 D k T}{2 n_0 e^2 v^2} \right)^{1/2} \quad (1.4)$$

Quest'ultima identifica il "baricentro" del potenziale elettrico nello strato diffuso.

Da tale relazione è possibile notare come ci sia una dipendenza dello spessore del doppio strato da concentrazione ionica e costante dielettrica. In particolar modo, un incremento della concentrazione ionica o una riduzione della costante dielettrica comportano un abbattimento del doppio strato. Questo determina una sostanziale variazione nell'interazione tra le particelle.

Infatti, come già accennato nel paragrafo precedente, le particelle argillose interagiscono mediante azioni di attrazione (Van der Waals) e repulsione (Doppio strato). Dal punto di vista matematico queste azioni possono essere espresse in funzione delle seguenti espressioni (Israelachvili, 1991):

- *Forza di attrazione*

$$Att = -\frac{A_h}{6r^2} a \quad (1.5)$$

in cui A_h è la costante di Hamaker, a raggio delle sfere e r distanza tra le particelle.

- *Forza di repulsione*

Tale forza si ricava a partire dall'espressione della pressione di attrazione tra due particelle:

$$R_{DL} = 64RTc_0 e^{-rK} \quad (1.6)$$

con R costante dei gas, T temperatura, c_0 concentrazione ionica, r distanza tra le particelle e ϑ spessore del doppio strato. Integrando rispetto alla distanza si ottiene la densità energia:

$$W = 64RTc_0 \frac{1}{K} e^{-rK} \quad (1.7)$$

e quindi, nell'ipotesi di particelle sferiche, utilizzando l'approssimazione di Derjaguin:

$$F_{DL} = \pi a W = \pi a 64RTc_0 \frac{1}{K} e^{-rK} \quad (1.8)$$

Questa relazione viene utilizzata nel caso di "lunghe" distanze tra particelle.

Nel caso di distanze piccole si considera, invece, un'espressione della pressione pari a:

$$R_{DL} = 2RTc_0 \left(\frac{2\pi^2 \left(\frac{1}{K}\right)^2}{r^2} - 1 \right) \quad (1.9)$$

che integrata sulla distanza diventa:

$$W = 2RTc_0 \left(\frac{2\pi^2 \left(\frac{1}{K}\right)^2}{r} + r \right) \quad (1.10)$$

Applicando la semplificazione di Derjaguin si ottiene:

$$F_{DL} = \pi a 2RTc_0 \left(\frac{2\pi^2 \left(\frac{1}{K}\right)^2}{r} + r \right) \quad (1.11)$$

L'abbattimento del doppio strato, comporta che le azioni di natura repulsiva vengano sovrastate da quelle di natura attrattiva. Ne consegue una diversa microstruttura del terreno in funzione del fluido con cui questo interagisce e, pertanto, un diverso comportamento idro-meccanico.

2. Stato dell'arte sulla conducibilità idraulica delle argille a fluidi non acquosi

Liquidi organici meno polari dell'acqua tendono a causare un drastico incremento in termini di conducibilità idraulica dei terreni argillosi saturi d'acqua, compromettendone l'efficacia come barriere per contaminanti. La principale causa di tale incremento viene imputata al collasso del doppio strato nelle particelle di argilla, dovuto ad una riduzione di costante dielettrica del fluido permeante rispetto a quella di riferimento dell'acqua, con conseguente flocculazione di queste ultime. Tale fenomeno provoca una variazione nella microstruttura del materiale, con un aumento notevole della dimensione dei macropori accessibili al fluido. La sperimentazione con prove con permeametro effettuata a cavallo tra gli anni 80 e 90 sull'argilla di Sarnia (Ontario) da Fernandez e Quigley, rappresenta uno studio completo e rappresentativo riguardo l'interazione argilla-fluido interstiziale che si abbia tutt'oggi a disposizione (Fernandez & Quigley, 1985), (Fernandez & Quigley, 1988) (Fernandez & Quigley, 1991).

Oltre a questi si annoverano in letteratura numerosi altri lavori su tale tematica tra cui (Abdul et al., 1990), (Bowders & Daniel, 1987), (Candelaria & Matsumoto, 2000), (Gates et al., 2004), (Uppot & Stephenson, 1989).

Si riporta nel seguito una descrizione della sperimentazione da loro eseguita e delle conclusioni raggiunte.

2.1. Fernandez & Quigley (1985)

Nelle sezioni che seguono sono riportati e analizzati i risultati di prove di permeabilità effettuate su campioni di argilla prelevata in un deposito vicino Sarnia (Ontario). Tali campioni sono stati permeati, durante la prova, con liquidi aventi differenti valori di costante dielettrica (da 80, per l'acqua, sino a 2) e a differenti valori di gradiente idraulico (da 500 a 20). Tali gradienti sono sicuramente maggiori di quelli che ci si aspetta realmente in sito, ma vengono adottati per ridurre sostanzialmente i tempi di prova.

In Figura 2-1 viene mostrata la configurazione del permeametro utilizzato per la sperimentazione:

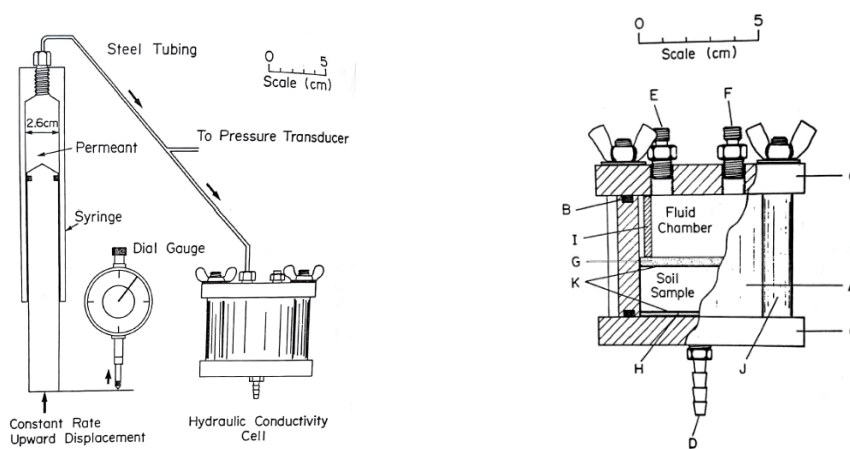


Figura 2-1 Schematizzazione del permeametro usato nella sperimentazione (sinistra) e della cella del permeametro (destra) (Fernandez & Quigley, 1985)

Tramite una pompa è possibile generare un flusso costante all'interno del provino, q ; il fluido entra nella sezione di testa del provino, lo attraversa interamente e fuoriesce tramite un'apposita valvola di sfogo in corrispondenza della sezione di base. Conoscendo il carico idraulico nelle due sezioni sopracitate (in testa c'è un apposito trasduttore per effettuare la misura, alla base si assume una pressione uguale a quella atmosferica) e applicando la legge di Darcy, è possibile valutare la permeabilità del materiale nei confronti del liquido usato come permeante.

L'argilla di Sarnia è contraddistinta dalle seguenti caratteristiche: frazione di argilla ($<2\mu\text{m}$) pari al 57%, limo ($2-74\mu\text{m}$) 33% e sabbia ($74\mu\text{m}-2\text{mm}$) 10%, limite liquido 38%, limite plastico 17.5%, capacità di scambio cationi 33meq/100g e superficie specifica $120\text{ m}^2/\text{g}$.

Sono state considerate due differenti modalità di preparazione dei campioni a seconda che al loro interno ci fosse acqua o liquido organico. Infatti, nel primo caso il materiale, con un contenuto d'acqua prossimo a quello ottimale, è stato compattato a strati (3 da 8 mm ciascuno) applicando una pressione di 1240 kPa per colpo, per un complessivo di 30 colpi

per strato. Nel secondo caso, invece, i campioni saturati con idrocarburo erano così flocculati da poter essere versati direttamente nel permeametro e pressati fino all'indice dei vuoti desiderato. In un modo o nell'altro, i campioni, alla fine del processo compattazione possedevano un'altezza pari a 2 cm.

2.1.1. Test con una sola fase di permeazione

Per stabilire il range di permeabilità che ci si può aspettare, una nota massa di argilla completamente asciutta, è stata miscelata nella cella del permeametro con lo stesso fluido usato come permeante. Considerando una certa varietà di rapporti peso argilla/peso liquido, sono stati ottenuti campioni con un certo range di indice dei vuoti.

Pertanto, i risultati delle prove condotte sono riportati in Figura 2-2 in termini di conducibilità idraulica – indice dei vuoti:

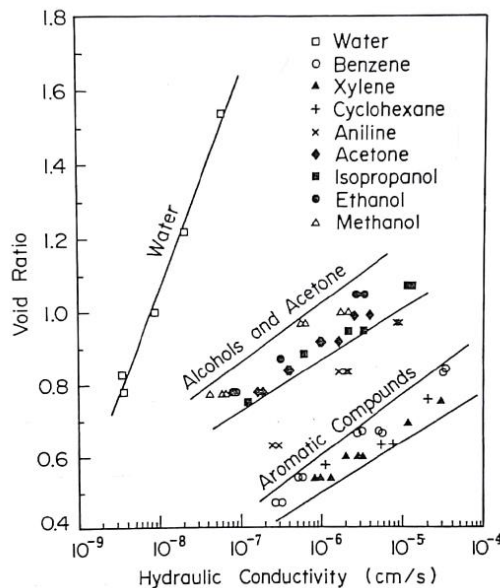


Figura 2-2 Andamento della permeabilità per diverse tipologie di permeanti in funzione dell'indice dei vuoti (Fernandez & Quigley, 1985)

in particolar modo, si possono individuare tre regioni:

- Bassa conducibilità idraulica per l'acqua (costante dielettrica ϵ pari a 80);
- Media conducibilità idraulica per gli alcol polari e acetone ($\epsilon = 20 - 35$);
- Alta conducibilità idraulica per gli aromatici non polari ($\epsilon = 2$).

Come si può notare anche dall'immagine sottostante (Figura 2-3), c'è una forte dipendenza della conducibilità idraulica dal valore di costante dielettrica del fluido permeante.

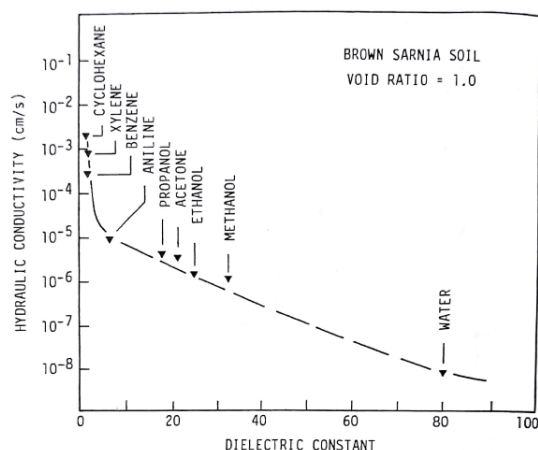


Figura 2-3-Andamento della permeabilità in funzione della costante dielettrica per un indice dei vuoti unitario
(Fernandez & Quigley, 1985)

Tanto minore è ϵ tanto maggiore è la conducibilità idraulica che si ottiene.

Tale comportamento si può spiegare con la teoria di Gouy-Chapman, definita nel capitolo precedente, secondo la quale la distribuzione del potenziale elettrico nel doppio strato può essere descritta tramite la seguente relazione:

$$\Psi_x = \Psi_0 \cdot e^{(-Kx)} \quad (1.12)$$

In cui:

- Ψ_0 è il potenziale elettrico che si ha in corrispondenza della superficie delle particelle di argilla;
- x è la distanza dalla generica particella;
- K è un coefficiente che dipende dalla costante di Boltzmann, temperatura, numero di ioni, valenza dei cationi, carica elementare e costante dielettrica.

Assumendo che l'unico parametro che varia sia la costante dielettrica, si ottiene l'andamento riportato in Figura 2-4:

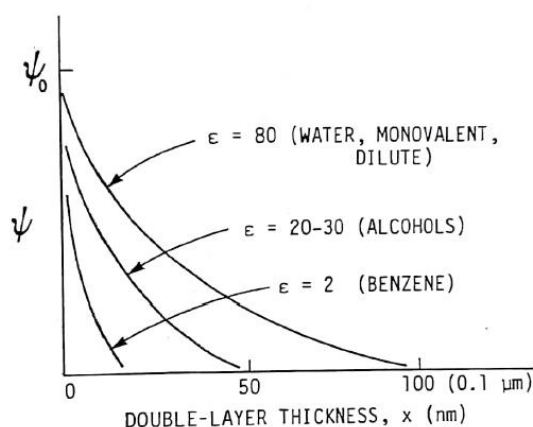


Figura 2-4-Influenza della costante dielettrica sul potenziale elettrico del doppio strato (Fernandez & Quigley, 1985)

Con la diminuzione della costante dielettrica, gli effetti del campo elettrico nell'intorno della particella di argilla si risentono ad una distanza inferiore. Questo corrisponde ad una contrazione dello spessore del doppio strato. Ciò vuol dire che in presenza di fluidi contraddistinti da una costante dielettrica inferiore a quella dell'acqua si instaura un processo di abbattimento del doppio strato ed un parallelo incremento delle dimensioni dei macropori accessibili al flusso. Inoltre, il collasso del doppio strato comporta una variazione nell'interazione delle particelle. Per la teoria del DLVO, infatti, si annullano completamente le azioni repulsive tra le particelle argillose e permarranno esclusivamente quelle attrattive di Van der Waals. A questo consegue un processo di flocculazione delle particelle argillose in presenza di fluidi non acquosi e, quindi, una diversa microstruttura del materiale rispetto al caso con acqua.

2.1.2. Test con due fasi di permeazione

I campioni all'interno della cella del permeametro sono stati compattati fino ad un indice dei vuoti unitario, successivamente permeati con una soluzione di 0.01 N CaSO_4 per circa 2 giorni. Alla fine di questa fase la conducibilità idraulica si assesta nell'intorno di un valore pari a 10^{-8} cm/s. A questo punto avviene un'ulteriore permeazione con benzene ($\epsilon=2$) o metanolo ($\epsilon=33$) per una durata di circa 4 giorni. Nel primo caso la conducibilità idraulica rimane pressoché costante, nel secondo si ha un incremento di circa un ordine di grandezza (10^{-7} cm/s).

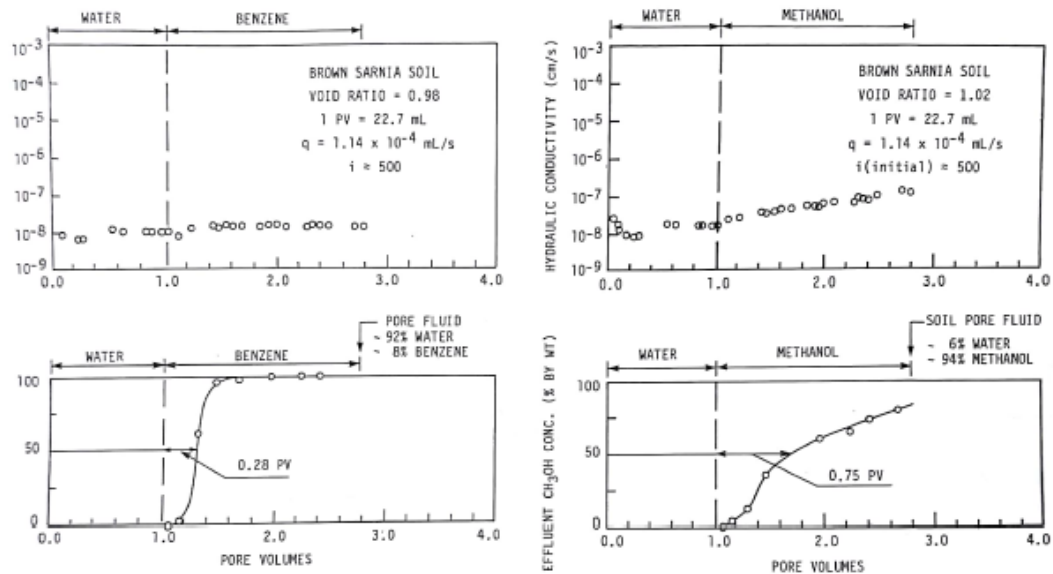


Figura 2-5 Permeabilità e concentrazione dell'effluente in funzione della permeazione valutata in volumi di pori (Fernandez & Quigley, 1985)

Tali andamenti si hanno perché il benzene, come altri aromatici non polari, è immiscibile in acqua; pertanto, anche se il fluido permeante ha una concentrazione di benzene del 100%, in realtà, l'acqua presente nel provino inizialmente, viene sostituita solo in piccola parte. Infatti, misurazioni eseguite alla fine dei test hanno dimostrato che i pori dei provini sono sostanzialmente saturi d'acqua con una piccola percentuale di benzene (circa l'8%). Per il metanolo, invece, si ha un comportamento del tutto opposto; infatti, in questo caso, alla fine della prova la percentuale di acqua rimasta nei vuoti è solo del 6%. Considerando anche che si raggiunge una concentrazione del 50% di metanolo nel fluido permeante dopo una permeazione di soli 0.75 volumi di pori, questo vuol dire che il flusso del metanolo attraverso i micro e macro pori del provino è molto più omogeneo rispetto a quello del benzene.

Ciò significa che, molto probabilmente, non essendo miscibile in acqua, il benzene non la riesce a sostituire nel doppio strato e, pertanto, non riesce a causarne il collasso.

Il tutto è sicuramente più intuitivo se si fa riferimento alle immagini riportate di seguito (Figura 2-6 e Figura 2-7):

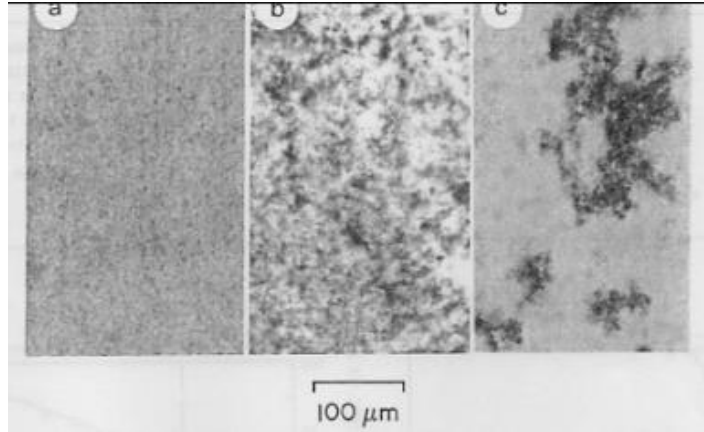


Figura 2-6- Influenza dell'etanolo sulla flocculazione delle particelle di argilla in una sospensione di argilla in acqua: (a) sistema disperso acqua argilla; (b) inizio processo di formazione dei flocculi in seguito all'aggiunta di etanolo; (c) flocculi maturi (Fernandez & Quigley, 1985)

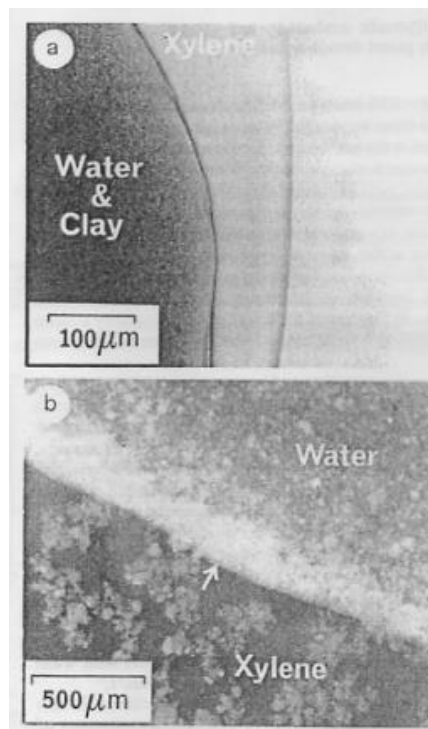


Figura 2-7-Sistema argilla-acqua-xylene: (a) aggiunta di xylene ad una sospensione di argilla in acqua; (b) aggiunta di acqua ad una sospensione di argilla in xylene (Fernandez & Quigley, 1985)

Da un punto di vista microscopico, se si aggiunge un piccolo quantitativo di etanolo ad una sospensione di argilla in acqua, si assiste ad un graduale processo di flocculazione con formazione di macroparticelle (flocculi) e parallela espansione dei macropori disponibili

per il passaggio del fluido. Se invece si aggiunge xylene a tale sospensione, data la completa immiscibilità tra l'aromatico in questione e l'acqua, si osserva una netta separazione tra la sospensione e lo xylene, che si posiziona in corrispondenza della sua periferia.

Ancora, se si aggiunge acqua ad una sospensione di argilla in xylene, i flocculi di argilla nello xylene tendono a migrare verso l'acqua formando una sospensione di argilla in acqua al di fuori di una sospensione di argilla in xylene.

Queste figure mostrano la natura idrofobica degli idrocarburi aromatici con una bassa costante dielettrica nei confronti di sistemi puri argilla-acqua e la preferenza delle particelle di argilla per la fase acquosa.

2.1.3. Test con tre fasi di permeazione

Una volta compattati i campioni fino ad un indice dei vuoti unitario, i campioni sono permeati con acqua, poi etanolo e infine con benzene. I risultati ottenuti sono quelli riportati in Figura 2-8:

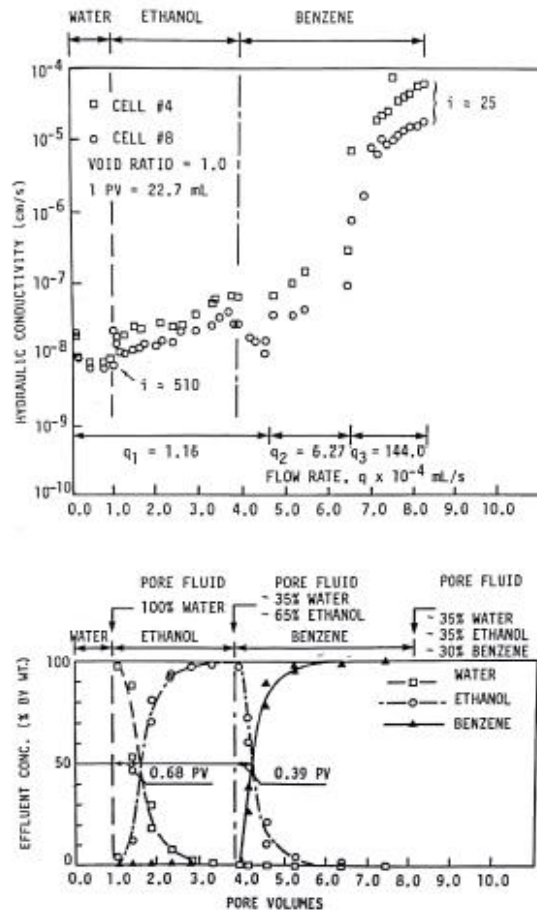


Figura 2-8 Permeabilità e concentrazione dell'effluente in funzione della permeazione sequenziale acqua-etanolo-benzene (Fernandez & Quigley, 1985)

Dopo una permeazione di un volume di pori con acqua la conducibilità idraulica si assesta su 10^{-8} cm/s, si innalza sino a circa 7×10^{-8} cm/s a seguito di una permeazione di 3 volumi di pori con etanolo e infine raggiunge un valore prossimo a 10^{-4} cm/s con una permeazione di 4 volumi di pori con benzene. Alla fine dei test, tramite evaporazione e condensazione, sono state valutate le composizioni di fluido interstiziale all'interno dei campioni, notando che, alla fine della seconda fase di permeazione, si ha il 35% di acqua e il 65% di etanolo. Terminata anche la terza fase di permeazione, la composizione è 30% benzene, 35% etanolo e 35% acqua. Questo vuol dire che il benzene ha sostituito circa il 50 % di etanolo. Quindi, inizialmente si ha un piccolo incremento di conducibilità idraulica dovuto alla presenza di etanolo che, essendo completamente miscibile in acqua, molto probabilmente è presente nel

doppio strato attorno alle particelle di argilla causandone un parziale collasso. Successivamente l'etanolo viene sostituito dal benzene che, possedendo una costante dielettrica molto più piccola, dà luogo ad un'entità del collasso maggiore e pertanto ad un netto incremento di conducibilità.

Bisogna però tenere conto che la preparazione in acqua dei campioni può causare una riduzione del loro volume, con la formazione di un "gap anulare" tra il campione e la cella del permeametro, falsando i risultati finali. Per essere sicuri che ciò non sia avvenuto, sono stati eseguiti dei test considerando un processo di permeazione inverso, iniziando con il benzene e terminando con l'acqua (Figura 2-9).

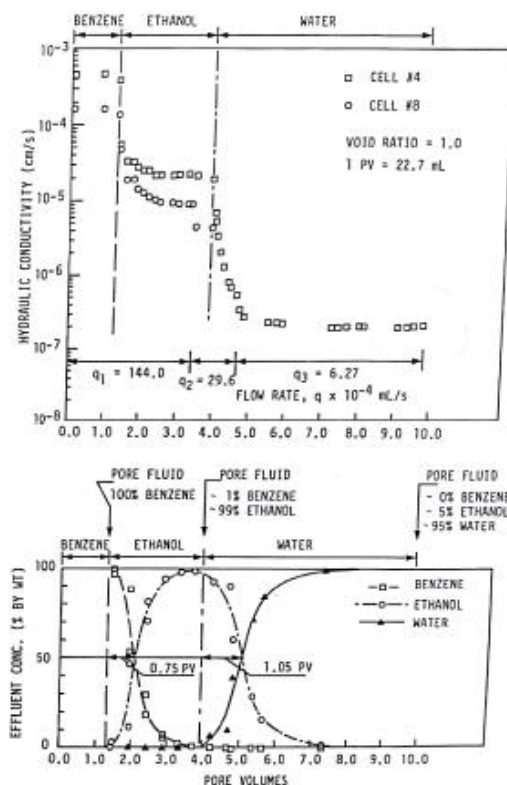


Figura 2-9-Permeabilità e concentrazione dell'effluente in funzione della permeazione sequenziale benzene-etanolo-acqua (Fernandez & Quigley, 1985)

Come si può vedere dall'immagine, sono stati ottenuti degli andamenti opposti rispetto a prima. Le uniche differenze che si riscontrano sono:

- Composizione del fluido presente nei pori. Infatti, alla fine del secondo stage di permeazione si nota che è rimasto solo l'1% di benzene (indice del fatto che utilizzare un liquido polare per rimuoverne uno meno polare è molto più efficiente del viceversa), alla fine del terzo stage, invece, si ottiene un 95% di acqua e solo un 5% di etanolo;
- Conducibilità idraulica finale. Infatti, nel processo inverso la permeabilità finale è circa venti volte più grande rispetto a quella che si ha nel provino permeato con la sequenza

acqua-etanolo-benzene. Si pensa che la differenza stia nella microstruttura interna del campione, in quanto quello modellato con benzene dà luogo ad una struttura flocculata dispersa con ampi macropori.

2.2. Fernandez & Quigley (1988)

In questa sezione si riportano gli studi eseguiti su campioni di argilla di Sarnia compattati in acqua e permeati con soluzioni acquose di percolato con percentuali crescenti di liquidi organici disciolti in esse (diossano ed etanolo), per simulare la composizione di probabili rifiuti urbani. In particolar modo, i campioni sono stati compattati così come descritto al paragrafo 2.1 con un contenuto d'acqua pari al 30% che ha condotto ad un valore di indice dei vuoti iniziale pari a 0.85.

L'obiettivo primario è quello di determinare la soglia di liquido organico disciolto che provoca un significativo incremento di conducibilità idraulica. In contrasto con quanto visto nel caso di materiale miscelato direttamente con il fluido organico di interesse, in questo caso si è visto sperimentalmente che la viscosità del permeante gioca un ruolo chiave. Infatti, per quantità moderate, l'effetto della viscosità prevale su quello del doppio strato causando, addirittura, una riduzione in termini di conducibilità idraulica. Misure di distribuzione della dimensione dei pori sono state eseguite successivamente, sui campioni liofilizzati (essiccati a freddo), tramite porosimetrie ad intrusione di mercurio per confermare le variazioni avvenute nella microstruttura del campione. La viscosità della soluzione cresce al crescere del quantitativo di idrocarburo disciolto fino ad un massimo di concentrazione corrispondente a, rispettivamente, 40% per l'etanolo e 60% per il diossano. Allo stesso modo la costante dielettrica della soluzione varia da un valore pari a circa 80, corrispondente al caso di acqua "pura", a 32 (100% etanolo) e 2 (100% diossano) (Figura 2-10).

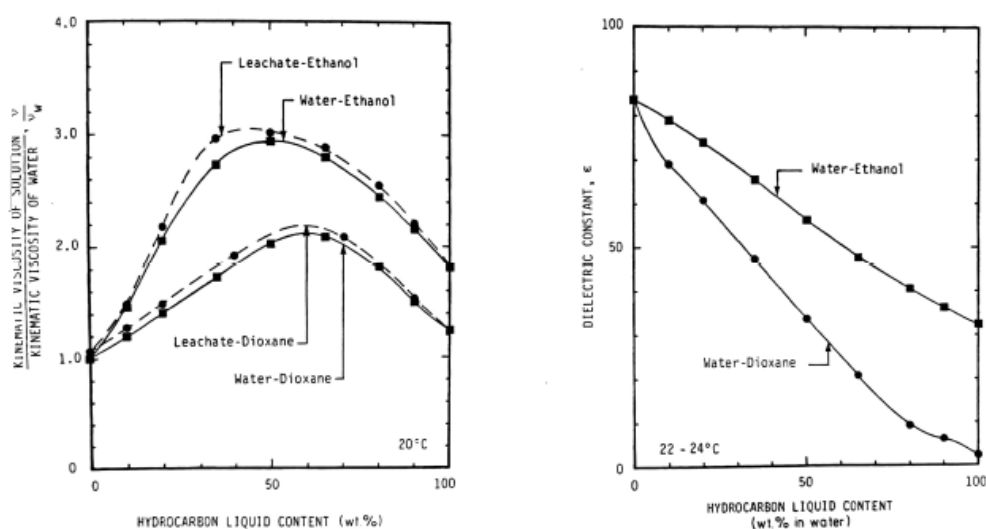


Figura 2-10-Andamento della viscosità e della costante dielettrica in funzione della concentrazione di liquido organico (Fernandez & Quigley, 1988)

2.2.1. Permeazione con etanolo

I risultati dei test condotti utilizzando soluzioni di etanolo come permeante sono riportati nelle immagini seguenti, in termini di conducibilità idraulica e permeabilità intrinseca (Figura 2-11):

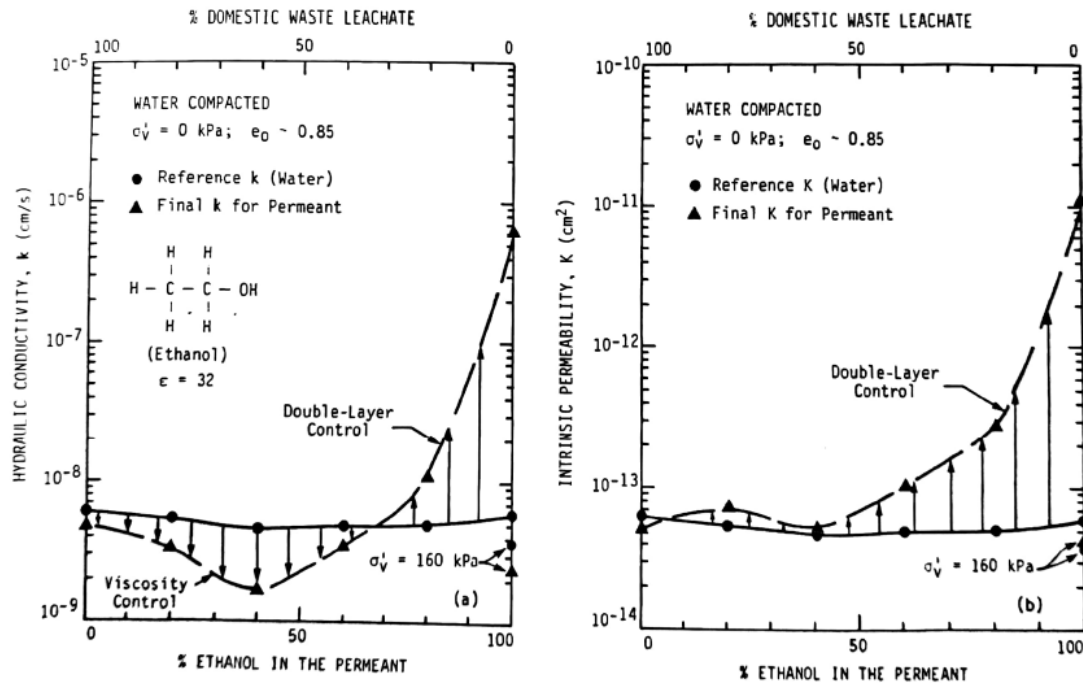


Figura 2-11- Andamento della conducibilità idraulica (sinistra) e della permeabilità intrinseca (destra) al variare della concentrazione di etanolo (Fernandez & Quigley, 1988)

Rispetto alla condizione di riferimento relativa all'acqua ($k \approx 6 \times 10^{-9}$ cm/s), la conducibilità idraulica relativa alla permeazione con soluzioni di etanolo con concentrazioni fino al 60% risulta essere inferiore; superata tale concentrazione l'incremento è drastico e si raggiungono valori anche di due ordini di grandezza superiori rispetto a quelli relativi all'acqua. Osservando, però, l'andamento della permeabilità intrinseca, che rispetto alla conducibilità idraulica è una grandezza direttamente collegata alla dimensione dei pori, si vede che questa risulta essere sempre superiore a quella relativa alla condizione di riferimento. Ciò vuol dire che sicuramente sta avvenendo una variazione in corrispondenza della microstruttura del campione (aumento della dimensione dei pori), ma, mentre inizialmente il controllo sulla conducibilità è affidato alla viscosità del permeante, solo successivamente questa viene governata dal fenomeno di collasso del doppio strato.

2.2.2. Permeazione con diossano

Risultati pressoché analoghi si riscontrano nei risultati dei test effettuati con il diossano come permeante (Figura 2-12).

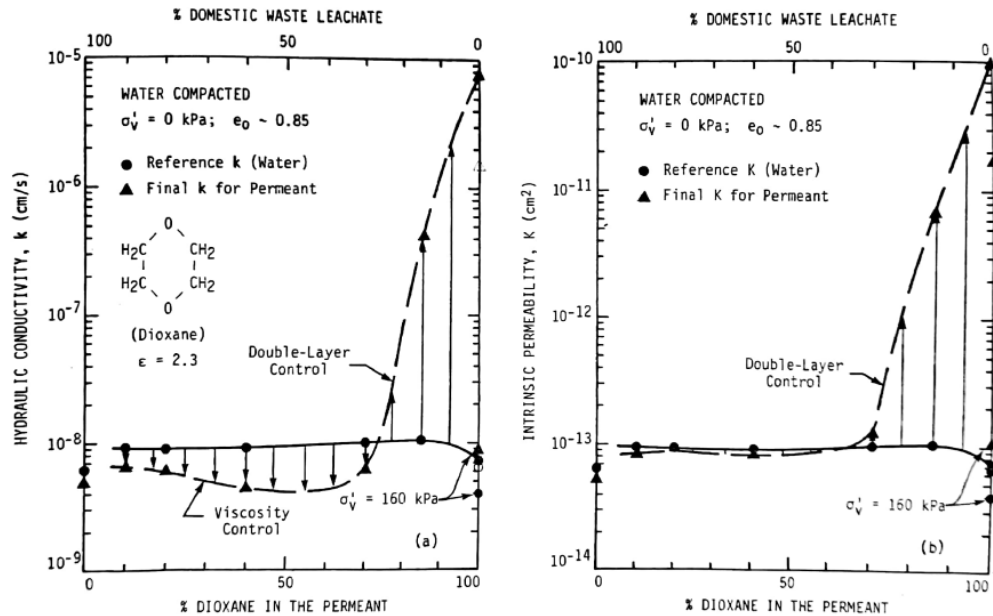


Figura 2-12-Andamento della conducibilità idraulica (sinistra) e della permeabilità intrinseca (destra) al variare della concentrazione di diossano (Fernandez & Quigley, 1988)

Infatti, come è possibile notare dalle immagini, inizialmente il processo viene dominato dall'incremento di viscosità associato alla dissoluzione del diossano in soluzione e pertanto si ha una lieve riduzione di conducibilità idraulica fino ad una concentrazione di diossano di circa il 70%. Successivamente, per concentrazioni superiori, l'influenza del collasso del doppio strato diventa preponderante rispetto a quella della viscosità e la conducibilità idraulica cresce fino a raggiungere tre ordini di grandezza superiore a quella di riferimento.

2.3. *Fernandez & Quigley (1991)*

L'applicazione di una tensione verticale efficace su una barriera di argilla gioca un ruolo fondamentale nel preservare una bassa conducibilità idraulica in seguito all'esposizione a liquidi organici. L'applicazione di tali tensioni può essere effettuata prima o dopo il danneggiamento:

- L'applicazione effettuata prima del danneggiamento consente una riduzione o addirittura la totale assenza di incremento di permeabilità. Infatti, si genera una consolidazione chimicamente indotta che comporta la chiusura dei macropori;
- L'applicazione post-danneggiamento, invece, riesce a correggere la permeabilità di una barriera permeata da etanolo, ma potrebbe non avere alcun effetto nel caso di diossano.

I risultati dei test condotti, che sono riportati in questo articolo, fanno sempre riferimento all'argilla di Sarnia (Ontario). In particolar modo sono stati utilizzati come permeanti etanolo e diossano, sia in maniera pura che miscelati con percolato di rifiuti solidi urbani. Si tratta di due liquidi solubili in acqua (e nel percolato) con costanti dielettriche pari a rispettivamente a 32 e 2. Pertanto, si tratta di due sostanze che sono in grado, una volta permeate, di causare il collasso del doppio strato.

La strumentazione usata è molto particolare: si tratta di un permeametro con sistema "fixed-ring", grazie alla quale è possibile applicare una tensione verticale durante la prova, ma allo stesso tempo si hanno gradienti idraulici molto elevati che danno luogo ad elevate tensioni indotte dalla filtrazione del fluido (drag stresses). Il sistema "fixed-ring", rispetto a quello "flexible-wall", consente di riprodurre in maniera più fedele le condizioni che si hanno realmente in sito.

I campioni da testare sono stati preparati facendo essiccare il materiale in aria, bagnandolo con acqua distillata fino ad un grado di umidità del 30% e compattandolo all'interno del permeametro. Il contenuto d'acqua scelto è di circa 8 punti percentuali superiore rispetto a quello ottimale, in quanto si è visto sperimentalmente che con il 30% si minimizza il rischio di formazione di fratture o macropori durante la fase di compattazione. Alla fine di questa fase i campioni sono stati "regolati" in maniera tale da avere un'altezza del provino di 20 mm.

L'applicazione della tensione verticale avviene grazie ad un sistema a molla.

Inizialmente i campioni vengono permeati con una soluzione di acqua e 0.01 N CaSO_4 , successivamente viene usato il permeante organico di interesse.

2.3.1. Permeazione con liquidi organici puri solubili in acqua

I risultati mostrati in Figura 2-13 indicano la relazione tra conducibilità idraulica e tensione verticale efficace applicata prima della permeazione con il liquido organico (applicazione prima del danno):

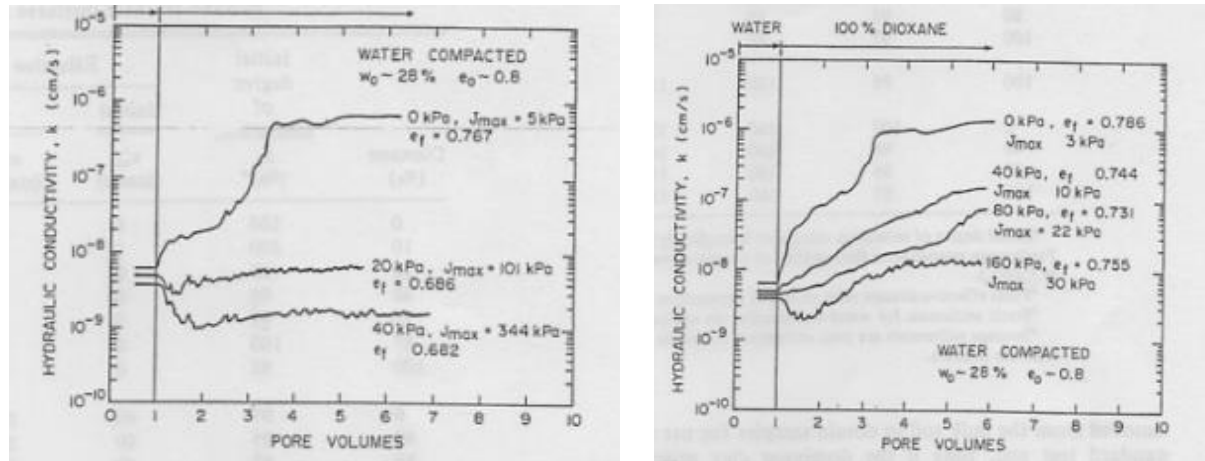


Figura 2-13 Andamento della conducibilità idraulica in funzione della tensione verticale efficace applicata (Fernandez & Quigley, 1991)

Considerando l'etanolo:

- I valori di conducibilità idraulica di riferimento relativi all'acqua si assestano su valori che vanno da 6.25×10^{-9} ($\sigma'_v = 0$ kPa) a 3.9×10^{-9} ($\sigma'_v = 160$ kPa);
- La successiva permeazione con etanolo comporta un incremento di conducibilità pari a 100 volte quello di riferimento all'acqua ($\sigma'_v = 0$ kPa), ma già solo con l'applicazione di una tensione di 20 kPa si ottiene un netto miglioramento. Addirittura con l'applicazione di 40 kPa (e valori superiori) il valore di conducibilità che si ottiene è inferiore a quello di riferimento;
- Il decadimento della conducibilità idraulica è attribuibile in parte alla riduzione dell'indice dei vuoti e in parte all'incremento di viscosità dovuta all'etanolo (80% maggiore rispetto a quella dell'acqua);
- Con una pressione applicata nulla, le tensioni indotte dalla filtrazione (drag stresses) sono inferiori rispetto a quelle che si ottengono con la permeazione con acqua. Infatti, inizialmente, queste sono pari a 159 kPa, ma alla fine del test, in seguito alla permeazione dell'etanolo, hanno un valore finale pari a 5 kPa. Questo vuol dire che il campione ha una esigua consolidazione e, quindi, una piccola riduzione dell'indice dei vuoti (da 0.8 a 0.767). Pertanto è possibile affermare che avviene il fenomeno di contrazione del doppio strato ad un indice dei vuoti che è pressoché costante. A queste condizioni è legato l'incremento di conducibilità di circa 100 volte;

- Se invece si considera l'applicazione di una tensione pari a 40 kPa, inizialmente si ha una sorta di flessione (riduzione) nel trend della conducibilità, dovuta all'avanzamento di un fronte maggiormente viscoso all'interno del provino. Ciò fa sì che vi sia un incremento di drag stresses (alla fine del test hanno un valore pari a 344 kPa) che inducono un fenomeno di consolidazione. Si assiste, pertanto, ad una riduzione dell'indice dei vuoti da 0.8 a 0.682 che, parallelamente alla contrazione del doppio strato, fa sì che vi sia una riduzione importante di conducibilità.

Dato che le interazioni chimiche per i vari test condotti sono le stesse, si può affermare che il miglioramento ottenuto in termini di risposta del materiale è da imputare all'applicazione di una tensione verticale efficace antecedentemente la permeazione di etanolo.

Considerando il diossano:

- In assenza di pressione applicata, si ottiene un incremento di circa 220 volte il valore di riferimento di conducibilità all'acqua;
- La presenza di una tensione applicata inibisce solo in parte l'incremento di conducibilità. Infatti, anche con l'applicazione di una pressione pari a 160 kPa, la conducibilità idraulica finale è circa il doppio rispetto a quella di riferimento;
- In questo caso l'inibizione all'incremento di conducibilità è da imputare maggiormente ad una riduzione dell'indice dei vuoti dato che si ha un piccolo incremento di viscosità (diossano ha una viscosità che è circa il 20% maggiore di quella dell'acqua);
- Le drag stresses che si generano sono molto minori rispetto a quelle che si hanno con l'etanolo, pertanto anche se si ha una riduzione dell'indice dei vuoti, tale riduzione ha un'entità esigua (da 0.8 a 0.755). Pertanto, i valori di conducibilità che otteniamo in questo caso sono molto più grandi rispetto a quelli che abbiamo per l'etanolo.

Se questi erano i risultati dell'applicazione di una tensione verticale prima della permeazione con il liquido organico (pre-danno), è utile adesso vedere cosa succede se tale tensione viene applicata in seguito alla permeazione dell'idrocarburo (post-danno).

In particolar modo, di seguito sono riportati i risultati ottenuti per i due fluidi organici utilizzati (Figura 2-14):

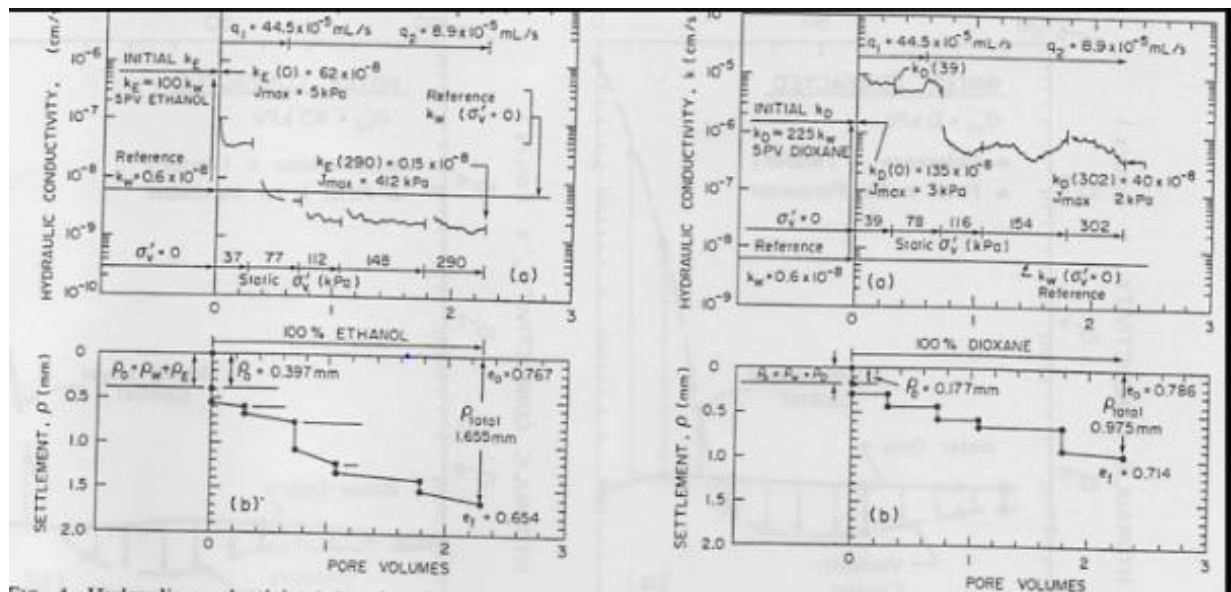


Figura 2-14-Risultati dei test di conducibilità idraulica con applicazione post-danno della tensione verticale
(Fernandez & Quigley, 1991)

Nel caso di etanolo, l'applicazione post-danno di una tensione verticale sembra essere un'operazione efficace nel risanamento della funzionalità del materiale. Infatti, da un valore di riferimento iniziale pari a 0.6×10^{-8} ($\sigma'_v = 0$ kPa), dopo una permeazione di 5 volumi di pori di etanolo la conducibilità idraulica si assesta ad un valore pari a 62×10^{-8} . La successiva applicazione di una tensione pari a 37 kPa prima e 77 kPa dopo, comporta una riduzione di conducibilità idraulica che addirittura assume valore inferiore a quella di riferimento, ovvero pari a 0.4×10^{-8} ($\sigma'_v = 77$ kPa). Incrementando la tensione applicata, tale miglioramento è sempre più evidente. Infatti, con una $\sigma'_v = 290$ kPa, la conducibilità idraulica raggiunge il valore di 0.15×10^{-8} cm/s. In questo processo di risanamento, il contributo maggiore è da imputare alla importante riduzione di indice dei vuoti (da 0.767 a 0.654), dovuto ad una consolidazione indotta che comporta un cedimento pari a circa l'8% del volume iniziale del provino. Infatti, se si osservano le drag stresses relative a $\sigma'_v = 0$ kPa e $\sigma'_v = 290$ kPa, si nota che si passa da un valore pari a 5 kPa a 412 kPa.

Per il diossano, invece, l'applicazione post-danno risulta essere solo parzialmente efficace. Infatti, a partire da una conducibilità idraulica di riferimento pari a 0.6×10^{-8} cm/s, si assiste ad un incremento, in seguito alla permeazione con diossano, fino al raggiungimento del valore 720×10^{-8} cm/s. Ma, addirittura applicando una tensione pari a 302 kPa, la conducibilità finale risulta essere circa 65 volte più grande di quella di riferimento. Il cedimento che si ottiene in questo caso (5% del volume iniziale) risulta essere più piccolo rispetto a quello relativo all'etanolo, così come le drag stresses che si ottengono alla fine (2

kPa). Questo comporta sicuramente una consolidazione minore e quindi una minore efficacia.

Questa differente risposta, si pensa sia correlata ad una maggiore rigidità dello scheletro solido permeato con diossano rispetto a quello con etanolo. Tale irrigidimento risulta essere conforme con la teoria del doppio strato, che implica una riduzione delle forze repulsive e un incremento di quelle attrattive in seguito all'incremento della concentrazione di sali, sostituzione di cationi monovalenti con cationi divalenti e riduzione di costante dielettrica.

2.3.2. Permeazione con miscele di percolato di rifiuti urbani e liquidi organici

Si riportano i risultati ottenuti per i due diversi permeanti:

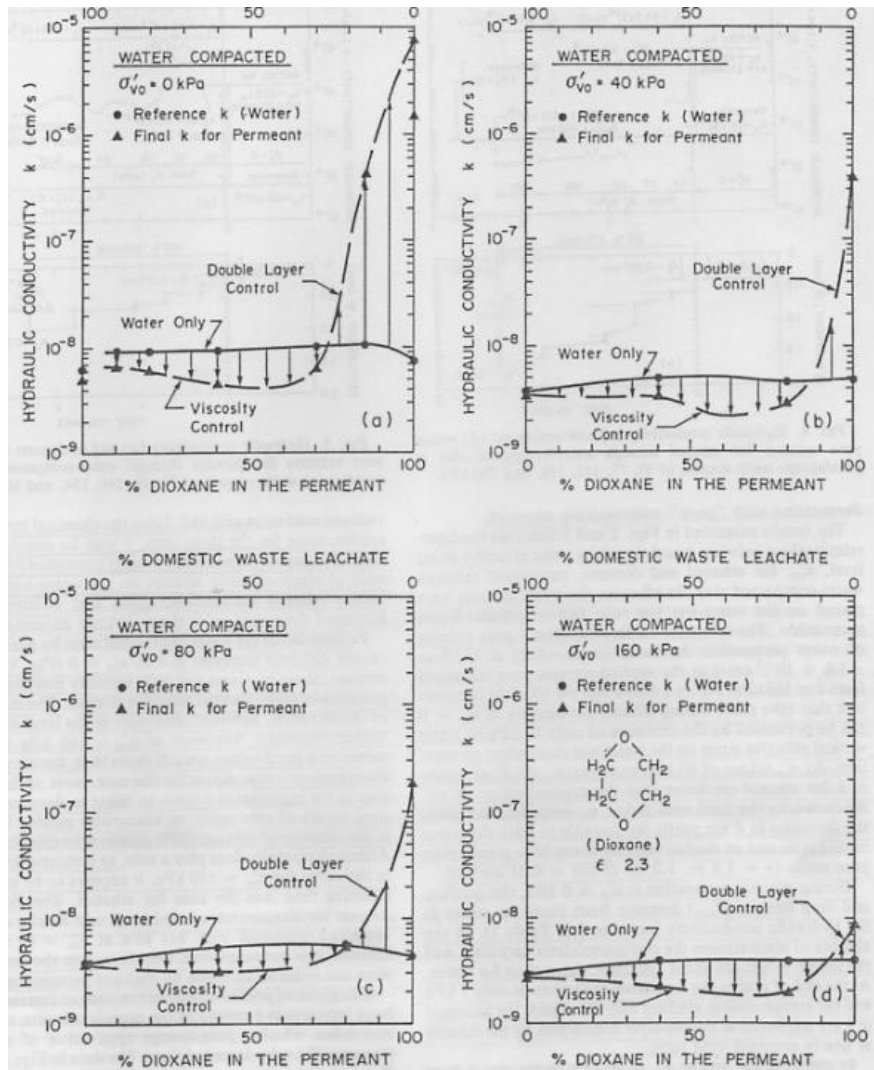


Figura 2-15-Andamento della conducibilità idraulica in funzione di diverse concentrazioni di diossano in un percolato di rifiuti urbani (Fernandez & Quigley, 1991)

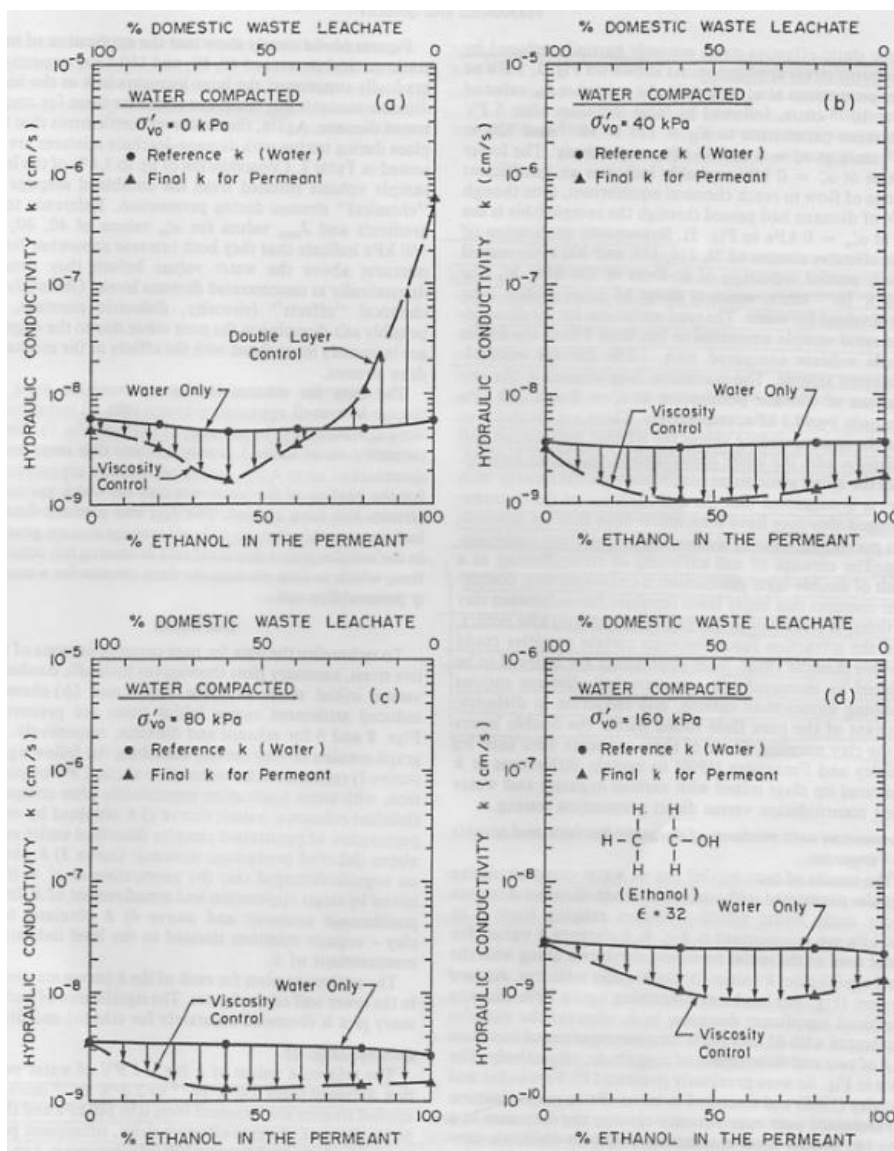


Figura 2-16-Andamento della conducibilità idraulica in funzione di diverse concentrazioni di etanolo in un percolato di rifiuti urbani (Fernandez & Quigley, 1991)

Tali andamenti suggeriscono che:

- Per il diossano si assiste inizialmente ad una riduzione di conducibilità rispetto al valore di riferimento dell'acqua, usata come permeante iniziale, fino ad una concentrazione del liquido organico del 70%. Per concentrazioni maggiori si ha invece un incremento fino a circa tre ordini di grandezza per la concentrazione massima. Gli autori affermano che inizialmente prevale l'incremento di viscosità, dopo una certa concentrazione invece domina il fenomeno di contrazione del doppio strato che, a parità di vuoti, dà luogo a macropori più estesi. Incrementando la tensione verticale applicata pre-danno, si assiste ad un parziale risanamento, anche se per il diossano "puro" (100%) si ha comunque una conducibilità maggiore di quella di riferimento;

- Per l'etanolo i risultati sono pressoché identici, con la differenza che, in questo caso, l'applicazione di una pressione verticale è sicuramente un'operazione molto più efficace. Infatti si riescono ad ottenere conducibilità minori di quella di riferimento anche con pressioni relativamente piccole (40 kPa). Questo è dovuto al fatto che il cedimento e le drag stresses che si ottengono sono molto maggiori rispetto a quelle che si hanno per il diossano. Ciò sta a significare che la consolidazione indotta è nettamente maggiore.

Per chiarire meglio i concetti, si consideri la Figura 2-17:

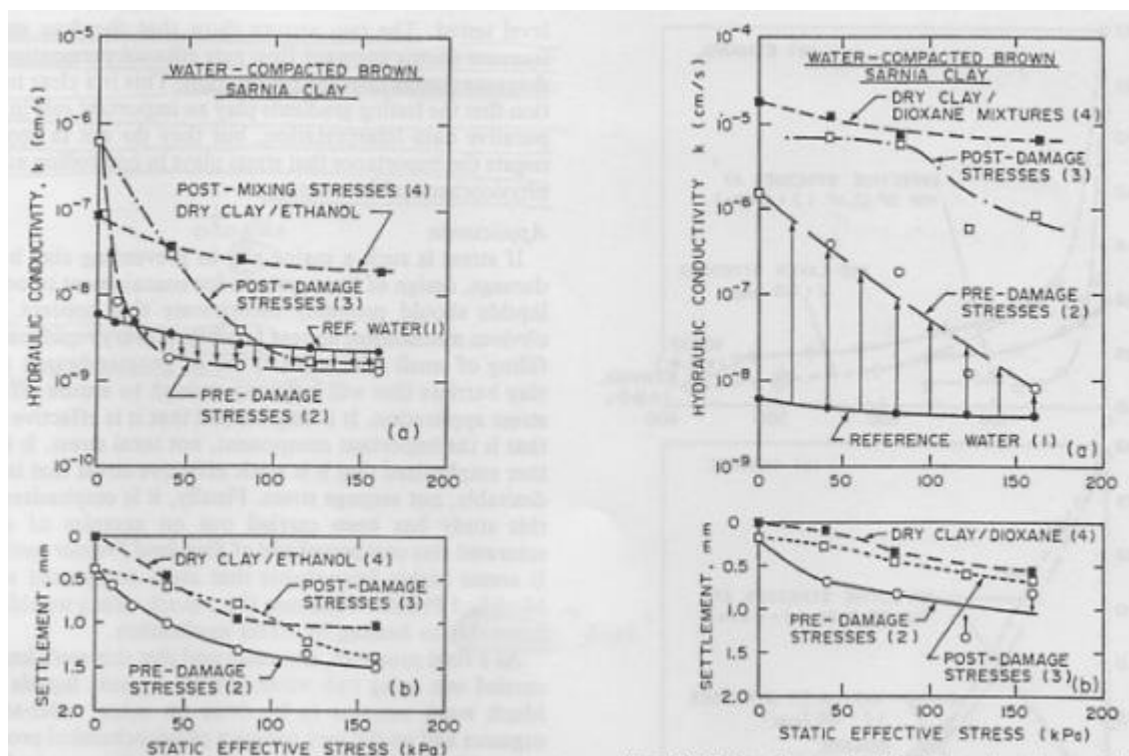


Figura 2-17-Andamento della conducibilità idraulica e dei cedimenti in funzione della tensione verticale applicata (Fernandez & Quigley, 1991)

in cui è mostrato l'andamento della conducibilità idraulica e dei cedimenti indotti nel campione in funzione della tensione verticale efficace applicata. Per i due fluidi organici (etanolo e diossano), sono state considerate 4 diverse condizioni (4 curve):

- Permeazione con acqua (riferimento);
- Applicazione pre-danno della tensione;
- Applicazione post-danno;
- Miscela asciutta argilla-liquido organico.

Prima di commentare i risultati, bisogna specificare che tali dati sono riferiti alla sommità del campione e, nell'entità della tensione applicata, non si tiene conto dell'eventuale contributo delle tensioni indotte dalla filtrazione.

Per quanto riguarda l'etanolo, si può notare che applicando una tensione verticale pre-danno di soli 20 kPa, come si era già visto in precedenza, si riesce ad abbattere completamente l'incremento di conducibilità, tornando al valore di riferimento relativo all'acqua. Incrementando la tensione applicata, si va a ottimizzare sempre più tale beneficio, ottenendo valori addirittura più bassi di quello di riferimento. Anche nel caso di post-danno si ottengono benefici importanti, nonostante l'entità della tensione da applicare risulta maggiore (almeno 80 kPa). Tali miglioramenti sono da imputare fondamentalmente a due fattori: incremento di viscosità e cedimenti dovuti alla consolidazione indotta. Per quanto riguarda la miscela asciutta argilla-etanolo, nonostante cedimenti importanti, i benefici che si ottengono sono molto limitati. In questo caso, i macropori e spazi interflocculari sono difficilmente richiudibili mediante applicazione di una tensione verticale.

Per il diossano le considerazioni che si possono fare sono un po' diverse. Infatti, come si era visto anche in precedenza, l'applicazione di una tensione prima della permeazione con il liquido organico ha un beneficio solo parziale (la conducibilità si riduce, ma anche con tensioni applicate relativamente alte, questa risulta essere almeno un ordine di grandezza maggiore rispetto a quella di riferimento). L'applicazione post-danno, così come quella sulla miscela asciutta argilla-diossano, risulta essere praticamente inefficace. Particolare valore assume l'ipotesi dell'irrigidimento del materiale in seguito alla contaminazione con il permeante organico.

Per completare tale discorso, è bene adesso andare a considerare la presenza delle tensioni indotte dalla filtrazione del permeante durante la prova. Per fare questo, facendo riferimento alla condizione di applicazione della tensione pre-danno, si considerino gli andamenti riportati in Figura 2-18:

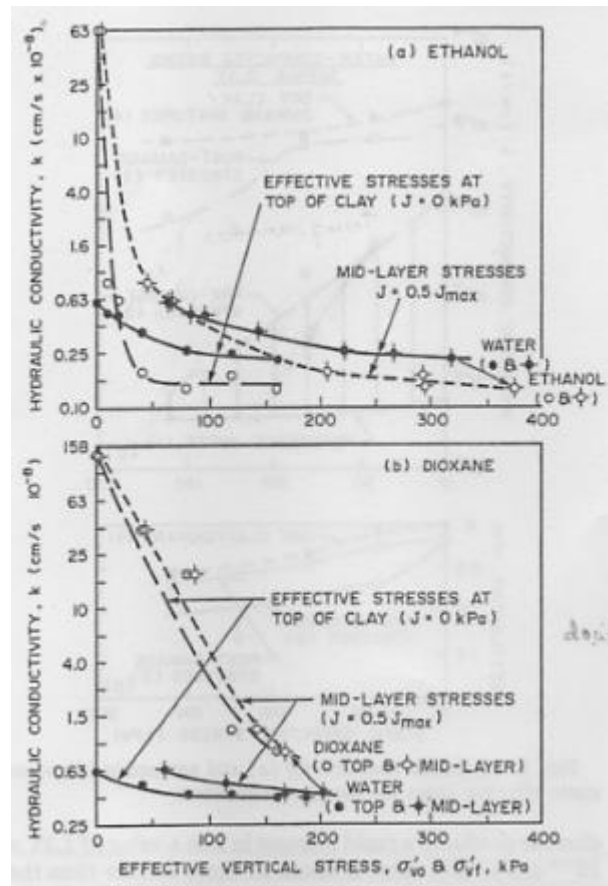


Figura 2-18-Andamento della conducibilità idraulica in funzione dell'entità della tensione verticale applicata nella condizione di pre-danno (Fernandez & Quigley, 1991)

In tale figura sono riportati i valori della conducibilità idraulica in funzione della tensione applicata per la sezione di testa del provino e per quella di mezzeria (ipotizzando che le tensioni indotte dalla filtrazione siano pari alla metà di quelle valutate alla base del provino). Le curve sono riferite alla permeazione con acqua e a quella con il liquido organico. Le curve relative alla sezione di mezzeria, risultano essere traslate verso destra rispetto a quelle relative alla sezione di testa. In particolar modo, l'entità della traslazione risulta essere maggiore nel caso di etanolo rispetto al diossano. Questo è indice del fatto che, nel primo caso, le tensioni indotte sono maggiori; pertanto, maggiore sarà l'entità del cedimento di consolidazione. È facile conseguire che la riduzione di conducibilità sarà maggiore. Un'ultima osservazione che si può fare riguarda l'andamento di tali tensioni indotte (drag stresses) durante il test; infatti nel caso di permeazione con etanolo queste tendono a crescere, con il diossano si riducono.

2.4. Bowders & Daniel (1987)

Il lavoro di questi autori coinvolge due tipi di terreno e diversi liquidi organici.

In particolar modo, sono stati effettuati test per valutare la conducibilità idraulica nei confronti di miscele acqua/liquido organico con diverse concentrazioni e verificare se questa subisce una variazione rispetto al valore di riferimento relativo all'acqua.

I test sono stati condotti sia con permeametro a pareti flessibili che con quello a pareti rigide.

2.4.1. Materiali

I due terreni usati nella sperimentazione sono caolinite ed uno costituito da un mix illite-clorite. Come permeanti sono stati scelti, invece, metanolo, acido acetico, eptano, tricloroetilene e acqua.

Metanolo e acido acetico, entrambi miscibili in acqua, sono stati miscelati in acqua a diverse concentrazioni (20,40,60,80 e 100%).

Per l'eptano e il tricloroetilene, invece, si è considerata come massima concentrazione il limite di solubilità in acqua corrispondente.

Per quanto riguarda l'acqua, è stata utilizzata sia quella distillata che quella di rubinetto.

2.4.2. Procedure

Ambedue i terreni sono stati essiccati prima di essere miscelati con il contenuto desiderato di acqua distillata, prossimo a quello ottimale.

In tutti i test è stato applicato un gradiente idraulico pari a 200 ed il campione è stato dapprima permeato con acqua per definire un valore di conducibilità idraulica di riferimento. Successivamente questa è stata sostituita dal liquido organico di interesse per valutare le eventuali variazioni.

2.4.3. Risultati

I risultati dei test di conducibilità idraulica sono riassunti nelle immagini sottostanti in cui:

- k_f è la conducibilità idraulica misurata alla fine del test;
- k_w è la conducibilità idraulica di riferimento all'acqua;
- PV è il valore volumi di pori equivalente di flusso all'interno del campione;
- $(C/C_0)_f$ è la concentrazione finale di carbone organico nell'effluente.

In particolar modo, per quanto riguarda la caolinite permeata con metanolo, i risultati sono quelli riportati in Figura 2-19:

Concentration of methanol in water (%) (1)	Flexible-Wall Cell				Rigid-Wall Cell			
	k_f (2)	k_f/k_w (3)	PV_f (4)	$(C/Co)_f$ (5)	k_f (6)	k_f/k_w (7)	PV_f (8)	$(C/Co)_f$ (9)
0	6.0×10^{-8}	1.0	—	—	1.0×10^{-7}	1.0	3.0	—
20	4.5×10^{-8}	0.75	2.2	0.90	6.1×10^{-8}	0.61	2.4	1.0
40	3.8×10^{-8}	0.63	2.0	1.0	6.7×10^{-8}	0.67	3.1	1.0
60	4.8×10^{-8}	0.80	2.1	1.0	7.4×10^{-8}	0.74	2.3	1.0
80	6.3×10^{-8}	1.05	4.7	0.87	1.0×10^{-7}	1.0	2.8	1.0
100	1.0×10^{-7}	1.7	3.0	1.0	7.5×10^{-7}	7.5	3.0	1.0

Figura 2-19 Risultati per la caolinite permeata con diverse concentrazioni di metanolo (Bowders & Daniel, 1987)

In seguito alla permeazione con il liquido organico non si assiste ad una grande variazione di conducibilità idraulica rispetto al valore di riferimento dell'acqua, se non nel momento in cui si considera una concentrazione di metanolo pari al 100%.

Stesso discorso si può fare per la miscela di illite-clorite (Figura 2-20):

Concentration of methanol in water (%) (1)	Flexible-Wall Cell				Rigid-Wall Cell			
	k_f (2)	k_f/k_w (3)	PV_f (4)	$(C/Co)_f$ (5)	k_f (6)	k_f/k_w (7)	PV_f (8)	$(C/Co)_f$ (9)
0	7.9×10^{-8}	1.0	1.0	—	1.8×10^{-8}	1.0	2.0	—
20	1.0×10^{-7}	0.77	7.7	0.94	9.3×10^{-8}	0.37	2.4	0.81
40	7.6×10^{-8}	1.0	5.5	0.94	3.0×10^{-8}	3.2	2.9	0.80
60	4.4×10^{-9}	0.73	2.5	0.26	1.8×10^{-7}	2.2	3.0	0.90
80	8.9×10^{-9}	0.56	4.2	0.50	2.7×10^{-7}	0.34	5.1	0.94
100	6.9×10^{-9}	1.2	2.8	0.24	2.0×10^{-6}	.44	5.6	0.88

Figura 2-20 Risultati per l'illite-clorite permeata con diverse concentrazioni di metanolo (Bowders & Daniel, 1987)

Addirittura in questo caso il permeametro a pareti rigide mostra un incremento di conducibilità idraulica pari a 44 volte quello relativo all'acqua nel caso di concentrazione pari al 100% di metanolo. Il permeametro a pareti flessibili, invece, indica che questo incremento è solo di 1,2 volte.

Nel caso di acido acetico, per i due materiali, invece, gli andamenti sono i seguenti (Figura 2-21e Figura 2-22):

Concentration of methanol in water (%) (1)	Flexible-Wall Cell				Rigid-Wall Cell			
	k_f (2)	k_f/k_w (3)	PV_f (4)	$(C/Co)_f$ (5)	k_f (6)	k_f/k_w (7)	PV_f (8)	$(C/Co)_f$ (9)
0	6.0×10^{-8}	1.0	—	—	1.0×10^{-7}	1.0	3.0	—
20	4.7×10^{-8}	0.67	2.2	0.86	9.5×10^{-8}	0.59	2.2	.94
40	3.8×10^{-8}	0.54	2.3	0.91	1.6×10^{-7}	0.94	2.8	1.0
60	3.4×10^{-8}	0.49	2.0	0.96	8.3×10^{-8}	0.16	4.9	1.0
80	3.2×10^{-8}	0.46	2.1	0.94	4.4×10^{-8}	0.63	2.2	1.0
100	5.4×10^{-8}	0.77	2.5	0.90	$>6 \times 10^{-7a}$	>2.3	6.3	1.0

*Hydraulic conductivity was greater than value shown; however, this is the last reading prior to the acid blowing through the soil and emptying the influent reservoir.

Figura 2-21 Risultati per la caolinite permeata con diverse concentrazioni di acido acetico (Bowders & Daniel, 1987)

Concentration of methanol in water (%) (1)	Flexible-Wall Cell				Rigid-Wall Cell			
	k_f (2)	k_f/k_w (3)	PV_f (4)	$(C/Co)_f$ (5)	k_f (6)	k_f/k_w (7)	PV_f (8)	$(C/Co)_f$ (9)
0	7.9×10^{-8}	1.0	1.0	—	1.8×10^{-8}	1.0	2.0	—
20	1.4×10^{-9}	0.07	1.6	0.48	2.0×10^{-9}	0.10	2.1	1.0
40	5.4×10^{-10}	0.05	0.71	0.15	1.6×10^{-9}	0.11	1.6	0.81
60	1.5×10^{-9}	0.21	0.95	0.10	8.2×10^{-10}	0.02	0.74	0.25
80	1.5×10^{-9}	0.17	1.1	0.10	2.2×10^{-10}	0.02	0.46	0.12
100	1.1×10^{-9}	0.22	0.83	0.03	1.5×10^{-10}	0.02	0.37	0.10

Figura 2-22 Risultati per l'illite-clorite permeata con diverse concentrazioni di acido acetico (Bowders & Daniel, 1987)

Questi andamenti suggeriscono che per entrambe i materiali la conducibilità idraulica si riduce eccetto che nel caso di caolinite permeata con il 100% di acido acetico nel permeametro a pareti rigide.

Per l'eptano i risultati sono quelli mostrati in Figura 2-23:

Concentration of heptane (1)	Flexible-Wall Cell				Rigid-Wall Cell			
	k_f (2)	k_f/k_w (3)	PV_f (4)	$(C/Co)_f$ (5)	k_f (6)	k_f/k_w (7)	PV_f (8)	$(C/Co)_f$ (9)
(a) Kaolinite								
53 mg/L	7.0×10^{-7}	1.0	3.0	1.4	7.3×10^{-8}	1.2	3.7	0.78
Pure	2.3×10^{-9}	0.03	0.04	0.0	2.5×10^{-5}	250	2.5	1.0
(b) Illite-Chlorite								
53 mg/L	5.0×10^{-9}	1.0	0.33	—	1.3×10^{-8}	1.0	2.2	2.2
Pure	1.0×10^{-5a}	200	0.37	1.0	1.0×10^{-5}	660	0.08	1.0

^aThis value is thought to be incorrect due to leakage of heptane along a crease in the flexible membrane. The test was not repeated.

Figura 2-23 Risultati per la caolinite e per l'illite-clorite permeate con eptano puro e con concentrazione pari a 53mg/L (Bowders & Daniel, 1987)

In particolar modo, per la soluzione acquosa in cui questo è presente con una concentrazione pari al suo limite di solubilità, per entrambi i materiali il permeametro a pareti rigide mostra una variazione pressoché nulla. Nel caso di eptano puro (100%), invece, si ha un incremento pari a 250 e 660 volte, rispettivamente per caolinite e illite-clorite, rispetto al valore di riferimento all'acqua. Tali andamenti, però, non sono confermati dai risultati del permeametro a pareti flessibili, in cui per la caolinite addirittura si ha un decremento di due ordini di grandezza.

Infine, i test condotti con il tricloroetilene hanno restituito i seguenti risultati (Figura 2-24):

Concentration of TCE (1)	Flexible-Wall Cell				Rigid-Wall Cell			
	k_f (2)	k_f/k_w (3)	PV_f (4)	$(C/Co)_f$ (5)	k_f (6)	k_f/k_w (7)	PV_f (8)	$(C/Co)_f$ (9)
(a) Kaolinite								
1,100 mg/L	7.6×10^{-7}	0.95	3.3	1.1	7.3×10^{-8}	1.2	3.7	0.78
Pure	1.0×10^{-10}	0.003	0.10	0.0	1.4×10^{-5}	140	2.5	1.0
(b) Illite-Chlorite								
1,100 mg/L	5.1×10^{-9}	0.80	2.6	1.0	2.1×10^{-8}	1.5	3.0	1.0
Pure	2.7×10^{-10}	0.05	0.10	0.0	5.0×10^{-6}	500	0.23	1.0

Figura 2-24 Risultati per la caolinite e per l'illite-clorite permeate con tricloroetilene puro e con concentrazione pari a 1,100 mg/L (Bowders & Daniel, 1987)

Per la concentrazione pari al limite di solubilità del tricloroetilene in acqua la variazione di conducibilità mostrata è pressoché insignificante. Invece, considerando la permeazione con tricloroetilene puro, il permeametro a pareti rigide mostra un incremento pari a 140 e 500 volte rispetto al valore di riferimento, rispettivamente per caolinite e illite-clorite. Tale incremento, però, non viene confermato dai risultati del permeametro a pareti flessibili, che mostra una riduzione pari a 3 e 2 ordini di grandezza, rispettivamente, rispetto al valore di riferimento.

2.5. Uppot & Stephenson (1989)

In questo articolo vengono discussi i risultati di prove di conducibilità idraulica condotte con permeametro a pareti flessibili su terreni argillosi per valutare la conducibilità idraulica in funzione del permeante utilizzato.

In Figura 2-25 viene fornita una rappresentazione della strumentazione utilizzata durante la sperimentazione:

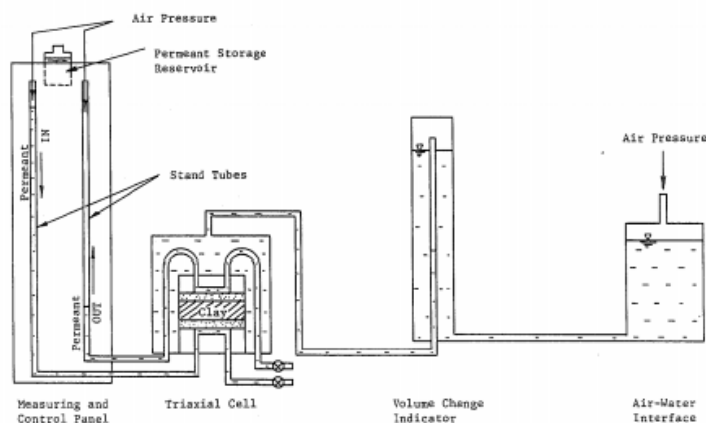


Figura 2-25 Schematizzazione della strumentazione utilizzata durante la sperimentazione (Uppot & Stephenson, 1989)

2.5.1. Materiali

I terreni utilizzati nella sperimentazione sono due argille: una di caolinite e una di montmorillonite.

Test di diffrazione a raggi X hanno evidenziato che la prima è caratterizzata, da un punto di vista mineralogico, da un 90% di caolinite e un 10% di illite, mentre la seconda da un 75% di montmorillonite, 15% di caolinite e 10% di illite.

L'esecuzione dei test è avvenuta sfruttando sei differenti liquidi organici.

2.5.2. Procedure

I campioni su cui sono state effettuate le prove di conducibilità idraulica sono stati preventivamente consolidati dalla condizione di slurry (campioni ricostituiti) come segue: 500 grammi di terreno essiccato è stato miscelato con un sufficiente quantitativo di permeante standard deareato. Successivamente, lo slurry è stato inserito in un agitatore elettrico per circa 10 minuti, quindi coperto e lasciato a riposo in una camera umida per almeno 48 ore. Dopo tale fase, è stato agitato per ulteriori 10 minuti e versato all'interno dell'attrezzatura per la consolidazione. Un'asta vibrante è stata inserita all'interno del materiale per 5 minuti per eliminare l'aria presente al suo interno.

La consolidazione è avvenuta con gradini di carico di 34 kPa fino ad una tensione verticale di consolidazione finale pari a 172 kPa. Effettuata la consolidazione, i provini così ricostituiti sono stati assoggettati alla prova di conducibilità.

I permeanti utilizzati in questa sperimentazione sono una soluzione di 0,004 N di solfato di magnesio, acido acetico, anilina, metanolo e xylene.

Inizialmente sono state eseguite delle prove con la soluzione di solfato di magnesio (liquido di riferimento) per stabilire il gradiente idraulico da applicare durante le prove.

Sono stati verificati gradienti pari a 60, 277, 554 e 831. Si è visto che la conducibilità idraulica è indipendente dal gradiente idraulico nel range di valori compreso tra 277 e 831. Quindi, si è scelto di eseguire le prove di conducibilità idraulica sfruttando un gradiente pari ad 831 ed in alcune prove anche quello pari a 277.

I campioni sottoposti a prova possiedono un'altezza pari a 1,27 cm.

Inizialmente, questi sono stati saturati ed ulteriormente consolidati attraverso l'applicazione di una pressione in cella pari a 207 kPa ed una "back pressure" pari a 69 kPa. Alla fine di questa fase, per generare il gradiente idraulico, si è innalzata la pressione del drenaggio inferiore fino a 172 kPa, mantenendo costanti quella in cella e in corrispondenza del drenaggio superiore.

2.5.3. Risultati

In Figura 2-26 sono riportati i risultati di conducibilità idraulica per ottenuti per i due materiali nei confronti di acido acetico e metanolo:

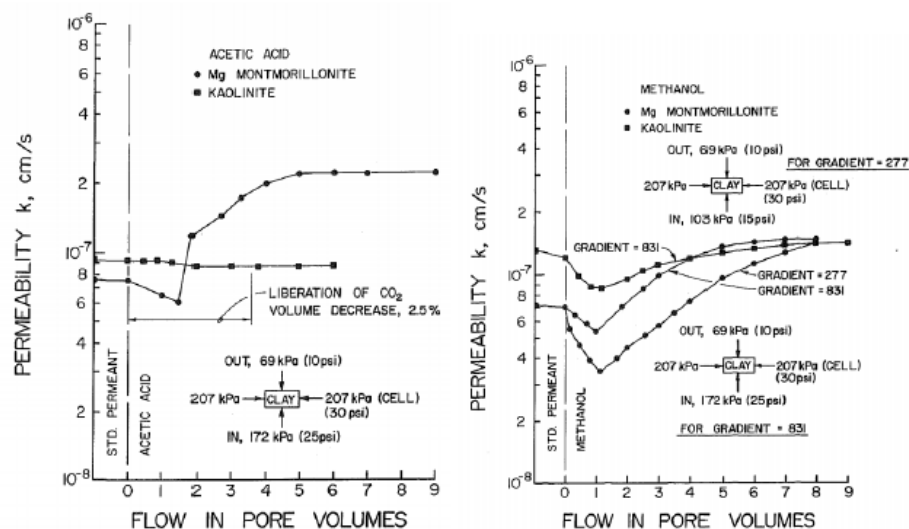


Figura 2-26 Risultati delle prove di conducibilità idraulica nel caso di permeazione con Acido acetico (sinistra) e Metanolo (destra) (Uppot & Stephenson, 1989)

Da tali andamenti si evince che:

- Per l'acido acetico, dopo un leggero incremento iniziale, la conducibilità idraulica per l'argilla di montmorillonite subisce un incremento pari a circa 3 volte il valore di riferimento, mentre non si percepiscono variazioni significative nel caso dell'argilla di caolinite.
- Per il metanolo, l'argilla di montmorillonite mostra una riduzione iniziale seguita da un incremento pari a 2 volte il valore di riferimento. In particolar modo, per tale argilla sono stati eseguiti due differenti test: uno con gradiente idraulico pari a 277 e l'altro con 831. In entrambe i casi il valore di conducibilità idraulica raggiunto alla fine della prova è lo stesso, ciò che cambia è l'entità del decremento iniziale, pari al 50% e al 70% del valore di riferimento di conducibilità, rispettivamente per 277 e 831.

Per l'argilla di caolinite, invece, è stato registrato un trend contraddistinto quasi esclusivamente da un leggero incremento.

I test condotti usando l'anilina non hanno restituito un flusso misurabile per l'argilla di montmorillonite, mentre hanno mostrato una riduzione di conducibilità idraulica pari a 400 volte il valore di riferimento per l'argilla di caolinite.

Anche nel caso di permeazione con xylene non è stato possibile misurare il flusso nell'argilla di montmorillonite, mentre per i campioni di caolinite si è misurata una riduzione di conducibilità idraulica da 9×10^{-7} a 2×10^{-7} cm/s.

2.6. Abdul et al. (2000)

L'obiettivo dello studio condotto dagli autori è quello di valutare il movimento di nove solventi organici e loro soluzioni acquose attraverso due differenti tipi di argilla.

2.6.1. Materiali

Le argille analizzate sono una bentonite e un caolino. La prima è caratterizzata da un contenuto di montmorillonite pari a circa il 90-95%, 4% di quarzo e qualche traccia di illite. La seconda, invece possiede un 90-95% di caolino, 2-3% di quarzo e tracce di montmorillonite e illite. I limiti liquido e plastico per i due terreni sono rispettivamente pari a 470% e 61% per la bentonite e 45% e 37% per il caolino.

I fluidi organici utilizzati sono benzene, toluene, p-xylene, nitrobenzene, tricloroetilene, tetracloroetilene, acetato di etile, 2-butanone e fenolo. Inoltre, una soluzione di 0,005 N di solfato di calcio è stata usata per definire un valore di conducibilità idraulica di riferimento.

2.6.2. Procedure

Ogni esperimento è stato condotto in permeametro seguendo tali fasi:

- 1) Installazione del campione nel permeametro;
- 2) Permeazione per circa un volume di pori con soluzione di solfato di calcio;
- 3) Permeazione per almeno un volume di pori con soluzione acquosa del composto organico di interesse;
- 4) Permeazione per almeno tre volumi di pori con solvente organico puro.

La fase 2 permette di definire un valore di conducibilità idraulica di riferimento.

Nella fase 3 sono state considerate due soluzioni con concentrazione di solvente organico pari, rispettivamente, al 10% ed al 50% del corrispondente limite di solubilità in acqua.

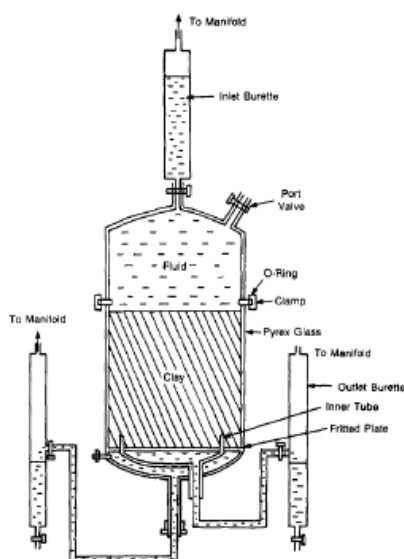


Figura 2-27 Schematizzazione del permeametro usato nella sperimentazione (Abdul, Gibson, & Rai, 1990)

2.6.3. Risultati

In Figura 2-28 sono mostrati i risultati ottenuti con i test:

Compound (permeameter)	Kaolin				Bentonite			
	Aqueous CaSO ₄ solution (0.005 N)	Aqueous organic solution (10% sol. limit)	Aqueous organic solution (50% sol. limit)	Neat organic solvent	Aqueous CaSO ₄ solution (0.005 N)	Aqueous organic solution (10% sol. limit)	Aqueous organic solution (50% sol. limit)	Neat organic solvent
Tetrachloroethylene	—	—	—	—	0.88	0.59	—	5.13
p-Xylene	11.90	12.13	12.28	66.03	0.85	0.63	0.72	15.87
Toluene	9.14	9.22	8.83	79.42	0.85	0.72	0.61	1.79
Trichloroethylene	—	—	—	—	0.90	0.63	—	1.11
Benzene	10.61	11.21	10.78	120.74	0.90	0.65	0.68	1.93
Nitrobenzene	14.29	14.38	12.60	50.38	0.83	0.60	—	5.00
Ethyl acetate	11.89	11.49	10.41	39.87	0.84	0.75	—	16.49
Phenol	4.97	4.55	4.38	68.69	0.92	0.76	—	80.80
2-Butanone	14.97	13.49	11.53	63.75	0.91	0.65	—	5.93
Reference	13.00	—	—	—	0.70	—	—	—

Figura 2-28 Risultati delle prove con permeametro per i materiali indagati (10^{-7} cm/s) (Abdul, Gibson, & Rai, 1990)

La permeazione con soluzione acquosa non sembra comportare variazioni in termini di conducibilità idraulica per entrambi i terreni. Successivamente, sostituendo le soluzioni acquose con i solventi puri, si osserva una variazione drastica del flusso attraverso i campioni.

Il flusso dei solventi aromatici benzene, toluene e p-xylene attraverso bentonite e caolino e nitrobenzene attraverso la bentonite è simile.

Il nitrobenzene e il butanone mostrano un iniziale decremento seguito da un rapido incremento nel flusso attraverso il caolino.

Nel momento in cui tali solventi vengono inseriti all'interno del permeametro si creano delle fratture sulla superficie e nella parte centrale del campione. Simultaneamente la conducibilità idraulica decresce lentamente fin tanto che le fratture si propagano verso la base del campione. Quando questa viene raggiunta si ha il completo drenaggio del solvente e quindi il rapido incremento di conducibilità idraulica.

In contrasto, i solventi idrofilici (acetato di etile, butanone e fenolo) nella bentonite e nel caolino, e il trichloroetilene e il tetrachloroetilene nella bentonite, mostrano un incremento di conducibilità idraulica immediatamente successivo al loro inserimento all'interno del permeametro.

Quindi, solventi organici puri determinano la fratturazione delle argille e la formazione di macroparticelle che comportano l'incremento di conducibilità osservato sperimentalmente.

2.7. Granapragasam et al. (1995)

Lo scopo di tale studio è quello di investigare sull'effetto dell'anilina sulla mineralogia della bentonite e di miscele sabbia-bentonite.

2.7.1. Materiali

In tale studio sono state utilizzate una bentonite ($<45 \mu\text{m}$) con capacità di scambio cationico pari a 97 meq/100g ed una sabbia proveniente da Ottawa (0,6-0,85 mm). Come liquido permeante si è sfruttata l'anilina.

2.7.2. Procedure

Sono stati eseguiti due tipi di prove: "batch" test con bentonite per diversi periodi di esposizione fino a 200 giorni, e prove di conducibilità idraulica su miscele sabbia-bentonite con quantitativi di quest'ultima pari al 10% e al 20%.

I batch test sono stati eseguiti miscelando anilina e bentonite in tubi di teflon con un rapporto in peso 20:1. La miscela è stata continuamente agitata in uno shaker per periodi di 5min, 7, 28, 90 e 200 giorni. Alla fine dello specifico periodo la miscela è stata filtrata attraverso un filtro con maglia $0,22 \mu\text{m}$.

I test di conducibilità idraulica sono, invece, stati condotti nel permeametro a pareti flessibili su campioni di sabbia-bentonite compattati con un contenuto d'acqua prossimo a quello ottimale fino a raggiungere diametro e altezza pari a, rispettivamente, 7 e 5 cm.

Le pressioni in gioco variano tra 385-490 kPa per il drenaggio in entrata, 315-455 kPa per il drenaggio in uscita e 455-525 kPa per la cella.

2.7.3. Risultati

I risultati delle prove di conducibilità sono quelli mostrati in FIGURA:

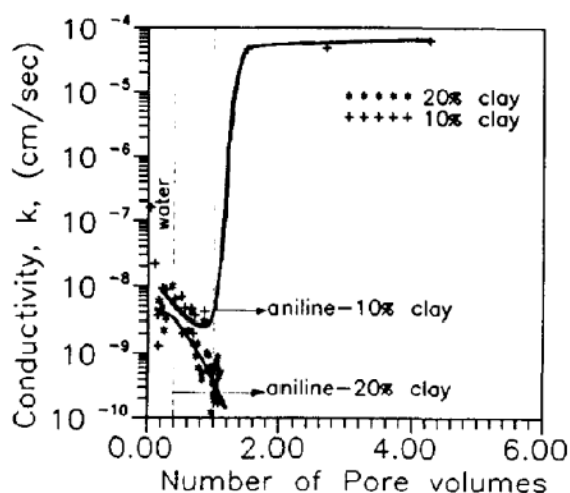


Figura 2-29 Risultati delle prove di conducibilità delle miscele sabbia-bentonite (Gnanapragasam, Lewis, & Finno, 1995)

In particolar modo, si ha un incremento di quattro ordini di grandezza (da 10^{-8} a 5×10^{-5} cm/s) della conducibilità idraulica per la miscela sabbia-10%bentonite nel momento in cui il fluido permeante passa da acqua distillata ad anilina.

Nel caso di miscele sabbia-20%bentonite, invece, la conducibilità passa da 5×10^{-9} a 2×10^{-10} cm/s) a seguito dello scambio di fluidi. Si assiste, pertanto, ad un decremento.

Il test è terminato dopo una permeazione di solo 0,7 volumi di pori poiché il flusso è risultato insufficiente.

Dai risultati di tale sperimentazione si evince che la conducibilità idraulica del terreno dipende dalla sua PSD. Infatti, il campione con una frazione maggiore di pori grossolani ($>50 \mu\text{m}$) ha una conducibilità idraulica maggiore nei confronti dell'anilina rispetto al campione con frazione maggiore di pori piccoli.

Ciò è dovuto al fenomeno del flusso a fasi, con l'anilina che deve attraversare un materiale che è saturo d'acqua.

L'esposizione della bentonite all'anilina non comporta una variazione della sua struttura mineralogica. Comunque, l'assorbimento dell'anilina sulla superficie della particella di argilla causa una variazione dell'orientazione dei minerali argillosi e, probabilmente, un fenomeno di aggregazione delle particelle nei campioni compattati.

2.8. Hueckel et al. (1997)

In questo articolo viene trattato il tema della modellazione dei risultati sperimentali ottenuti da Fernandez e Quigley (1988) e Fernandez e Quigley (1991) sull'argilla di Sarnia.

Nel passato, sono stati proposti diverse interpretazioni e meccanismi qualitativi dell'evoluzione della permeabilità intrinseca. Questi meccanismi includono la variazione della dimensione dei pori dovuta al ritiro dello strato d'acqua adsorbita, rimozione di particelle, migrazione e deposizione che comportano l'occlusione dei vuoti, variazioni di connettività e flocculazione. In questo articolo viene esaminata una serie di modelli quantitativi basati su tali meccanismi in maniera tale da accertare numericamente il loro potere predittivo.

2.8.1. Influenza della degradazione chimica della conducibilità idraulica sul trasporto convettivo di contaminanti attraverso uno strato omogeneo.

A tal proposito, si è esaminato un semplice caso monodimensionale di trasporto puramente convettivo. Si è assunto che la conducibilità idraulica dell'argilla subisce una degradazione causata dalla concentrazione del contaminante nella fase fluida del terreno. In questo modo la velocità di movimento del contaminante attraverso la barriera aumenta a seguito dell'incremento della permeabilità intrinseca. Trascurando i termini di trasporto relativi alla diffusione e dispersione, si considera esclusivamente l'avanzamento del fronte contaminato. Si suppone che inizialmente, attraverso uno strato omogeneo con permeabilità k^0 , fluisca acqua soggetta ad un gradiente idraulico costante. Ad un certo istante di tempo $T=0$, viene applicato un contaminante con concentrazione c in corrispondenza della sommità dello strato ($z=L$). Il fronte contaminato comincia ad avanzare mantenendo una concentrazione costante e dando vita ad una netta interfaccia con lo strato non contaminato, che allo stesso tempo inizia a ridursi dall'alto verso il basso.

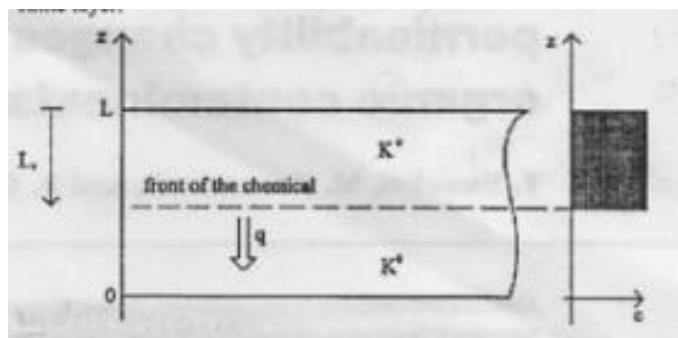


Figura 2-30 Modello di flusso puramente convettivo attraverso uno strato omogeneo (Hueckel et al., 1997)

Dopo un certo tempo T , il fronte contaminato avrà raggiunto una certa profondità $L_c(T)$ che può essere valutata assumendo una portata specifica q costante lungo tutto lo strato:

$$L_c(T) = \int_0^T \frac{q(t)}{n^e} dt$$

dove n^e rappresenta la porosità effettiva (pori effettivamente disponibili per il flusso), mentre il rapporto q/n^e è una sorta di velocità media del trasporto convettivo. Si assume che la variazione di conducibilità idraulica avviene immediatamente in corrispondenza del fronte.

In seguito all'avanzamento del fronte contaminato, si può considerare l'intero strato come la sovrapposizione in serie di due strati omogenei, uno con conducibilità k^0 e l'altro con k^c . La portata specifica, che include anche gli effetti della forza di gravità sul flusso in tale sistema, diventa:

$$q(T) = - \frac{1}{\frac{K^0 L_c(T)}{k^c L} + \frac{L - L_c(T)}{L}} k^0 \frac{\Delta h(T)}{L}$$

In cui h è il carico idraulico. Combinando le due equazioni soprascritte, si ottiene un'equazione non lineare di Volterra del secondo tipo per il reciproco della portata specifica ($\Lambda=1/q$) in funzione del tempo T :

$$\int_0^T \frac{A(t)}{\Lambda(t)} dt + \Lambda(T) = B(T)$$

In cui:

$$A(t) = \frac{k^c - k^0}{\Delta h(t) k^c k^0 n^e} \quad B(t) = \frac{1}{\Delta h(T) k^0}$$

L'equazione di Volterra può essere risolta numericamente, integrando step by step con la regola del trapezio.

Si riportano nelle immagini seguenti (Figura 2-31) le soluzioni numeriche in termini di velocità del fluido e avanzamento del fronte contaminato ottenute per il flusso puramente convettivo di etanolo in uno strato omogeneo di argilla, adottando come condizioni per il contorno superiore ($z/L=1$) ed inferiore ($z/L=0$), rispettivamente, un carico idraulico pari a 3.36m e 0m.

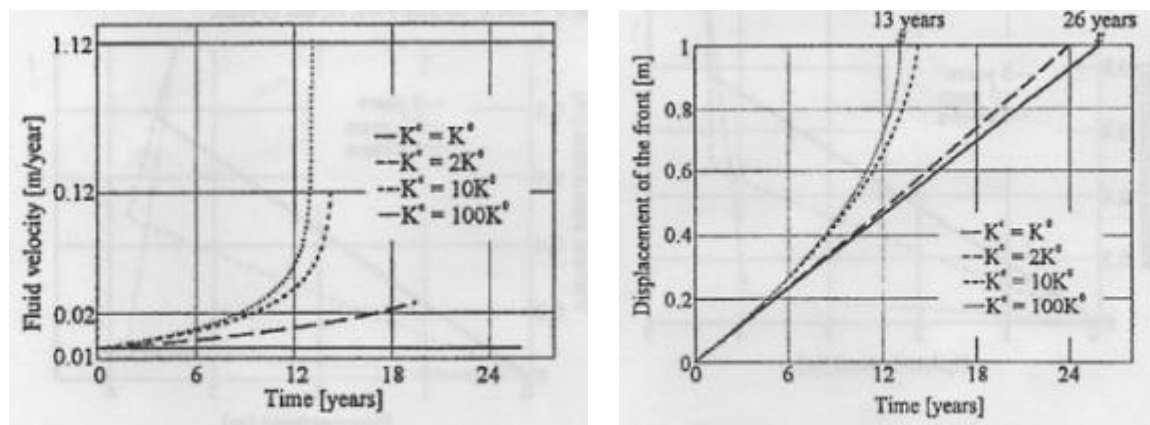


Figura 2-31-Andamento della velocità del fluido (sinistra) e dell'avanzamento del fronte contaminato nel tempo (destra) (Hueckel et al., 1997)

In particolare modo sono state considerate 4 diverse concentrazioni di etanolo, tali per cui si ha una variazione della permeabilità intrinseca dal valore iniziale (relativo all'acqua) fino a 2 ordini di grandezza superiori. Inoltre, si è assunta una porosità effettiva pari a 0.3.

Come si può vedere dalle immagini, inizialmente, si ha un effetto stabilizzante da parte dello strato non contaminato (le curve tendono a sovrapporsi). Con il passare del tempo, però, le differenze sono sempre più nette e alla fine le curve sono ampiamente distanti. Per esempio, se si considera l'andamento dell'avanzamento del fronte in funzione del tempo, si può notare come, con un incremento di due ordini di grandezza della permeabilità intrinseca si dimezza il tempo di transito del contaminante.

Si riportano ancora i trend del carico idraulico e delle pressioni idrauliche in funzione della profondità (Figura 2-32):

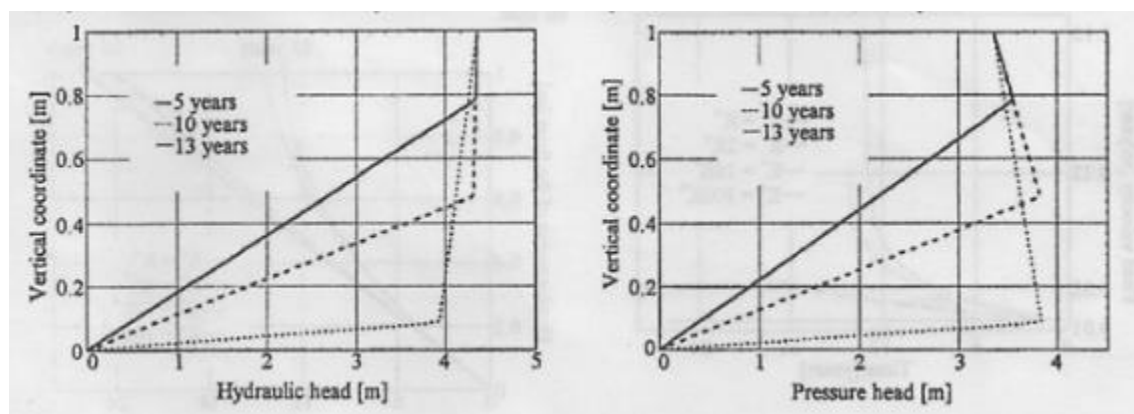


Figura 2-32-Andamento del carico idraulico e delle pressioni idrauliche in funzione della profondità (Hueckel et al., 1997)

Considerando l'andamento delle pressioni idrauliche, queste crescono oltre il valore che si ha in corrispondenza del contorno superiore per sopperire alla riduzione delle tensioni di

filtrazione tra fluido e solido (dovute all'incremento di permeabilità nella parte contaminata dello strato) e garantire l'equilibrio.

È necessario specificare che, considerando solo il contributo convettivo del flusso, si trascura l'eventuale variazione di concentrazione dovuta all'aliquota diffusiva del flusso. Pertanto, la permeabilità intrinseca potrebbe crescere a causa della diffusione ed eventualmente accelerare il trasporto convettivo. Per tale motivo, il ruolo stabilizzante dello strato incontaminato potrebbe ridursi. D'altra parte, però, una più bassa concentrazione potrebbe rallentare l'evoluzione della concentrazione e quindi della permeabilità.

2.8.2. Modellazione della permeabilità intrinseca dei terreni argillosi

I terreni argillosi sono contraddistinti da diverse caratteristiche che ne possono influenzare la permeabilità intrinseca. A tal proposito, diversi modelli strutturali sono stati sviluppati per rendere possibile la valutazione numerica della permeabilità intrinseca e delle sue variazioni in funzione di diversi parametri geometrici in un terreno argilloso.

Per semplificare il problema, sono state assunte le seguenti ipotesi:

1. Lo scheletro solido del terreno è costituito da due frazioni nettamente distinte: una frazione grossolana costituita da inclusioni impermeabili (sabbia o “particelle di cenere volante”) ed una frazione fine permeabile (mix di limo e argilla);
2. La permeabilità della frazione fine è dovuta alla presenza di micropori tra i grani di limo o i clusters ed è modellata in funzione della reale distribuzione della dimensione dei pori;
3. Il materiale non presenta macrofratture sia inizialmente che in seguito alla permeazione con liquidi organici;
4. L’evoluzione chimica della permeabilità è modellata in funzione di una variazione in dimensione e forma dei micropori e/o di una migrazione o deposizione delle particelle;
5. Deformazioni meccaniche macroscopiche vengono trascurate.

Per il postulato 1, la permeabilità intrinseca di un materiale costituito da due diverse frazioni può essere definita a partire da quella della frazione fine, usando un fattore di formazione F che dipende dalle caratteristiche delle inclusioni impermeabili (forma, dimensione, etc.):

$$K = \frac{K^f}{F}$$

Il fattore F si determina sperimentalmente. Tale equazione permette di ottenere una buona approssimazione se la frazione fine è omogenea, le particelle grossolane sono omogeneamente distribuite all’interno della frazione fine e se il flusso lungo i contatti tra le due frazioni è insignificante. Da tale relazione si capisce che, per determinare la permeabilità intrinseca di un terreno argilloso, è necessario dapprima determinare quella della frazione fine.

2.8.3. Modello per la permeabilità all'acqua della frazione fine

Tale modello è basato sulla reale distribuzione della dimensione dei pori (PSD), valutata attraverso il porosimetro ad intrusione di mercurio, ed è stato sviluppato per l'argilla di Sarnia (Ontario), ma può essere applicato anche a materiali con composizione simile. Esso si basa su una struttura solida di argilla assunta periodica. In particolar modo si ha una cella elementare bidimensionale che si ripete periodicamente. Tale cella ha dimensione $h' \times a'$ e contiene un poro più grande collegato in serie con due più piccoli, formando così un canale continuo per il flusso ma segmentato e con spessore variabile.

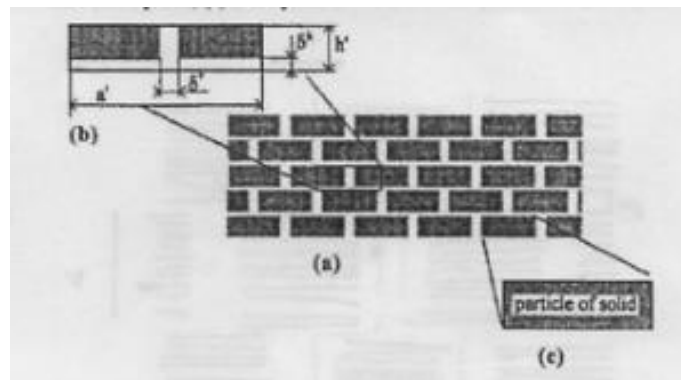


Figura 2-33-Cella elementare del modello (Hueckel et al., 1997)

I canali più grandi rappresentano i pori posizionati lungo i contatti bordo-bordo tra i grandi aggregati di argilla e/o i pori compresi tra i grani di limo in cui non è presente il gel di argilla. I canali più piccoli rappresentano, invece, i pori tra i contatti faccia/faccia tra i cluster di argilla che, in seguito a compattazione e sedimentazione sono stati pressati l'uno contro l'altro. Si suppone che i canali più piccoli sono disposti orizzontalmente, quelli più grandi verticalmente.

Bisogna considerare che le argille naturali fortemente compattate tendono ad avere una struttura costituita da domini paralleli di "piastrine". Pertanto, la singola particella solida di tale modello rappresenta una particella equivalente della frazione fine e può essere composta da un numero più o meno elevato di cluster di argilla. In tale particella può essere presente dell'acqua inter-cluster che, per la dimensione dei pori tra le singole piastrine (10^{-10} m), ha caratteristiche completamente diverse da quella che fluisce nei pori più grandi descritti precedentemente. In particolar modo, nel seguito verranno considerate due differenti rappresentazioni della struttura dell'argilla, una con "piastrine" disposte esclusivamente nella direzione orizzontale e l'altra con disposizione sia orizzontale che verticale (Figura 2-34).

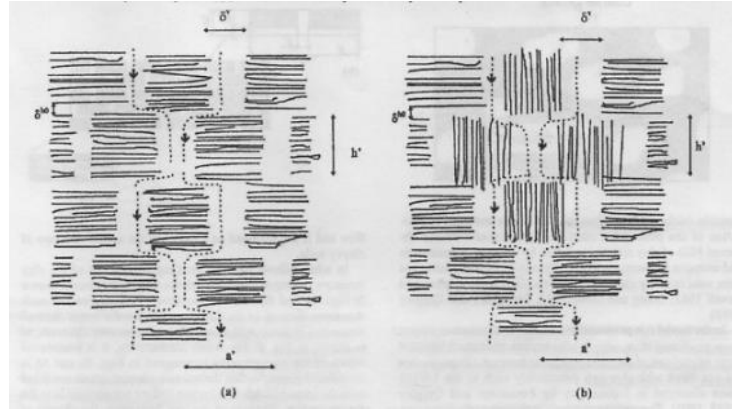


Figura 2-34-Disposizione delle piastrine di argilla (Hueckel et al., 1997)

Nella cella elementare di una tale struttura il flusso avviene secondo i canali più grandi connessi in serie con quelli più piccoli, come mostrato in Figura 2-35:

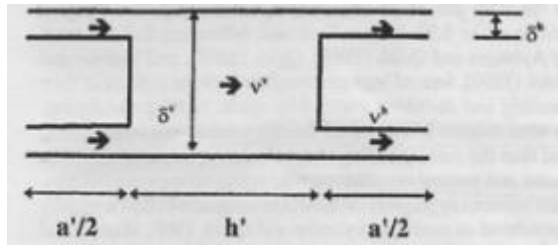


Figura 2-35-Andamento del flusso nella cella elementare (Hueckel et al., 1997)

Dato che il flusso è molto lento, si può considerare trascurabile l'effetto del cambio di direzione in corrispondenza delle giunzioni tra i canali nei confronti dell'equilibrio macroscopico del momento lineare del fluido. Inoltre, la dimensione dei canali può essere definita a partire da quella della cella elementare trascurando le giunzioni. In questo modo, la relazione tra la velocità di flusso e la corrispondente variazione di pressione può essere ricavata come soluzione dell'equazione di Navier-Stokes e assume le seguenti espressioni:

$$v^v = -\frac{(\delta^v)^2}{12\mu} \frac{\Delta p^v}{h'} \quad v^h = -\frac{(\delta^h)^2}{12\mu} \frac{\Delta p^h}{a'/2}$$

In cui:

- δ^v e δ^h sono, rispettivamente, lo spessore dei canali verticali e di quelli orizzontali;
- Δp^v e Δp^h sono, rispettivamente, le variazioni di pressione lungo i canali verticali e quelli orizzontali;
- μ è la viscosità dinamica del fluido.

Il principio di conservazione della massa richiede che:

$$v^v \delta^v = 2v^h \delta^h$$

Considerando che i canali sono connessi in serie, la variazione complessiva di pressione per la cella è pari a:

$$\Delta p = \Delta p^v + \Delta p^h$$

In tal modo la portata specifica media della cella elementare definita come:

$$q = \frac{v^v \delta^v}{a'}$$

può essere riscritta come segue:

$$q = \frac{(\delta^h)^3}{12\mu a'} \frac{1}{\left(\frac{\delta^h}{\delta^v}\right) + \frac{a'}{4h'}} \frac{\Delta p}{h'}$$

Quest'ultima può essere riscritta sotto forma di una equivalente legge di Darcy per la frazione fina come segue:

$$q = -\frac{K^f}{\mu} \nabla p$$

In cui ∇p è il gradiente di pressione e K^f è la permeabilità intrinseca media della microstruttura considerata, che dipende dalle dimensioni della cella e dei canali. In particolar modo quest'ultima si può scrivere in funzione di un parametro adimensionale R nel seguente modo:

$$K^f = \frac{(\delta^h)^3}{12a'} R \quad \text{con} \quad R = \frac{1}{\left(\frac{\delta^h}{\delta^v}\right)^3 + \frac{a'}{4h'}}$$

Se la dimensione dei canali più piccoli risulta essere molto inferiore a quella dei canali più grandi, si può effettuare una semplificazione:

$$R = \frac{4h'}{a'}$$

L'importante caratteristica di un modello con connessioni in serie come questo è che esso può esibire simultaneamente un'elevata porosità e impermeabilità, cosa non possibile, invece, con un sistema in parallelo. Un'osservazione importante da fare è che la dimensione dei canali più piccoli controlla la permeabilità del sistema. Un modello come quello appena descritto, richiede la determinazione di quattro parametri geometrici: le due dimensioni della cella elementare e le larghezze dei canali verticali e orizzontali. Nel valutare tali parametri, si assume che δ^v (estensione dei canali verticali) sia noto dalle misure con il porosimetro a mercurio, così come la frazione di volume (porosità) di tali canali n^v , mentre si assume trascurabile quella relativa ai canali orizzontali. Quindi l'altezza della cella elementare si determina come:

$$h' = \frac{\delta^v}{n^v}$$

In mancanza di dati specifici si può assumere il rapporto h'/a' uguale ad 1 e ricavare, invertendo la relazione, il valore di a' . L'unico parametro incognito rimane δ^h che può essere ricavato o da misure con porosimetro o dall'equazione scritta in precedenza per la permeabilità intrinseca sostituendo un valore di permeabilità valutata sperimentalmente.

In maniera tale da collegare tale modello strutturale con i problemi reali, si è effettuata una calibrazione sull'argilla di Sarnia, ottenendo risultati soddisfacenti per il materiale permeato da acqua. Nei paragrafi successivi verranno affrontati gli effetti della disidratazione dell'acqua inter-cluster e dell'orientazione delle "piastrine", chimicamente indotte, sull'evoluzione della permeabilità.

2.8.4. Modellazione dell'evoluzione della permeabilità intrinseca dovuta alla disidratazione chimica

I meccanismi di interazione tra argilla e liquidi organici, responsabili della variazione della permeabilità intrinseca, sono spesso collegati ai seguenti processi:

- Ridistribuzione dei vuoti e formazione di nuovi canali preferenziali per il flusso in seguito alla disidratazione chimica indotta nei confronti dell'acqua adsorbita nell'intorno dei cluster argillosi e/o al decremento del numero di idrati tra le "piastrine" con conseguente riduzione della distanza tra queste. Tutto ciò conduce ad un collasso dei cluster e all'apertura di uno spazio disponibile per il flusso tra questi;
- Riordinamento della microstruttura dell'argilla dovuta alla flocculazione, peptizzazione, migrazione e deposizione delle particelle.

La variazione chimica indotta in termini di permeabilità intrinseca dipende da diversi fattori quali: la composizione mineralogica del materiale e la sua struttura interna, permeante, tensione applicata. Si esclude la possibilità di un incremento di permeabilità dovuta alla formazione di macro fratture e si considera la permeazione di un liquido per volta. In particolar modo sono stati sviluppati quattro modelli che differiscono nell'interpretazione dell'evoluzione dello spazio occupato dai pori. Questi modelli sono basati su quattro differenti meccanismi ai quali è possibile attribuire una variazione di permeabilità:

1. Variazione della dimensione dei pori;
2. Variazione della dimensione dei pori dovuti alla migrazione delle particelle;
3. Variazione della connettività;
4. Rotazione delle particelle dovuta alla flocculazione.

In Figura 2-36 si riportano i risultati di test relativi alla permeazione con etanolo e diossano dell'argilla di Sarnia condotti da Fernandez e Quigley (1988 e 1991):

Permeant	Concentration, c(%)	Hydraulic conductivity, k (m/s)	Intrinsic permeability, K (m ²)	large pore: size (μm); incremental pore vol. (cm ³ /g)	small pore: size (μm); incremental pore vol. (cm ³ /g)
Ethanol	0	5.95×10^{-11}	6.0×10^{-18}	3.0; 0.006 (diffuse)	0.08; 0.008
Ethanol	40	1.6×10^{-11}	5.5×10^{-18}	None	0.08; 0.024
Ethanol	100	6.2×10^{-9}	1.1×10^{-15}	None	0.08; 0.02
Dioxane	0	7×10^{-11}	7.2×10^{-18}	3.0; 0.006 (diffuse)	0.08; 0.008
Dioxane	40	4.4×10^{-11}	9.5×10^{-18}	Traces	0.08; 0.025
Dioxane	100	1.35×10^{-8}	1.0×10^{-14}	Traces	0.08; 0.018

Figura 2-36-Valori sperimentali ottenuti da Fernandez e Quigley (Hueckel et al., 1997)

2.8.5. Modello per la variazione dei pori

Ricordando ciò che si è affermato prima, ovvero che la permeabilità intrinseca è funzione della dimensione dei canali più piccoli, si suppone che il drastico incremento di permeabilità chimicamente indotto sia dovuto ad un aumento della dimensione dei soli canali più piccoli, mentre rimane invariata quella dei canali più grandi, della cella elementare e delle particelle grossolane. Si osserva però che, per le relazioni scritte in precedenza, nel caso di permeazione con etanolo, un aumento di permeabilità intrinseca di 2 ordini di grandezza corrisponde ad un incremento della dimensione dei pori più piccoli di circa 6 volte, mentre per il diossano un aumento di 3 ordini di grandezza corrisponde ad un incremento di 10 volte. Le misurazioni effettuate con il porosimetro ad intrusione di mercurio, però, a differenza del caso di permeazione con semplice acqua, non trovano un riscontro. Infatti nonostante il brusco incremento di permeabilità, le misure sperimentali indicano che l'incremento di dimensione dei pori risulta essere insignificante.

2.8.6. Modello per la migrazione delle particelle

Un altro modello viene adesso esaminato. In particolar modo si suppone che oltre ad un accrescimento della dimensione dei canali più piccoli (orizzontali) avvenga anche una migrazione di particelle finì tanto maggiore quanto maggiore è il gradiente idraulico applicato. In particolar modo si assume che, in seguito alla disidratazione chimica indotta, diverse piastrine si svincolano dai blocchi di cluster migrando verso i canali, che nel frattempo cominciano a riempirsi di tali piastrine. Questo comporta un incremento di permeabilità. Infatti, a differenza del caso con acqua, in cui tale migrazione causa un'occlusione dei pori, per un permeante con bassa costante dielettrica, che non è caratterizzato da grandi masse di liquido immobile, la conducibilità cresce quasi istantaneamente.

Per modellare matematicamente tale modello si fa riferimento nuovamente alle equazioni scritte in precedenza:

$$K^f = \frac{(\delta^h)^3}{12a'} R \quad \text{con} \quad R = \frac{1}{\left(\frac{\delta^h}{\delta^v}\right)^3 + \frac{a'}{4h'}}$$

Si considerano due differenti approcci.

In un primo caso si modellano i canali riempiti con questo materiale sciolto attraverso un fascio di sotto-canali di uguale dimensione, paralleli e con apertura variabile.

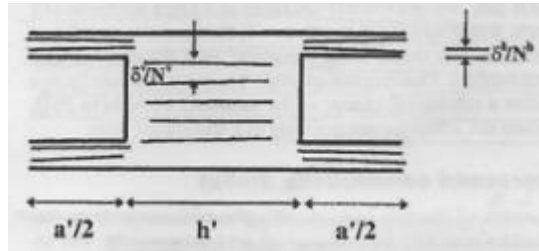


Figura 2-37-Modellazione con fascio di sottocanali paralleli di uguale dimensione (Hueckel et al., 1997)

Assumendo trascurabile il volume della frazione di particelle sciolte, la permeabilità intrinseca di una tale struttura si può esprimere in funzione di un fattore di microstruttura pari a:

$$R = \frac{1}{(N^v)^2 \left(\frac{\delta^h}{\delta^v}\right)^3 + (N^h)^2 \frac{a'}{4h'}}$$

In cui N^v e N^h sono, rispettivamente, il numero di sub-canali che si formano in corrispondenza dei canali verticali e orizzontali. Se si esprimono le permeabilità che si hanno in corrispondenza dei sub-canali come:

$$K^v = \frac{(\delta^v)^2}{12(N^v)^2} \quad K^h = \frac{(\delta^h)^2}{12(N^h)^2}$$

Il fattore di microstruttura può essere riscritto come:

$$R = \frac{1}{\left(\frac{K^h \delta^h}{K^v \delta^v} + \frac{a'}{4h'} \right) (N^h)^2}$$

Uno studio parametrico di quest'ultima equazione indica che per avere l'incremento di permeabilità intrinseca osservato sperimentalmente pari a 200 volte, assumendo un numero uguale di sotto canali verticali e orizzontali, la dimensione dei sotto-canali orizzontali deve essere pari a 0.24 μm (per $N=2$), 0.215 μm (per $N=3$) e 0.18 μm (per $N=5$). Si osserva pertanto che, al crescere del numero di sotto-canali, la loro dimensione si riduce sempre più verso il valore sperimentalmente misurato di 0.08 μm .

Si assume adesso, invece, che le particelle migrate vanno ad occludere l'ingresso ai canali (orizzontali o verticali) impedendo la penetrazione del mercurio all'interno di essi. Tali particelle possono essere viste come elementi addizionali connessi in serie con gli altri canali. Inoltre, si assume per semplicità che tali particelle non penetrano all'interno dei pori.

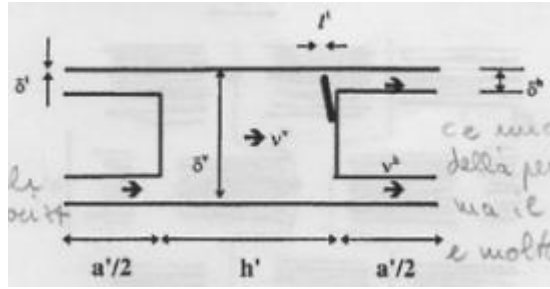


Figura 2-38-Modellazione con migrazione e occlusione dei pori (Hueckel et al., 1997)

Il fattore di microstruttura per un tale modello diventa:

$$R = \frac{1}{\left(\frac{\delta^h}{\delta^v} \right)^3 + \frac{a'}{4h'} + m \left(\frac{\delta^h}{\delta^t} \right)^3 \frac{l^t}{2h'}}$$

in cui δ^t e l^t rappresentano l'apertura e la lunghezza della barriera costituita dalla particella migrata, m dipende dal numero di tali barriere presenti nel sistema e dalla loro posizione. Effettuando un'analisi parametrica con $\delta^t=0.008 \mu\text{m}$, $l^t=0.005 \mu\text{m}$ e $m=1$, il fattore di microstruttura decresce di 2 volte rispetto al caso di assenza di barriere. Questo significa che una barriera di questo tipo causa una importante variazione nella reale distribuzione di pori, ma ha pochissima influenza sulla variazione di permeabilità.

2.8.7. Modello per la variazione di connettività

Si considera, adesso, la variazione fisico-chimica della struttura dei cluster indotta dal permeante. Per tal motivo, si considera in questo caso un modello costituito da domini disposti sia in direzione orizzontale che verticale.

L'influenza di un fluido con bassa costante dielettrica, quale l'etanolo, è quella di ridurre la repulsione tra le piastrine favorendone l'attrazione con conseguente restringimento dei cluster e dei domini. A causa della casuale orientazione delle particelle e delle connessioni tra cluster, all'interno dei domini si destano delle tensioni di trazione dovute ai vincoli che si oppongono a tale restringimento. Ad un certo livello tensionale si viene a formare una frattura interna e due diversi scenari possono essere presi in considerazione:

- Il dominio costituito dai cluster separati, in seguito ad una riduzione delle forze attrattive in corrispondenza delle fratture, si espande a spese dei canali più grandi (Figura 2-39).

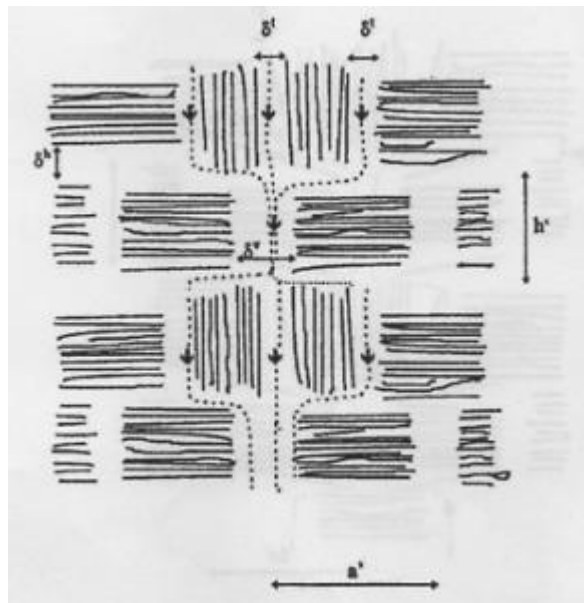


Figura 2-39-Espansione dei cluster a spese dei canali più grandi (Hueckel et al., 1997)

Tale ipotesi è compatibile con l'osservazione per cui i pori più grandi scompaiono dalla PSD. Se si aggiunge che tali fratture si siano originate da un meccanismo simile a quello che ha portato alla formazione dei pori più piccoli, ci si può aspettare una somiglianza anche nella loro grandezza. Così, in uno scenario di questo tipo il PSD diventa mono-modo, con un visibile incremento nel volume totale dei pori più piccoli. In un modello come questo i canali per il flusso possono consistere in una connessione in serie di due o tre pori con dimensione più piccola, oppure in un poro più piccolo collocato tra due domini con tessitura orizzontale connessi ai pori con dimensione maggiore, o ancora qualsiasi altra combinazione delle due.

Considerando $\delta^t = \delta^h$ ed un'altezza della cella elementare pari a $2h'$, il fattore di microstruttura diventa:

$$R = \frac{8(2 + 3N^i)}{14 + 3N^i}$$

in cui N^i corrisponde al numero reale di fratture verticali. Effettuando un'analisi parametrica si osserva che al crescere del numero di fratture, il valore di R subisce una piccola variazione e i valori di δ^t che si ottengono per una permeabilità di 1.1×10^{-15} sono circa 3 fino a 5 volte più grandi di quelli misurati sperimentalmente ($0.08 \mu\text{m}$).

- Si suppone che, al momento della riduzione delle forze attrattive in corrispondenza delle fratture, diverse particelle migrino a causa del gradiente delle pressioni (Figura 2-40).

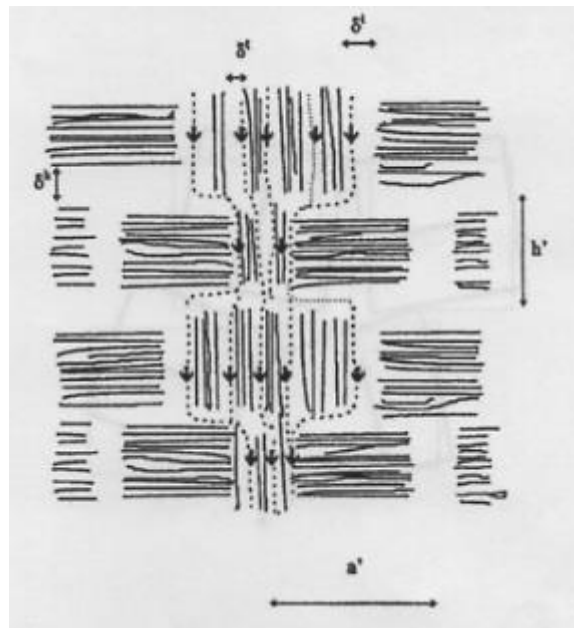


Figura 2-40-Migrazione delle particelle per effetto del gradiente delle pressioni (Hueckel et al., 1997)

Questo potrebbe rendere impossibile l'ingresso del mercurio all'interno dei canali più larghi. Inoltre tale migrazione aprirà nuovi spazi al flusso nei domini orientati verticalmente. Il risultato di tale scenario è che i canali di flusso consistono esclusivamente in pori di piccole dimensioni direttamente connessi in serie. Una possibile realizzazione di tale arrangiamento è un sistema costituito da N^i sub-canali paralleli con larghezza δ^t e lunghezza h' , seguiti da N^j sub-canali simili con la stessa larghezza δ^t e lunghezza funzione dei pori più larghi. Il fattore di microstruttura diventa:

$$R = \frac{2N^i N^j}{N^i + N^j}$$

2.8.8. Modello per la flocculazione

La flocculazione viene considerata come una possibile causa da Fernandez e Quigley. In materiali compattati, a causa dei vincoli cinematici dovuti alla struttura addensata, le particelle e/o i cluster intimamente vicini tendono ad attrarsi. Ciò causa la rotazione e traslazione di tali entità, trasformando i canali rettilinei iniziali in canali convergenti e divergenti (Figura 2-41).

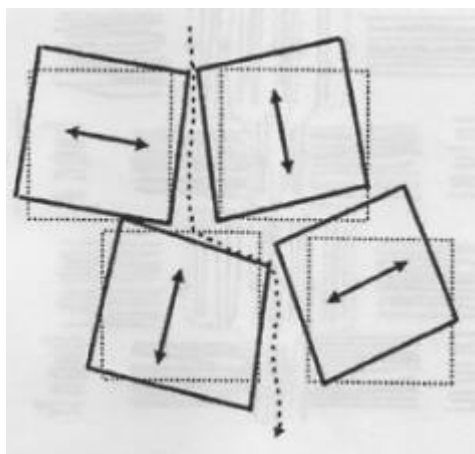


Figura 2-41-Rotazione dei cluster dovuta alle forze attrattive (Hueckel et al., 1997)

Si noti che durante la contaminazione monotona, l'estremità della particella che subisce movimento durante la rotazione è probabilmente quella a monte, dove la concentrazione e le forze attrattive sono più elevate.

Il flusso attraverso canali divergenti o convergenti è noto come flusso di Jeffery-Hamel. Per la risoluzione di un problema di questo tipo, in tale sede, si è usata la soluzione di Denn (1980) per un flusso perfettamente radiale, incompressibile e “strisciante” (Figura 2-42).

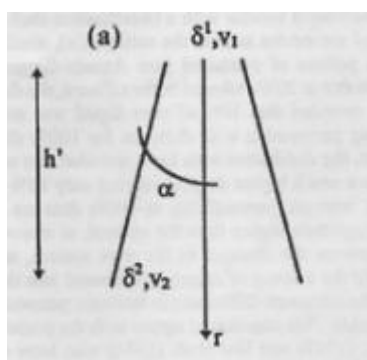


Figura 2-42-Modello di calcolo per la soluzione di Denn (Hueckel et al., 1997)

In contrapposizione al caso dei canali rettilinei, in questo caso la differenza di pressione (Δp) viene sostituita da una richiesta di potenza ΔP , necessaria per forzare il flusso a progredire all'interno di una condotta con sezione variabile. La differenza di richiesta di potenza tra la sezione di ingresso e quella di uscita, considerando una profondità unitaria, è

proporzionale alla differenza dei quadrati delle velocità medie v e ad una richiesta di potenza adimensionale P^* che dipende solo dall'angolo di convergenza α .

$$\Delta P = 4\mu(v_2^2 - v_1^2)P^*$$

$$P^* = \frac{[4\alpha(1 + \cos^2 2\alpha) - 4\sin 2\alpha \cos 2\alpha]\sin^2 2\alpha}{(\sin 2\alpha - 2\alpha \cos 2\alpha)^2}$$

Per ottenere la portata media specifica per la cella elementare, si suppone che la richiesta di potenza per il sistema di canali sia equivalente alla richiesta di potenza della cella elementare. Si assume inoltre che $h'=a'$ e che solo i due canali orizzontali sono soggetti a flocculazione, mentre si trascura la resistenza al flusso offerta dal canale verticale (Figura 2-43).

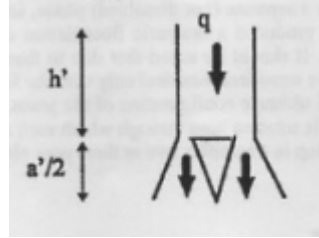


Figura 2-43 Ipotesi di base del modello di Denn (Hueckel et al., 1997)

Definendo la richiesta di potenza della cella elementare come:

$$\Delta P_c = \Delta p q a'$$

con Δp differenza di pressione tra l'entrata e l'uscita della cella elementare, la portata specifica media si può scrivere come:

$$q = \frac{(\delta^2)^2 h'}{2\mu a'} \frac{1}{1 - \left(\frac{\delta^2}{\delta^1}\right)^2} \frac{1}{P^*} \frac{\Delta p}{h'}$$

Assumendo angoli di divergenza piccoli ($\alpha < 18^\circ$), il fattore P^* si può semplificare a:

$$P^* = \frac{3}{4} \frac{a'}{\delta^1 \left(1 - \frac{\delta^2}{\delta^1}\right)}$$

Quindi la permeabilità intrinseca e il corrispondente fattore di microstruttura di un sistema come questo diventano:

$$K^f = \frac{(\delta^2)^3}{12a'} R \quad R = \frac{8}{\left(\frac{\delta^2}{\delta^1}\right) + \left(\frac{\delta^2}{\delta^1}\right)^2}$$

Da tali relazioni si ha che:

- Per canali convergenti ($\delta^1 \gg \delta^2$), il termine lineare al denominatore è dominante su quello al quadrato. Se per esempio δ^1 e δ^2 sono pari, rispettivamente a δ^v e δ^{h0} si ottengono $R=293$ e $K^f=1.23 \times 10^{-15} \text{ m}^2$;
- Per canali divergenti ($\delta^1 \ll \delta^2$), domina il termine al quadrato. In questo caso si ottengono $R=1/116$ e $K^f=0.65 \times 10^{-15} \text{ m}^2$, che è circa la metà di quella ottenuta prima.

In entrambi i casi, però, si può affermare che si ottengono valori di permeabilità molto prossimi a quelli valutati sperimentalmente da Fernandez e Quigley nel caso di permeazione con etanolo ($1.1 \times 10^{-15} \text{ m}^2$). Però, si deve considerare che la porosimetria ad intrusione di mercurio misura solo la dimensione dell'ingresso dei pori non mostra pori o sistemi di pori diversi da quelli corrispondenti all'orifizio di entrata più piccolo di un poro divergente (per esempio $\delta^1 = \delta^{h0}$), mentre l'orifizio più grande del poro non verrà rilevato e quindi segnalato come non esistente.

Vale la pena ricordare che la permeabilità del diossano è di un ordine di grandezza superiore a quella dell'etanolo, con praticamente lo stesso PSD. Tale risultato può essere ottenuto nel modello regolando l'orifizio più grande, che in realtà non è misurato, e mantenendo quello più piccolo uguale al caso di etanolo e acqua.

2.8.9. Conclusioni

Quattro tipi di ipotetici meccanismi fisici di variazione della permeabilità intrinseca suggeriti in passato sono stati esaminati mediante modelli strutturali-numerici. Tali modelli indicano che, per un sistema bimodale di pori in serie, la permeabilità all'acqua risulta essere fortemente influenzata dalla dimensione dei pori più piccoli, considerati come connettori di quelli più grandi.

Per quanto riguarda il modello relativo alla variazione della dimensione dei pori, questo conduce a risultati numerici che non sono compatibili con quelli del porosimetro a mercurio, ed allo stesso modo avviene con i modelli basati sulla migrazione delle particelle e dell'incremento di connettività.

Il modello con cui, numericamente, si ottengono i risultati più consistenti è quello basato sulla rotazione delle particelle dovuta alla flocculazione. Innanzitutto, tale meccanismo è l'unico a cui è associato un incremento di permeabilità senza alcuna variazione nelle letture del porosimetro. Inoltre, questo è un meccanismo comune a tutti i tipi di argilla, a differenza di quelli relativi allo "swelling interlayer" o al fenomeno del restringimento, che sono tipici di un'argilla smectitica. Infine, il meccanismo di flocculazione può comportare incrementi di permeabilità, a causa di permeazione con diossano o acidi acetici, molto più elevati rispetto a quelli relativi all'etanolo, senza alcuna differenza apparente nelle letture del porosimetro a mercurio.

Sicuramente l'incremento di permeabilità è dovuto non solo alla flocculazione, ma alla concomitanza di tanti altri meccanismi. Per effettuare uno studio più completo e soddisfacente bisognerebbe prendere in considerazione meccanismi più complicati, che comporterebbero variazioni nei pori non rintracciabili dal porosimetro a mercurio.

3. Sperimentazione in laboratorio

In questa sezione viene esposta quella che è la prima fase del progetto oggetto di tale elaborato, ovvero la sperimentazione in laboratorio. Sulla scia del lavoro svolto da Fernandez e Quigley, l'obiettivo è quello di, inizialmente, eseguire prove con permeametro per verificare in maniera diretta la variazione di conducibilità idraulica in funzione del liquido usato come permeante. Bisogna specificare che, in questo caso, i materiali sottoposti ad analisi sono diversi da quelli dei due autori sopracitati. In particolar modo, per tale progetto, sono stati considerati come terre caolino e bentonite, e come permeanti acqua distillata e olio di paraffina.

La scelta di usare come liquido non acquoso l'olio di paraffina è dipesa dal fatto che non risulta essere tossico per l'essere umano, cosa che invece contraddistingue liquidi come etanolo o diossano. D'altra parte, però, se fluidi come quelli usati nella sperimentazione da Fernandez e Quigley possiedono una viscosità paragonabile a quella dell'acqua, e quindi l'interpretazione della conducibilità è praticamente immediata, nel caso dell'olio di paraffina, questo ha una viscosità che è cento volte maggiore. Pertanto, nell'interpretazione dei risultati bisognerà tenere conto di tale aspetto.

Successivamente alle prove di permeabilità sono state eseguite prove edometriche, da un lato per ottenere una corrispondenza con i risultati ricavati dal permeametro (mediante una valutazione indiretta della conducibilità idraulica), dall'altro per ottenere informazioni maggiori sulla microstruttura del campione e sulle variazioni che essa subisce in un processo di collasso del doppio strato, che si suppone sia alla base di tali variazioni.

Per la preparazione dei campioni, in realtà, è stato necessario prima di tutto caratterizzare i materiali; in particolar modo, ciò che interessa maggiormente in questa sperimentazione è il valore di limite liquido, in quanto i campioni sono stati preparati con un valore iniziale di contenuto di fluido (acqua distillata o olio di paraffina) pari a circa 1,1 volte il corrispondente valore del limite liquido. Si è a tale scopo seguita la procedura standard mediante l'utilizzo del cucchiaio di Casagrande.

Infine i campioni soggetti a sperimentazione sono stati sottoposti a liofilizzazione e successivamente a misure di porosimetria a mercurio. In questo modo risulta possibile studiare quella che è la microstruttura del materiale e percepire in maniera quasi diretta le variazioni che essa subisce, cause del fenomeno di incremento della conducibilità idraulica a cui si assiste.

In particolar modo, questo capitolo è stato strutturato in maniera tale da descrivere, inizialmente, i materiali, le strumentazioni e le procedure di prova adottate ed infine i risultati ottenuti.

3.1. Metodologia sperimentale

Questa sezione è dedicata ad una breve descrizione delle attrezzature e metodologie di prova adottate durante la sperimentazione nel laboratorio di Geotecnica del Politecnico di Torino. In particolar modo, per studiare il comportamento idro-meccanico delle argille, si è usufruito di prove edometriche e di conducibilità idraulica con permeametro. Successivamente, i campioni soggetti ad analisi, sono stati liofilizzati e in seguito sottoposti a misure di porosimetria mediante intrusione di mercurio, in maniera tale da individuare le possibili variazioni di struttura che possono avvenire nel campione passando da un fluido come l'acqua ad uno "non acquoso" come l'olio di paraffina.

3.1.1. Classificazione delle terre sulla base del limite liquido

Come anticipato nell'introduzione di questo capitolo, la prima fase dell'attività sperimentale è stata quella di caratterizzare i materiali utilizzati (caolino e bentonite) sulla base del valore di limite liquido, in quanto i campioni sottoposti a prova sono stati inizialmente preparati con un contenuto d'acqua corrispondente a 1,1 volte il valore di tale limite.

Prima di mostrare i risultati ottenuti, è bene fare un breve e rapido excursus sul significato di tale limite e sulla strumentazione e procedura seguita per la sua valutazione.

In particolare, per un terreno si possono distinguere quattro possibili stati fisici in funzione della consistenza, in ordine crescente del contenuto di acqua essi sono:

- Solido;
- Semisolido;
- Plastico;
- Liquido.

Il valore limite di acqua che corrisponde ad una transizione da solido a semisolido è detto limite di ritiro, gli altri due valori in ordine sono il limite plastico e il limite liquido. Per valutare ognuno di questi è necessario seguire una determinata procedura standardizzata. In tale sede verrà descritta esclusivamente quella relativa alla determinazione del limite liquido.

In particolar modo, la strumentazione utilizzata è quella del **cucchiaino di Casagrande**, di cui si offre una rappresentazione grafica nell'immagine seguente (Figura 3-1).



Figura 3-1 Cucchiaino di Casagrande

Tale strumento è relativamente semplice, ovvero l'elemento principale è costituito da una sorta di "scodella" montata su di una base. La pastella costituita da materiale solido e acqua, opportunamente miscelati, viene posta su tale scodella e in seguito eseguito un solco con uno strumento standardizzato di forma trapezoidale. Si fa sbattere la scodella contro la base e si conta il numero di colpi necessari affinché il solco si chiuda per una lunghezza di almeno 13mm. Si valuta il peso del campione prima e dopo essere stato essiccato in forno, ricavando in tal modo il contenuto d'acqua corrispondente. Si ottiene così facendo una coppia di valori contenuto d'acqua-numero di colpi. In particolar modo, il limite liquido è definito come quel valore di contenuto d'acqua al quale corrisponde un numero di colpi necessario per la chiusura del solco pari a 25. Quindi, la procedura standard prevede che si preparino diversi provini, almeno tre, in cui varia il contenuto d'acqua e per tutti questi si esegue la prova con il cucchiaino. I risultati devono essere riportati in un grafico semilogaritmico in cui sulle ordinate si pone il contenuto d'acqua mentre sulle ascisse il logaritmo del numero di colpi. Si determina la migliore retta interpolante dei punti ottenuti, quindi, a partire da questa, si ricava il limite liquido entrando nel grafico con un numero di colpi pari a 25 e leggendo sulle ordinate il corrispondente valore di contenuto d'acqua.

3.1.2. Prove di conducibilità idraulica con permeametro

In questa sezione verranno descritti l'attrezzatura e la metodologia di prova per la determinazione della conducibilità idraulica mediante prove con il permeametro.

Il permeametro è un'attrezzatura di laboratorio che consente di eseguire prove per la determinazione *diretta* della conducibilità idraulica su campioni di terra. Con il termine *diretta* si intende che, a differenza di quanto si fa nel caso degli edometri, imponendo un gradiente idraulico costante e attivando pertanto un flusso all'interno del provino, tramite applicazione della legge di Darcy è possibile valutare l'entità della conducibilità idraulica del materiale. Esistono, inoltre, due grandi famiglie di permeametro:

- Permeametro a pareti rigide;
- Permeametro a pareti flessibili.

In tale sede si è usufruito di ambedue le tipologie ed in particolar modo la prima è stata sfruttata per il campione di bentonite permeato con acqua, mentre la seconda per quello permeato con olio. La scelta è dipesa semplicemente dal fatto che, l'olio di paraffina potrebbe danneggiare i circuiti del permeametro e per precauzione si è deciso di sfruttare la strumentazione più obsoleta nel caso di questo fluido. In realtà, è necessario precisare che sicuramente dal punto di vista sperimentale il permeametro a pareti flessibili assicura una validità dei risultati maggiore di quelli che si possono ottenere con quello a pareti rigide. Infatti, durante la prova il campione potrebbe subire un processo di ritiro che potrebbe causare un "gap anulare" con le pareti del permeametro e quindi l'instaurarsi di un flusso preferenziale lungo lo spazio compreso tra il campione e le pareti dello strumento. Nel permeametro a pareti flessibili si ovvia a tale problematica grazie alla membrana elastica attorno alla quale si avvolge il campione durante la prova.

Per quanto riguarda il *permeametro a pareti flessibili*, si possono individuare tre elementi principali (Figura 3-2):

- Cella;
- Volumometri;
- Pannello di controllo delle pressioni.

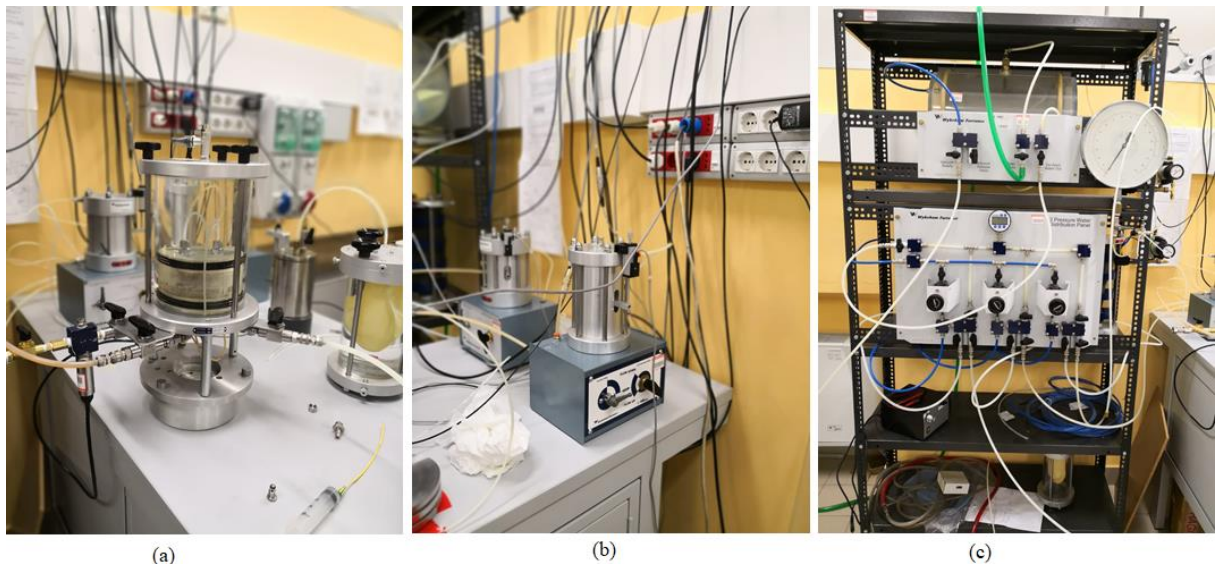


Figura 3-2 Permeametro a pareti flessibili: (a) Cella del permeametro, (b) Volumometri, (c) Pannello di controllo delle pressioni

Il campione, opportunamente compattato alla tensione desiderata, viene posto all'interno della cella avvolto con una membrana elastica impermeabile e fissato tramite o-ring, in maniera tale da essere isolato dal fluido presente in cella con il quale si applica la pressione di confinamento desiderata. Il campione è posto tra due pietre porose così da garantire che il flusso, dal drenaggio che si trova alla base a quello posto in testa, possa avvenire. I drenaggi di cui sopra, sono collegati a due volumometri. Questi non sono altro che strumenti costituiti da una cella interna suddivisa da una membrana intermedia in due sottocelle, saturate con il fluido desiderato, acqua nel caso in esame. Assegnando una pressione al fluido presente in una delle due sottocelle, questo automaticamente manda in pressione quello presente nell'altra che quindi arriva al drenaggio. Considerando due pressioni differenti per i due volumometri, si riesce a creare un gradiente idraulico che consente l'instaurarsi di un flusso all'interno del campione. Ai volumometri sono associati due trasduttori che, opportunamente tarati, consentono di valutare il volume di fluido in entrata e in uscita dal campione. Questo dato è fondamentale per risalire al valore di conducibilità idraulica a partire dalla legge di Darcy.

Infine, il pannello di controllo che permette di gestire le pressioni in gioco e, in tal modo, definire tutte quelle che sono le condizioni al contorno della prova. Il sistema è collegato ad un terminale che consente di monitorare e salvare i dati nel tempo.

Come accennato precedentemente, il campione deve essere opportunamente preparato e compattato prima di eseguire la prova. Per fare questo, si è usufruito del consolidometro (Figura 3-3). Quest'attrezzatura, relativamente semplice, è costituita da una cella di alluminio, entro cui si inserisce la miscela terra-fluido sotto forma di fango, e da un pistone superiore che spinge con una certa pressione su di un piatto per compattare il materiale. Anche in questo caso un pannello di controllo permette di regolare le pressioni di compattazione e un apposito trasduttore di monitorare i cedimenti nel tempo. Dalle curve di consolidazione si può dedurre quando tale processo è terminato e quindi quando il campione è pronto per essere soggetto alla prova di conducibilità con il permeametro.

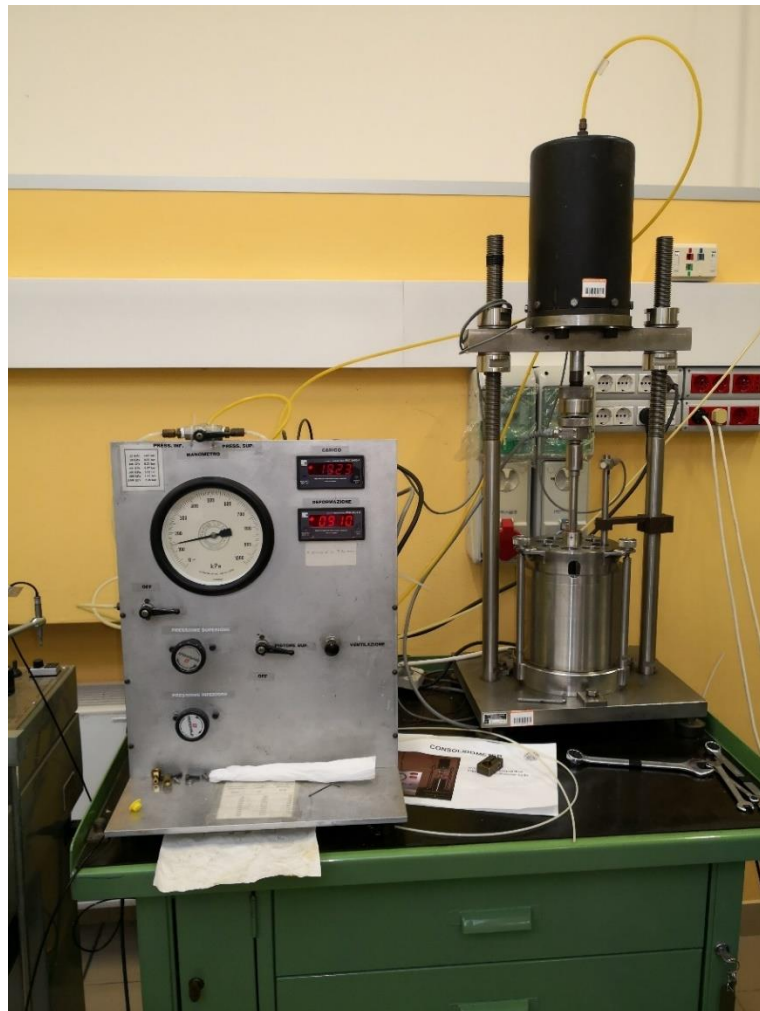


Figura 3-3 Consolidometro del laboratorio di Geotecnica del Politecnico di Torino

Per la determinazione della conducibilità idraulica la base di partenza è la legge di Darcy per il caso di flusso monodimensionale:

$$Q = k \cdot A \cdot i \quad (1.13)$$

In cui:

- Q è la portata di deflusso;
- A l'area della sezione attraversata dal fluido (sezione trasversale del campione);
- k è il coefficiente di conducibilità idraulica.

L'ultimo parametro definito rappresenta l'incognita del problema e può essere ricavato invertendo banalmente l'equazione (1.2):

$$k = \frac{Q}{A \cdot i} \quad (1.14)$$

La portata fluente Q si può ricavare facilmente dalle letture dei volumometri come rapporto tra la differenza di volume di fluido entrante o uscente dalla sezione tra due letture consecutive e la differenza di tempo tra queste:

$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{V_{t2} - V_{t1}}{t_2 - t_1} \quad (1.15)$$

mentre il gradiente idraulico lo si imposta attraverso la differenza di pressione Δu che si assegna tra i due drenaggi attraverso la seguente espressione:

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{\Delta u / \gamma_w}{L} \quad (1.16)$$

Con:

- Δu differenza di pressione tra drenaggio alla base e quello in testa;
- γ_w peso specifico dell'acqua (10 kN/m³);
- L percorso di drenaggio (altezza del campione nel caso in esame).

Ovviamente, nel momento in cui si assegna il carico idraulico il flusso che attraversa il campione non sarà costante e uniforme. In particolar modo, si leggeranno due valori diversi di volume di fluido in entrata ed in uscita. Questo è dovuto al fatto che, avendo due pressioni interstiziali differenti alla base e in testa al campione ma la stessa tensione di confinamento applicata in cella, il campione sarà soggetto ad una tensione efficace disuniforme con andamento lineare. Si instaurerà allora un'ulteriore processo di consolidazione e solo dopo che questo sarà terminato il flusso comincerà ad assestarsi. Il reale valore di conducibilità idraulica si avrà solo nel momento in cui il flusso che si è instaurato risulta essere costante e le portate, in entrata ed uscita, coincidenti. Nel caso in esame sono state valutate due differenti conducibilità, una relativa al volume in entrata e l'altra a quello di uscita. Successivamente se ne è valutata la media e assunto questa come valore assoluto per il materiale.

Per quanto riguarda le fasi della prova, si possono distinguere le seguenti:

1. Preparazione del campione in consolidometro;
2. Saturazione dei circuiti del sistema;
3. Installazione del campione nel permeametro;
4. Verifica della saturazione del campione;
5. Fase di consolidazione;
6. Prova di conducibilità idraulica.

La fase 1 come già accennato si effettua mediante consolidometro, inserendo in questo un fango di materiale e acqua e comprimendolo mediante un sistema a pressa. In questo modo si ottiene un campione ricostituito, consolidato alla pressione desiderata. Nel frattempo, è bene saturare i circuiti del sistema in maniera tale da evitare la presenza di eventuali bolle d'aria che potrebbero influenzare e, pertanto, falsare i risultati finali. Una volta che il campione in consolidometro ha terminato il processo di consolidazione, può essere opportunamente fustellato e installato nel permeametro (Figura 3-4).

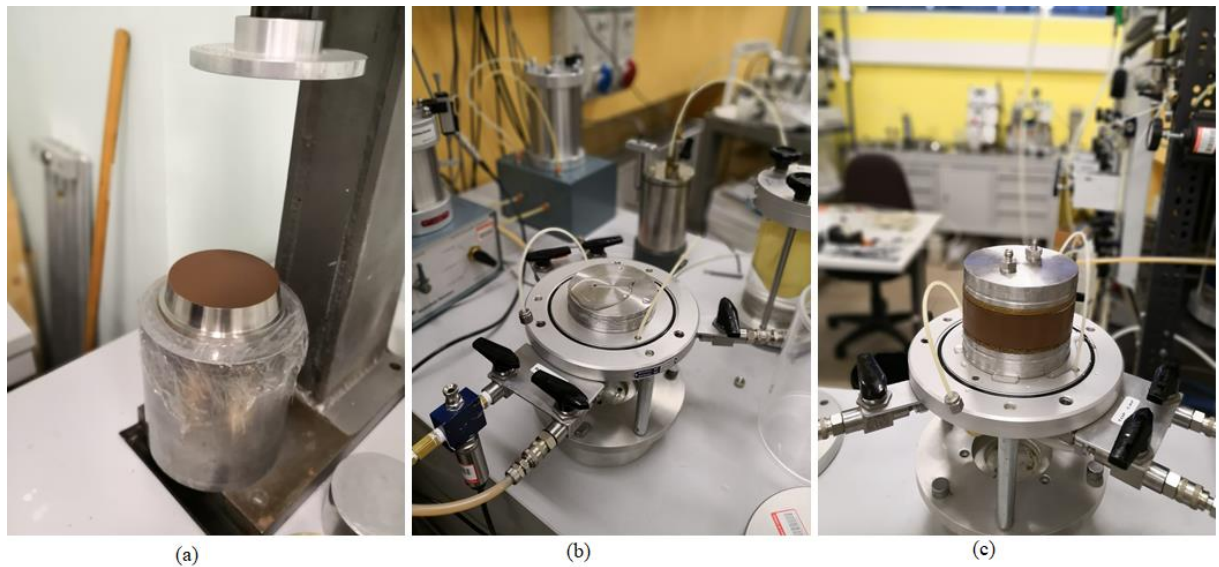


Figura 3-4 Fasi di: (a) Fustellamento campione, (b) Saturazione circuiti del permeametro, (c) Installazione campione sul permeametro

Si assegnano le pressioni di cella e ai drenaggi (uguali in tutte e due i drenaggi in questa fase), ottenendo una pressione efficace, solitamente, di qualche decina di kPa. Si verifica quindi la saturazione del campione attraverso la valutazione del coefficiente di Skempton:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma} \quad (1.17)$$

In cui $\Delta \sigma$ e Δu rappresentano, rispettivamente, l'incremento di pressione di cella e il corrispondente incremento di pressione interstiziale che si ha all'interno del campione a

drenaggi chiusi. Considerando che le analisi effettuate in tale sede fanno riferimento a campioni saturi, a rigore si dovrebbe verificare che il coefficiente di Skempton sia pari ad 1. In pratica, però, la norma consente di considerare valida l'ipotesi di completa saturazione quando questo raggiunge valori non minori di 0,96. Quindi, nella pratica per effettuare tale valutazione si procede andando a chiudere i drenaggi, assegnando un $\Delta\sigma$ in cella e leggendo il corrispondente incremento di pressione interstiziale. Nel caso in cui il valore del coefficiente di Skempton non sia soddisfacente, si incrementa la pressione dei drenaggi in maniera tale da garantire sempre una tensione efficace pari a quella inizialmente impostata. Si attende un certo lasso di tempo, solitamente 24 ore, e si effettua nuovamente la valutazione di B. Così si procede fino alla condizione desiderata.

Una volta raggiunta la condizione di saturazione, inizia la fase di consolidazione. Si impostano le pressioni (cella e drenaggi) in maniera tale che sul campione agisca una pressione efficace complessiva pari a quella relativa alla consolidazione in consolidometro. Si monitorano gli andamenti dei volumi di fluido entranti ed uscenti dal campione. Solo quando questi raggiungono la condizione di stazionarietà (variazione nel tempo pressoché nulla) è possibile avviare la prova di permeabilità vera e propria. Quindi, si mantiene invariata la pressione di cella e si correggono le pressioni dei drenaggi in maniera tale da ottenere il gradiente idraulico desiderato oltre che una pressione efficace media invariata. In particolar modo, la norma prevede diverse tecniche di impostazione delle pressioni di prova. Quella utilizzata in tale sede prevede di incrementare la pressione del drenaggio alla base e ridurre quella del drenaggio in testa. La pressione efficace viene valutata in funzione della pressione interstiziale media che si ha nella sezione di mezzeria del campione, ipotizzando una variazione lineare.

Per quanto riguarda il *permeametro a pareti rigide*, si possono individuare anche in questo caso le tre parti principali viste in precedenza (Figura 3-5):

- Cella;
- Volumometri;
- Pannello di controllo delle pressioni.

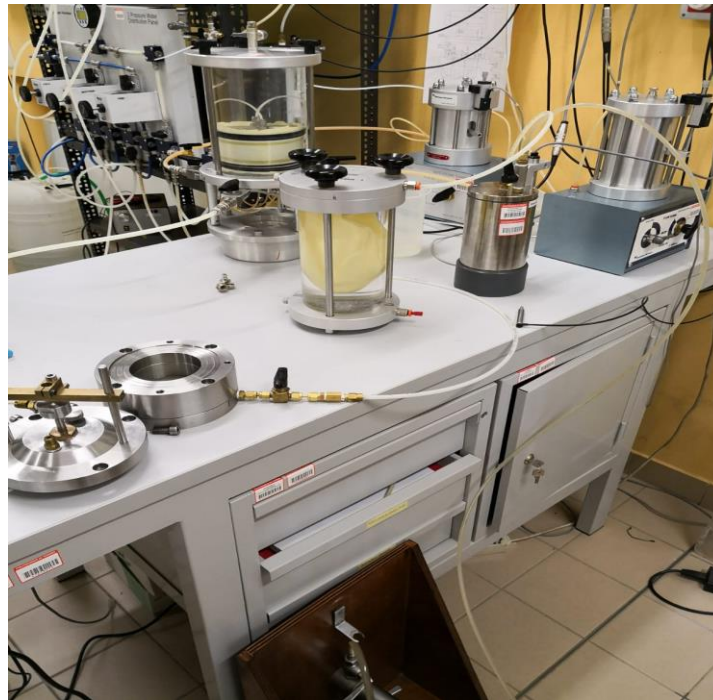


Figura 3-5 Permeametro a pareti rigide

In questo caso la cella è rappresentata da una camera in acciaio, molto simile a quella di un edometro, e la pressione viene impressa attraverso un sistema ad aria compressa interno alla cella costituito da un pistone ed una membrana, che ha la funzione di isolare il campione. A differenza del permeametro descritto in precedenza, in questo caso uno solo dei drenaggi risulta essere connesso ad un volumometro ed in particolare quello alla base. Quello in testa, invece, possiede una valvola che se è aperta consente di impostare una pressione pari a quella atmosferica. In realtà, il drenaggio inferiore non è direttamente connesso al volumometro, ma è stato installato un “polmone” intermedio contenente olio di paraffina. In particolar modo, la pressione interstiziale che si vuole avere la si assegna dal volumometro contenente acqua, questa in pressione arriva all’interno della membrana del polmone che manda in pressione l’olio che viene spinto a sua volta all’interno del campione. Un’altra importante differenza sta nella preparazione del provino, che in questo caso non avviene in consolidometro ma direttamente nella cella del permeametro dove viene inserito

sottoforma di fango. Si effettua una fase di consolidazione in cui il drenaggio superiore rimane chiuso. Terminata tale fase si può effettuare la vera e propria prova di permeazione aprendo il drenaggio superiore. Ovviamente la teoria di base e quindi le relazioni per determinare il valore del coefficiente di permeabilità sono le stesse di quelle considerate per il permeametro a pareti flessibili.

È bene precisare che per la sperimentazione effettuata, i campioni sono stati preparati con lo stesso fluido utilizzato successivamente come permeante.

3.1.3. Prove di compressione Edometrica

L'altra tipologia di prove eseguita in questa sperimentazione è quella delle prove in edometro. A differenza di quanto visto con le prove con permeametro, in questo caso la determinazione del coefficiente di permeabilità avviene in maniera indiretta sulla base della teoria di consolidazione verticale di Terzaghi. L'obiettivo è quello di verificare la corrispondenza tra i risultati ottenuti con un metodo e con l'altro, ma allo stesso tempo studiare la variazione progressiva della microstruttura del campione che si manifesta in maniera macroscopica con il drastico incremento di conducibilità idraulica passando dall'acqua all'olio di paraffina.

La prova di compressione edometrica può essere sfruttata per il conseguimento di molteplici obiettivi. Infatti, essa consente di:

- Determinare la relazione sforzi-deformazioni che caratterizza le proprietà di compressibilità e rigonfiamento per effetto di variazioni di sforzo efficace in condizioni di deformazione trasversale impedita;
- Studiare i fenomeni di consolidazione primaria e secondaria di una terra soggetta ad un determinato stato tensionale;
- Ricostruire la storia tensionale del deposito naturale da cui è stato prelevato il campione soggetto ad analisi.

Per tali ragioni, le prove di compressione edometrica rappresentano una delle prove più utilizzate in ambito geotecnico. La strumentazione è relativamente semplice e si basa su un anello metallico entro cui si inserisce il campione che impedisce le deformazioni laterali durante il processo di applicazione del carico verticale. Al di sopra e al di sotto del campione sono poste due pietre porose che consentono il deflusso del fluido interstiziale. Sul campione è possibile applicare la pressione verticale tramite un sistema a leva. Il sistema anello-campione-pietre porose è sito all'interno della cella edometrica immerso nel fluido di interesse (acqua o olio di paraffina nel caso in esame) per evitare l'essiccamento del campione durante la prova.

Grazie a tale prova si riesce a simulare la consolidazione monodimensionale dato che, essendo il provino confinato lateralmente, le deformazioni ed il flusso del fluido avvengono esclusivamente in direzione verticale.

Si riporta un'immagine della strumentazione presente nel laboratorio di Geotecnica del Politecnico di Torino.



Figura 3-6 Edometro del laboratorio di Geotecnica del Politecnico di Torino

Per quanto riguarda la procedura di prova, la più tradizionale è quella a gradini di carico, realizzata sottoponendo il provino ad incrementi/decrementi di tensione verticale.

Per ogni singolo gradino di carico è possibile monitorare l'andamento dei cedimenti nel tempo grazie ad un apposito trasduttore installato sulla piastra di applicazione del carico, ricostruendo in tal modo la curva di consolidazione.

Ogni singolo gradino di carico va mantenuto costante nel tempo finché non si sviluppa completamente la consolidazione primaria, e vengano così garantiti la dissipazione delle sovrappressioni neutre u ed il trasferimento dell'incremento di tensioni totali in tensioni efficaci. Per le abituali caratteristiche di consolidazione dei terreni naturali fini, allo scopo è in genere sufficiente una durata di 24 h dell'applicazione del carico.

La curva sperimentale cedimenti-tempi è caratterizzata dalla presenza di tre diverse tipologie di cedimento:

- un *cedimento immediato*, w_0 , dovuto a svariate concause sperimentali (deformabilità finita del sistema di applicazione dei carichi, non perfetta saturazione di provino ed elementi drenanti, etc.);
- un *cedimento da consolidazione primaria*, w_c , cioè dovuto al processo idrodinamico, descritto dalla teoria di Terzaghi (1923), in cui inizialmente la variazione di carico viene sostenuta esclusivamente dalla fase fluida con conseguente nascita di sovrappressioni

interstiziali di entità pari a quella del sovraccarico totale applicato. Nel tempo il carico viene progressivamente trasferito alla fase solida e si assiste a un graduale decremento delle sovrappressioni neutre e parallelo incremento delle tensioni efficaci.

- un *cedimento da consolidazione secondaria*, w_s , cioè associato a deformazioni di volume, solitamente di natura viscosa.

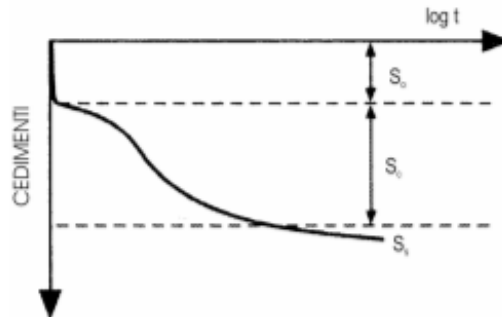


Figura 3-7 Tipica curva cedimenti-tempo per il generico gradino di carico

Poiché la curva di consolidazione sperimentale è caratterizzata dalla coesistenza di questi tre fenomeni deformativi, per dedurre il ‘coefficiente di consolidazione verticale’ c_v (che caratterizza il decorso della consolidazione primaria), è necessario anzitutto “depurarla” dell’assestamento iniziale, w_0 , e poi dell’aliquota di cedimento variabile nel tempo dovuta agli “effetti secondari”.

Questi si manifestano quando le sovrappressioni interstiziali si annullano del tutto, conferendo alla curva di consolidazione sperimentale la classica ‘coda’ con un asintoto obliquo.

La più diffusa procedura di interpretazione della curva cedimenti-tempi si deve a Casagrande ed è riassunta in Figura 3-8a. Da questo metodo è possibile dedurre, oltre il coefficiente c_v , anche l’aliquota w_c del cedimento totale dovuta al solo fenomeno di consolidazione; in alternativa è possibile applicare anche la procedura suggerita da Taylor, riassunta in Figura 3-8b.

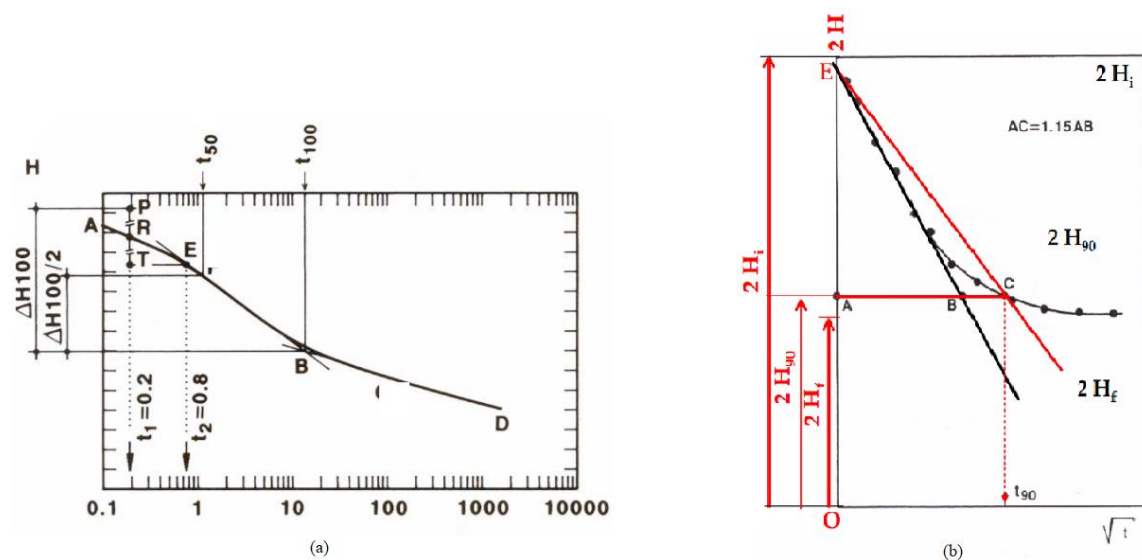


Figura 3-8 Metodi per l'interpretazione delle curve di consolidazione: (a) Casagrande e (b) Taylor

Applicando una o l'altra procedura è possibile, pertanto, determinare il coefficiente di consolidazione verticale e ricavare a ritroso il valore di coefficiente di permeabilità del provino per il corrispondente gradino di carico considerato (procedura indiretta), secondo la relazione:

$$k = \frac{c_v \cdot \gamma_w}{E_{ed}} \quad (1.18)$$

In cui:

- c_v rappresenta il coefficiente di consolidazione verticale;
- γ_w è il peso specifico dell'acqua (o del fluido alternativo utilizzato durante la prova);
- E_{ed} è invece il modulo di rigidezza edometrico.

In particolar modo, il coefficiente di consolidazione verticale può essere ricavato a partire dall'espressione dedotta dalla teoria di consolidazione monodimensionale di Terzaghi:

$$c_v = \frac{T_{50} \cdot H^2}{t_{50}} \quad (1.19)$$

In cui:

- T_{50} è il tempo adimensionalizzato necessario per il verificarsi di un cedimento pari al 50% di quello totale di consolidazione;
- t_{50} è il tempo effettivo a cui corrisponde un cedimento di consolidazione pari al 50% di quello totale;
- H è invece il percorso di drenaggio più lungo che possono compiere le particelle (in un provino edometrico corrisponde a metà altezza del campione in quanto l'acqua può drenare sia in corrispondenza della sezione superiore che di quella inferiore).

Il T_{50} si ricava facilmente dalle tabelle dei cedimenti adimensionalizzati.

Tabella 1 Valori dei tempi adimensionalizzati in funzione dei cedimenti normalizzati

U_m	10	20	30	40	50	70	90	95
T_v	0.0077	0.0314	0.0707	0.126	0.196	0.403	0.848	1.129

Monitorando i cedimenti verticali nel tempo è inoltre possibile valutare le deformazioni assiali (coincidenti con quelle volumetriche in assenza di deformazione laterale) e la variazione dell'indice dei vuoti per ogni singolo gradino di carico, secondo la:

$$\varepsilon_z = -\frac{\Delta H}{H_0} = -\frac{\Delta V}{V_0} = -\frac{\Delta e}{1+e_0} \quad (1.20)$$

Infatti, usualmente i risultati di una prova edometrica sono mostrati in un piano semilogaritmico con indice dei vuoti sull'asse delle ordinate e logaritmo delle tensioni sulle ascisse.

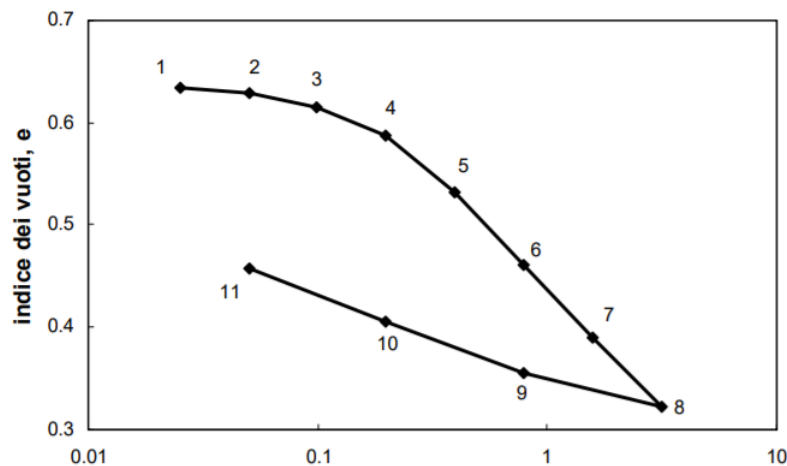


Figura 3-9 Curva edometrica nel piano $e-\log(\sigma'_v)$

In funzione di tali curve è possibile determinare diversi parametri quali:

- tensione di preconsolidazione σ_p ;
- indici di ricomprensione C_r , compressione C_c e rigonfiamento C_s .

In tale sede non ci si sofferma più di tanto sulla descrizione della definizione di tali indici perché non utili allo scopo di tale ricerca.

Di maggiore interesse è invece la valutazione del modulo di rigidità edometrico che, come si è visto in precedenza, entra in gioco nella valutazione della conducibilità idraulica tramite procedura indiretta e che può essere valutato tramite la seguente:

$$E_{ed} = \frac{\Delta \sigma'_v}{\Delta \varepsilon_z} \quad (1.21)$$

3.1.4. *Analisi della microstruttura attraverso prove ad intrusione di mercurio su campioni liofilizzati*

Per studiare le variazioni di microstruttura che i campioni subiscono nel momento in cui si sostituisce l'olio di paraffina all'acqua distillata come fluido permeante, si è sfruttata la tecnica della porosimetria a mercurio (MIP) che consente di determinare la distribuzione della dimensione dei pori del campione analizzato. I campioni, prima di essere sottoposti a tale tecnica, sono stati preventivamente liofilizzati in maniera tale eliminare il fluido interstiziale e consentire al mercurio l'intrusione all'interno dei pori del campione. Si offre una breve descrizione delle due tecniche nelle sezioni che seguono.

3.1.4.1. *Porosimetria ad intrusione di mercurio*

La porosimetria ad intrusione di mercurio (MIP) è una delle tecniche maggiormente usate per l'analisi della distribuzione della dimensione dei pori (PSD) di geomateriali con porosità interconnessa. Con tale tecnica, una pressione assoluta p viene applicata ad un liquido non bagnante (mercurio), in maniera tale che questo riesca ad entrare all'interno dei pori (vuoti dopo essere stati sottoposti a liofilizzazione). L'equazione di Washburn può essere adottata per ricavare la relazione tra la pressione applicata e la dimensione caratteristica dei pori intrusi. Per pori ideali di forma cilindrica o per struttura a "plates" paralleli, l'equazione si può scrivere nella forma:

$$p = - \frac{n \cdot \sigma_{Hg} \cdot \cos \vartheta_{nw}}{x} \quad (1.22)$$

In cui:

- σ_{Hg} è la tensione superficiale di mercurio (0.484 N/m a 25°);
- ϑ_{nw} è l'angolo di contatto tra il mercurio e la superficie delle particelle;
- x è la dimensione del diametro del poro in entrata o uscita ($n=4$) o l'entità della distanza dei "plates" ($n=2$).

Solitamente si considera il modello con pori cilindrici e si adotta $n=4$, mentre per l'angolo di contatto si adottano valori compresi tra 139° e 147° per minerali argillosi.

Le maggiori limitazioni del MIP sono:

- a) pori completamente isolati a causa delle particelle solide circostanti non possono essere misurati;
- b) i pori che sono accessibili solo attraverso pori di dimensione minore non vengono rilevati fin quando questi non sono stati intrusi;
- c) pori con dimensione inferiore ai 7nm sono molto difficili da rilevare con tale tecnica;

- d) allo stesso tempo, la minima pressione applicabile nella pratica limita la dimensione massima dei pori rintracciabile a 400 μm .

Detto ciò, la distribuzione della dimensione dei pori può essere dedotta mettendo in relazione il volume di pori intrusi alla pressione richiesta per l'intrusione. I risultati della tecnica MIP sono solitamente riportati sotto forma di una funzione di densità della dimensione dei pori che permette di individuare i *modi* di pori dominanti.

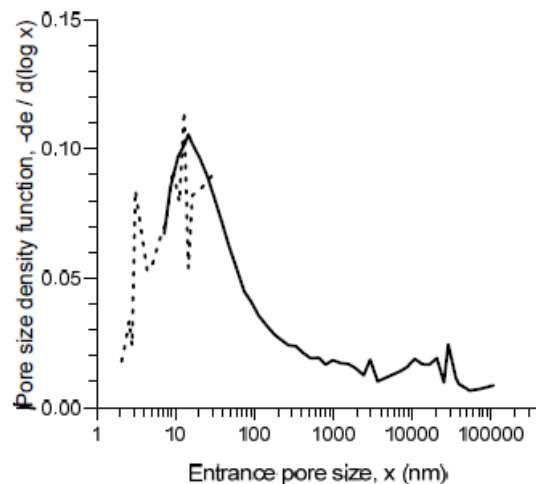


Figura 3-10 Esempio curva di densità della distribuzione dei pori ottenibile con MIP (Musso, Romero, & Jommi, 2012)

3.1.4.2. Liofilizzazione

Come detto anche in precedenza, però, è necessario depurare il campione su cui si intende applicare la porosimetria ad intrusione di mercurio dal fluido interstiziale presente al suo interno. Ciò è necessario per garantire l'intrusione di mercurio all'interno dei pori. Un aspetto importante, però, è che nell'operazione di estrazione del fluido dal campione, la sua microstruttura non deve subire alterazioni, che potrebbero condurre a valutazioni falsate e, pertanto, errate.

Per tal motivo, tra le tante tecniche possibili, quella che è stata presa in considerazione in tale caso è la liofilizzazione. Si tratta di un metodo di essiccamento (estrazione di un liquido da un solido) sotto vuoto di un materiale preventivamente congelato, mediante il processo di sublimazione (passaggio diretto dallo stadio solido a quello di vapore). Lo strumento entro cui avviene il processo prende il nome di liostato (o liofilizzatore). Esso è composto da una camera di essiccamento con piastre che possono essere riscaldate o raffreddate. Inizialmente le piastre possiedono una temperatura di -40°C . la camera è connessa ad una pompa da vuoto ad alta efficienza, tramite un condensatore settato ad una temperatura inferiore a quella del materiale congelato di $10-20^{\circ}\text{C}$, in maniera tale da rimuovere l'umidità

rilasciata dal prodotto congelato. Dopo la fase di sublimazione, si mantiene il vuoto e si portano le piastre da -40°C a $+40^{\circ}\text{C}$ per l'essiccamento secondario.

Si riportano le fasi principali del processo:

- *Fase di congelamento*

Prima di tutto è necessario portare il fluido interstiziale allo stato solido e questo deve avvenire il più rapidamente possibile. Per tal motivo solitamente viene sfruttato l'azoto liquido (N_2 , -196°C). Questa è una fase molto delicata del processo in quanto, se il congelamento avvenisse lentamente, si potrebbero formare cristalli di ghiaccio che modificare la struttura interna del campione. Inoltre, il congelamento immediato garantisce la conservazione della stessa, limitando al minimo la fonte di errore quando si esegue l'analisi di distribuzione dei pori con MIP.

- *Fase di essiccamento primario*

All'interno del liostato, dopo il congelamento, la temperatura è attorno ai -40°C . Si abbassa la pressione al di sotto del punto triplo e si aumenta la temperatura in maniera tale da ottenere la sublimazione del liquido congelato.

- *Fase di essiccamento secondario*

Anche dopo la sublimazione, all'interno del campione permane un quantitativo di acqua residuo pari a circa il 20%. Per ottenere la rimozione anche di questa frazione è necessario portare le piastre ad una temperatura di 40°C .



Figura 3-11 Liofilizzatore del Dipartimento di Scienza Applicata e Tecnologia del Politecnico di Torino

4. Comportamento idromeccanico delle argille: risultati sperimentali a scala macroscopica

Questa sezione è dedicata all'esposizione e confronto dei risultati ottenuti con le diverse strumentazioni e metodologie di prova. In particolar modo, si è deciso di esporre inizialmente tutti i risultati ottenuti nei vari test e successivamente dedicare ampio spazio ai confronti al fine di ricavare analogie e/o eventuali diversità. Verranno dapprima mostrati i risultati relativi alla caratterizzazione geotecnica di base dei materiali sfruttati nella sperimentazione e successivamente quelli di conducibilità idraulica valutati attraverso procedura diretta con permeametro e indiretta tramite edometro.

4.1. Caratterizzazione Geotecnica di base

In questo capitolo viene effettuata una rapida descrizione delle caratteristiche dei materiali che sono stati utilizzati. In particolare, come già accennato precedentemente, i materiali considerati nella sperimentazione oggetto di tale elaborato sono:

Per quanto riguarda i materiali solidi:

- Bentonite
- Caolino

Mentre, per i fluidi:

- Acqua distillata
- Olio di paraffina

Bentonite e caolino appartengono entrambe alla famiglia dei materiali argillosi, ma per la differente natura mineralogica, essi mostrano comportamenti totalmente differenti nell'interazione con il fluido interstiziale.

Il **caolino** è una roccia elastica o detritica coerente costituita prevalentemente da caolinite, un minerale silicatico delle argille. Il caolino ha un aspetto terroso e piuttosto tenero ed è prodotto dall'azione dell'acqua meteorica sul feldspato. È solitamente bianco o grigiastro, anche se talvolta assume colorazioni arancio o rossicce per la presenza di ossidi di ferro.

La **bentonite** è un fillosilicato, un minerale argilloso composto per lo più da montmorillonite, calcio o sodio. Si trova in terreni vulcanici come prodotto di decomposizione della cenere vulcanica. I principali depositi sono situati nel Nord America, in particolare nel Montana, vicino Fort Benton, località da cui deriva il nome di tale sostanza.

I due materiali differiscono notevolmente in termini di superficie specifica, con quella della bentonite che risulta essere circa 20 volte quella del caolino (circa 1000 m²/g quella della bentonite, 60 m²/g quella del caolino). Per tale motivo, ci si aspetta un'interazione con i fluidi con cui interagiscono diseguale, frutto di un'attività chimica superficiale totalmente diversa.

Per quanto riguarda i due fluidi, invece, si ha che:

l'**acqua distillata**, liquido di riferimento nella sperimentazione, possiede una costante dielettrica pari a 80, densità 1 g/cm³, viscosità 1 cP (centi Poise).

La **paraffina liquida** (o **olio di paraffina**), invece, è contraddistinta da una costante dielettrica pari a circa 2, densità 0,8 g/cm³, viscosità circa 100 cP.

A partire dai valori delle costanti dielettriche, ci si aspetta di ottenere nei valori di conducibilità idraulica una netta differenza. Entrando in gioco nel doppio strato, infatti, l'olio di paraffina dovrebbe causarne il collasso con conseguente variazione della microstruttura del campione. Il problema, come già accennato in precedenza, risiede nel fatto che la paraffina liquida possiede una viscosità cento volte maggiore di quella dell'acqua. Pertanto, bisognerà tenerne conto nel momento in cui si effettueranno le opportune considerazioni in sede di valutazione dei risultati.

4.1.1. Limiti liquidi e plastici dei materiali sottoposti a sperimentazione

Per quanto riguarda i materiali sottoposti a sperimentazione, i limiti sono stati valutati sia nei confronti dell'acqua che dell'olio di paraffina, ottenendo i valori riportati in Tabella 2.

Tabella 2 Limite Liquido per i materiali indagati

W _L [%]	CAOLINO	BENTONITE	BENTONITE_ADS
ACQUA	52	556	556
OLIO	79	27	33

L'ultima colonna (BENTONITE_ADS) è relativa alla bentonite per la quale è stata eliminata, prima di eseguire la classificazione, l'acqua adsorbita presente all'interno del materiale alle condizioni di temperatura e umidità del laboratorio di geotecnica del Politecnico di Torino. In particolare, si è notato che in suddette condizioni la bentonite possiede un contenuto d'acqua igroscopico pari a circa il 13%. Per eliminare tale contenuto d'acqua si è sottoposto il materiale ad un ciclo di forno per 48 ore alla temperatura di 60°. Il caolino invece possiede un contenuto d'acqua igroscopico nettamente trascurabile.

Tornando ai risultati ottenuti, si notano immediatamente diversi aspetti cruciali:

- La bentonite possiede un limite liquido nei confronti dell'acqua molto più alto rispetto al caolino. Questo sicuramente è strettamente correlato all'entità di superficie specifica che contraddistingue i due materiali. La bentonite è caratterizzata da un'attività superficiale molto più intensa rispetto a quella del caolino. È necessario un contenuto d'acqua nettamente maggiore per assistere al passaggio di stato plastico-liquido.
- Se si osservano i valori di limite relativi all'olio, invece, il comportamento risulta essere totalmente opposto. Infatti, in questo caso il limite del caolino cresce, quello della bentonite si abbatte notevolmente.
- La bentonite senza acqua igroscopica ha un limite nei confronti dell'olio leggermente maggiore di quella in cui tale contenuto d'acqua non è stato eliminato. Si può desumere che, in questo caso, l'incremento del valore del limite liquido sia da imputare alla maggiore disponibilità di superficie disponibile per l'interazione con il fluido.
- Altra osservazione importante da fare è quella sulle modalità di esecuzione delle prove. Infatti, nel caso dei limiti valutati con l'acqua i materiali sono stati imbibiti inizialmente con un determinato contenuto d'acqua ed eseguita una prima valutazione del numero di colpi, quindi essiccati in forno a 100° e valutato il contenuto d'acqua corrispondente. Aggiungendo piccole quantità d'acqua e ripetendo le operazioni sopracitate si è ottenuta

la retta interpolante per la definizione del limite liquido. Con l'olio di paraffina, invece, tutto ciò non è stato possibile in quanto questo è contraddistinto da una elevatissima tensione di vapore e, pertanto, anche se i provini vengono posizionati in forno questo non riesce a evaporare. Si è deciso pertanto di preparare diverse pastelle con contenuto d'olio in percentuale noto a priori ed eseguire quindi la caratterizzazione su provini di cui si conosceva già il contenuto d'olio presente all'interno.

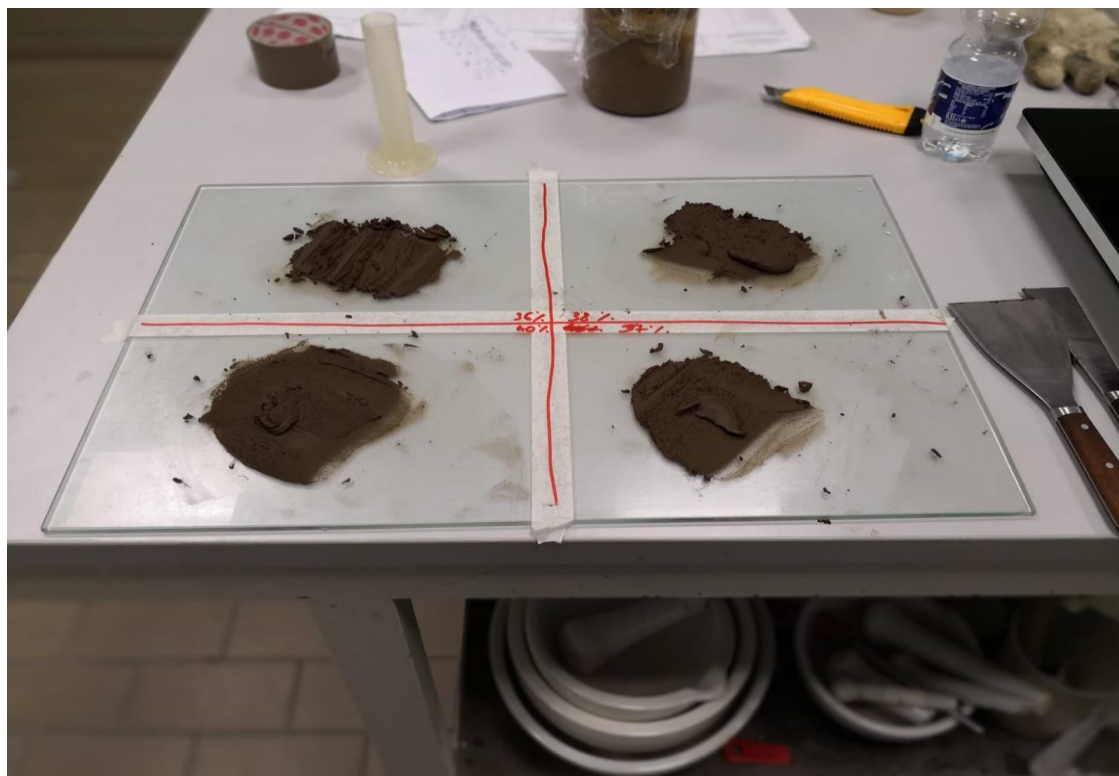


Figura 4-1 Preparazione miscele Bentonite e Olio per il cucchiaino di Casagrande

Inoltre, la normativa prevede che, per effettuare una caratterizzazione idonea, dovrebbero essere considerati almeno due punti relativi ad un numero di colpi superiore a 25 e due relativi ad un numero di colpi inferiore. Con l'olio, causa la consistenza della pastella ottenuta, non è stato possibile garantire ciò.

Infatti, come si può intuire dalla Figura 4-2, mentre la miscela acqua-bentonite assume una consistenza gelatinosa, nel caso dell'olio questa è molto più granulosa. Anche questo fenomeno macroscopico visibile ad occhio nudo può essere ricollegato al fatto che, sicuramente, la differenza di costante dielettrica dei due fluidi comporta una microstruttura totalmente diversa per le due miscele con, una fase solida costituita da

particelle dispersa uniformemente all'interno di quella liquida nel caso dell'acqua, mentre macroparticelle flocculate con dispersione eterogenea nel caso dell'olio.

Inoltre, considerando che caolino e bentonite hanno un limite plastico W_p ed un contenuto di argilla in percentuale CF pari a, rispettivamente, $W_p = 32.1\%$ e $CF = 78\%$, e $W_p = 61.3\%$ e $CF \cong 100\%$, questi possiedono un indice di attività pari a, rispettivamente, $I_a = 0.26$ e $I_a = 4.95$. Per quanto detto al paragrafo 1.1 i due terreni possono essere identificati come *inattivo* (caolino) e *attivo* (bentonite).

Pertanto, le diversità di consistenza, di cui prima, sono strettamente legate a questo aspetto.

Inoltre, per lo stesso motivo, dai risultati delle prove di laboratorio, ci si aspetta di vedere un diverso comportamento idromeccanico.



Figura 4-2 Differenti consistenze tra le miscele Bentonite-Acqua (sinistra) e Bentonite-Olio (destra)

4.2. Risultati prove di conducibilità idraulica: Bentonite e Acqua distillata con permeametro a pareti flessibili.

Con questa strumentazione si è valutata la conducibilità idraulica relativa all'acqua distillata della bentonite. Prima di tutto il campione è stato preparato in consolidometro. All'interno di questo si è inserita una miscela di bentonite e acqua sotto forma di fango, con un contenuto di fluido pari a 1,1 volte il limite liquido relativo.

Si è deciso di assumere come tensione di consolidazione 400 kPa che ha condotto ad un indice dei vuoti finale pari a $e=4,5$. Il campione, una volta fustellato e installato nella strumentazione di prova, è stato sottoposto al controllo della saturazione tramite la valutazione del coefficiente B di Skempton. Alla fine di tale fase le condizioni di prova sono state impostate sui seguenti valori:

- Tensione applicata in cella $\sigma_{cella} = 620 \text{ kPa}$
- Pressioni applicate ai drenaggi $u_{inf} = u_{sup} = 220 \text{ kPa}$
- Tensione efficace agente sul campione $\sigma' = 400 \text{ kPa}$

In tali condizioni avviene la fase di consolidazione che viene monitorata in funzione dei volumi uscenti dai due volumetri. Si può considerare terminata quando la variazione nel tempo della somma dei volumi d'acqua registrati nei due volumetri risulta essere trascurabile. Nel caso in esame si è ottenuto il seguente andamento (Figura 4-3):

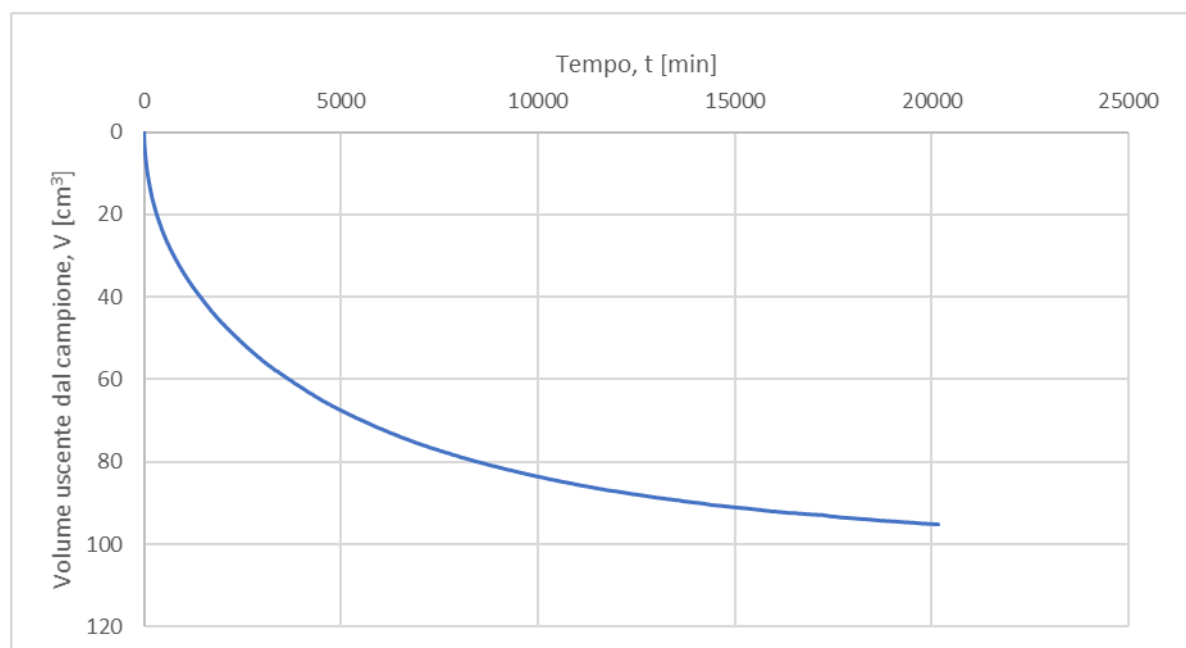


Figura 4-3 Volume d'acqua totale uscente dal campione durante la fase di consolidazione

Raggiunto praticamente l'asintoto orizzontale, si può considerare terminato il processo di consolidazione e passare alla fase successiva, ovvero quella vera e propria di conducibilità. Prima di passare a tale fase, però, è necessario aggiornare l'entità dell'indice dei vuoti del campione in funzione del volume totale d'acqua fuoriuscito dal campione. Infatti, essendo il campione saturo, questa può essere direttamente correlata alla variazione di porosità e quindi alla variazione di indice dei vuoti.

In particolar modo, considerando che il volume totale d'acqua fuoriuscito nella fase di consolidazione è pari circa $95,3 \text{ cm}^3$, si ha una variazione di porosità pari a circa 0,39 e quindi una variazione di indice dei vuoti corrispondente pari a 0,64. In definitiva, l'indice dei vuoti del campione all'inizio della fase di permeazione è pari a:

$$e = 3,86$$

A questo punto è necessario generare un gradiente idraulico. Per fare ciò è necessario avere una differenza di pressione interstiziale tra il drenaggio inferiore e quello superiore. In particolar modo, volendo mantenere una tensione media efficace sul campione pari a 400 kPa, si è deciso di aumentare la pressione del drenaggio inferiore di 150 kPa e ridurre quella del drenaggio superiore della stessa quantità. La prova di conducibilità avviene pertanto nelle seguenti condizioni:

- Tensione applicata in cella $\sigma_{cella} = 620 \text{ kPa}$
- Pressioni applicate al drenaggio inferiore $u_{inf} = 370 \text{ kPa}$
- Pressioni applicate al drenaggio superiore $u_{sup} = 70 \text{ kPa}$
- Gradiente idraulico imposto $i=1000$
- Tensione efficace media agente sul campione $\sigma' = 400 \text{ kPa}$

Il $\Delta u=300 \text{ kPa}$ corrisponde, data un'altezza del campione pari a 3 cm, ad un gradiente idraulico di 1000. Questo è un valore molto elevato, distante da quelli che ci si potrebbe aspettare nelle reali condizioni in sito, ma è necessario per ridurre sensibilmente i tempi di prova. Infatti, nonostante questo potrebbe provocare fenomeni di consolidazione durante la prova e incrementare la conducibilità idraulica, si è visto sperimentalmente che in realtà l'influenza del gradiente idraulico in una prova del genere è molto limitata. Pertanto, la scelta effettuata può essere ritenuta accettabile per gli obiettivi di tale progetto.

Ovviamente, nel momento in cui si imposta il gradiente e si instaura il flusso, inizialmente questo non sarà costante perché il sistema deve prima assestarsi. Si potranno leggere due diversi valori di conducibilità a partire dai volumi entranti ed uscenti dai volumetri. Se inizialmente questi risultano essere discordanti, nel tempo pian piano tenderanno a

convergere fino a quando sarà possibile determinare un valore assoluto di conducibilità del campione tramite l'applicazione della (1.14).

In Figura 4-4 i risultati ottenuti per la bentonite permeata con acqua distillata.

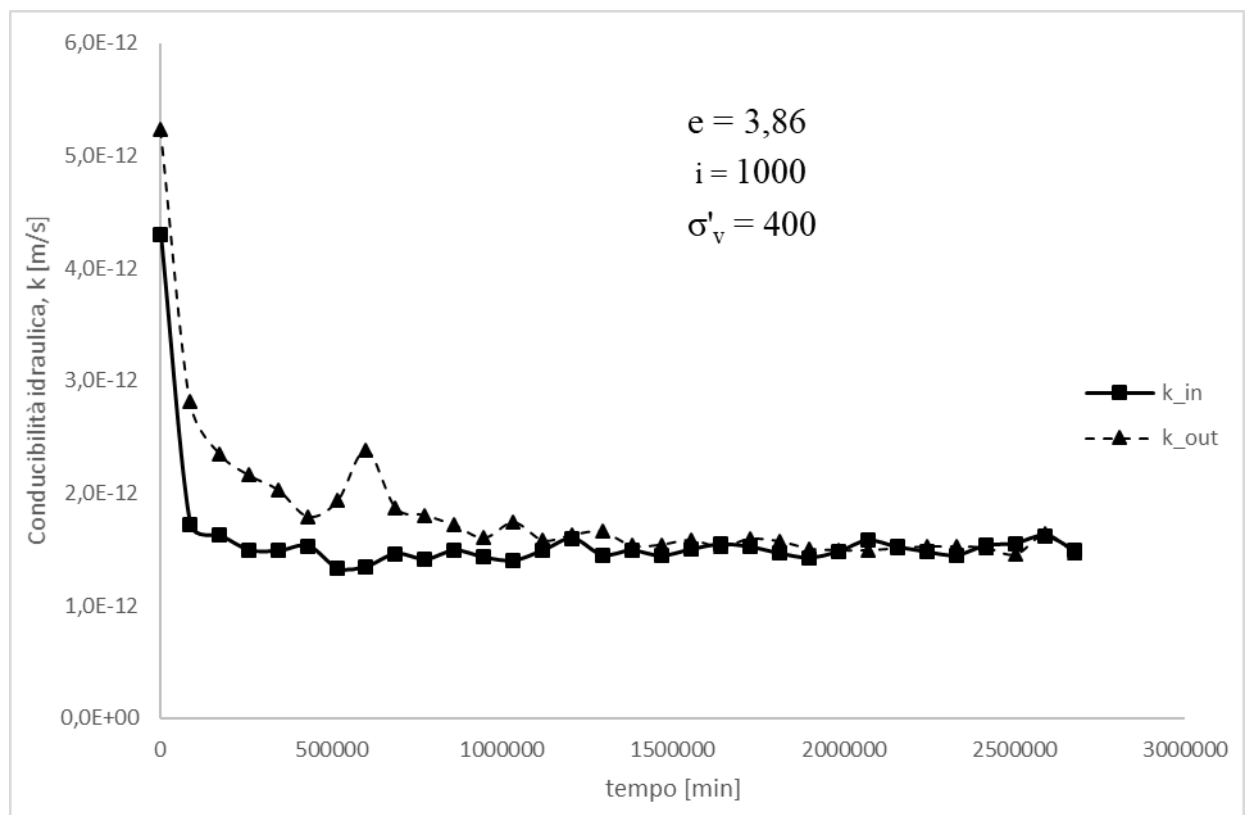


Figura 4-4 Conducibilità idraulica del campione di bentonite permeato con acqua

Come si nota dall'immagine il valore di conducibilità idraulica del campione di bentonite permeato con acqua, che assumiamo come riferimento, si assesta intorno a:

$$k = 1,5 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$$

4.3. Risultati prove di conducibilità idraulica: Bentonite e olio di paraffina con permeametro a pareti rigide.

In questo caso il campione costituito da bentonite e olio di paraffina è stato inserito direttamente nella cella del permeametro sotto forma di fango, con un contenuto di fluido pari a 1,1 volte il limite liquido determinato in precedenza. È susseguita una fase di consolidazione (drenaggio superiore chiuso) suddivisa in due step:

1) $\sigma_v = 50 \text{ kPa}, u_{inf} = 25 \text{ kPa}, \sigma' = 25 \text{ kPa}$

2) $\sigma_v = 200 \text{ kPa}, u_{inf} = 100 \text{ kPa}, \sigma' = 100 \text{ kPa}$

In particolar modo, σ_v è la tensione verticale totale applicata, u_{inf} è la pressione interstiziale applicata al drenaggio inferiore e σ' tensione efficace agente sul campione.

Monitorando l'andamento dei cedimenti nel tempo è stato possibile determinare l'istante di fine consolidazione e quindi quello di inizio permeazione (drenaggio superiore aperto). Per tale fase sono state considerate le seguenti condizioni al contorno:

$$\sigma_v = 450 \text{ kPa}, u_{inf} = 100 \text{ kPa}, u_{sup} = 0 \text{ kPa}, \sigma' = 400 \text{ kPa}$$

Essendo a contatto con l'atmosfera, nel momento in cui il drenaggio superiore è aperto a questo corrisponde una pressione nulla. Quindi si crea una differenza di pressione tra i due drenaggi pari a $\Delta u = 100 \text{ kPa}$ cui corrisponde, data un'altezza del campione di circa 12 mm, un gradiente idraulico pari a $i=1000$. Inoltre supponendo una distribuzione lineare delle pressioni interstiziali all'interno del campione, si è supposto una pressione interstiziale media in corrispondenza della mezzeria del campione pari a $u_{media} = 50 \text{ kPa}$, da cui deriva successivamente il valore di pressione efficace agente sul campione.

Applicando tale gradiente, si è instaurato un flusso all'interno del campione. Monitorando i volumi entranti ed uscenti nel tempo e, tramite applicazione della (1.14) è stato possibile risalire al seguente andamento della conducibilità idraulica nel tempo (Figura 4-5):

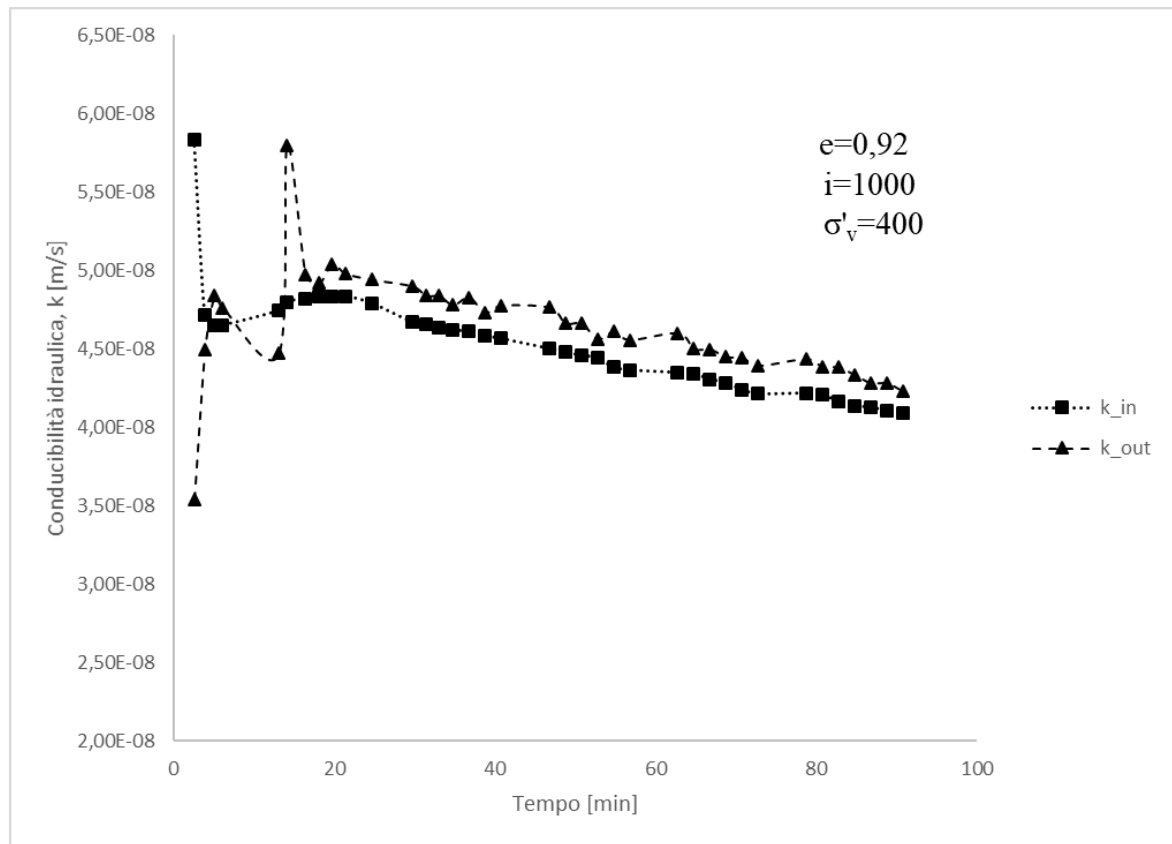


Figura 4-5 Andamento della conducibilità idraulica della miscela bentonite e olio di paraffina

La conducibilità idraulica si assesta intorno ad un valore pari a:

$$k = 4 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$$

In realtà bisogna dire che il processo non si è stabilizzato del tutto (le curve non hanno ancora raggiunto il plateau orizzontale), ma per esigenze tecniche di laboratorio non è stato possibile proseguire la prova. Infatti il polmone contenente olio di paraffina, aveva raggiunto la sua massima estensione e continuare la prova avrebbe significato danneggiarlo. Ci si è dovuti “accontentare” quindi di questi risultati, sperando nella conferma della loro significatività a partire dalle prove edometriche discusse nel seguito.

4.4. Risultati prove edometriche

Per le prove edometriche sono state considerate due differenti modalità di preparazione dei campioni. In particolar modo, la prima tranche di prove è stata eseguita considerando provini ricostituiti, ovvero miscelati con lo stesso fluido usato come permeante e quindi inseriti nella cella edometrica sotto forma di *slurry* (fango).

L'altra tipologia è quella dei campioni compattati a secco ad una determinata densità ($\gamma=1,6 \text{ g/cm}^3$), inseriti nella cella edometrica, è stato applicato il primo carico (98,1 kPa nel caso in esame) e solo allora si è inserito il fluido di interesse nel catino edometrico.

Sicuramente quello che si ottiene, in termini di microstruttura del provino, considerando una o l'altra tipologia di preparazione, è totalmente diverso. Infatti, mentre nel primo caso si ottiene una struttura molto più dispersa di particelle, più o meno flocculate, all'interno del fluido considerato, nel secondo, invece, la microstruttura del campione risulta essere contraddistinta da un insieme di "aggregati" dispersi all'interno del fluido. Con il termine aggregato si intende un insieme di particelle legate tra loro da interazioni elettrochimiche che si comportano come un unico elemento deformabile.

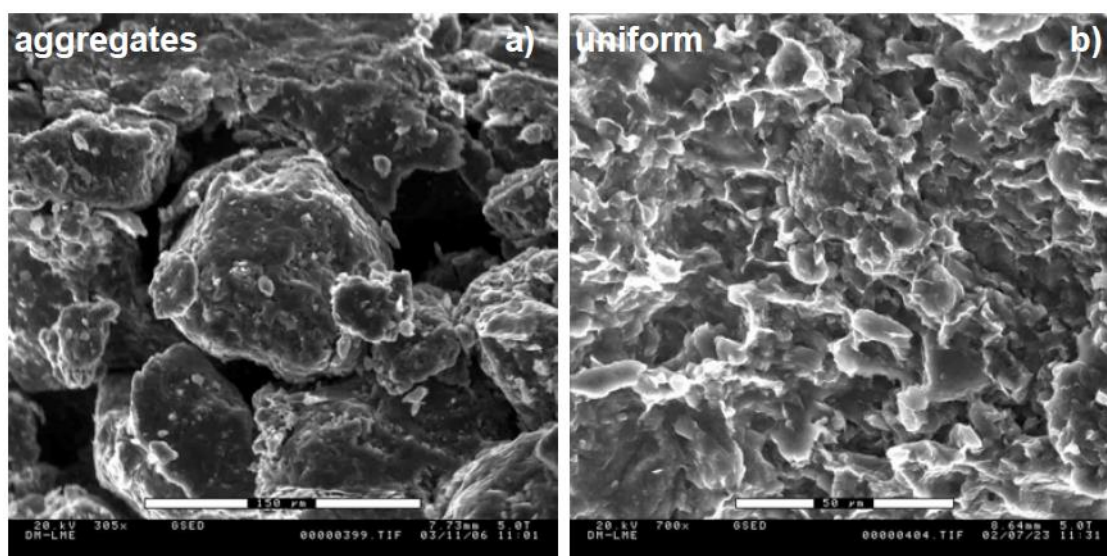


Figura 4-6 Differenza della microstruttura tra (a)un campione compattato a secco e (b)un campione slurry (Musso, Romero, & Della Vecchia, 2013)

In particolar modo, con la prima tipologia di prova si vuole ottenere una conferma dei risultati ottenuti con il permeametro, dato che la modalità di preparazione dei campioni è pressoché analoga, con la seconda invece si vuole simulare il processo di realizzazione delle barriere in corrispondenza dei siti contaminati. Nel seguito vengono mostrati i risultati ottenuti e discusse le differenze che si ottengono in funzione delle due modalità di preparazione dei provini.

4.4.1. Prove edometriche con campioni ricostituiti

L'esecuzione delle prove è avvenuta su campioni inseriti all'interno della cella edometrica sotto forma di slurry, ovvero un fango ottenuto dalla miscelazione tra il materiale solido e il fluido di interesse. In particolar modo, si è considerato un contenuto di fluido per la preparazione dei campioni pari a 1,1 volte il limite liquido corrispondente. Tale scelta è dipesa dal fatto che con tale contenuto di fluido si è certi di avere un campione saturo.

I gradini di carico scelti per le prove sono quelli della prova edometrica standard fino a 400 kPa:

$$(kPa) \quad 12.3 \rightarrow 24.5 \rightarrow 49 \rightarrow 98.1 \rightarrow 196.1 \rightarrow 400$$

Si mostrano i risultati ottenuti per le diverse combinazioni terra-fluido:

- *Campione ricostituito di Bentonite con olio di paraffina*

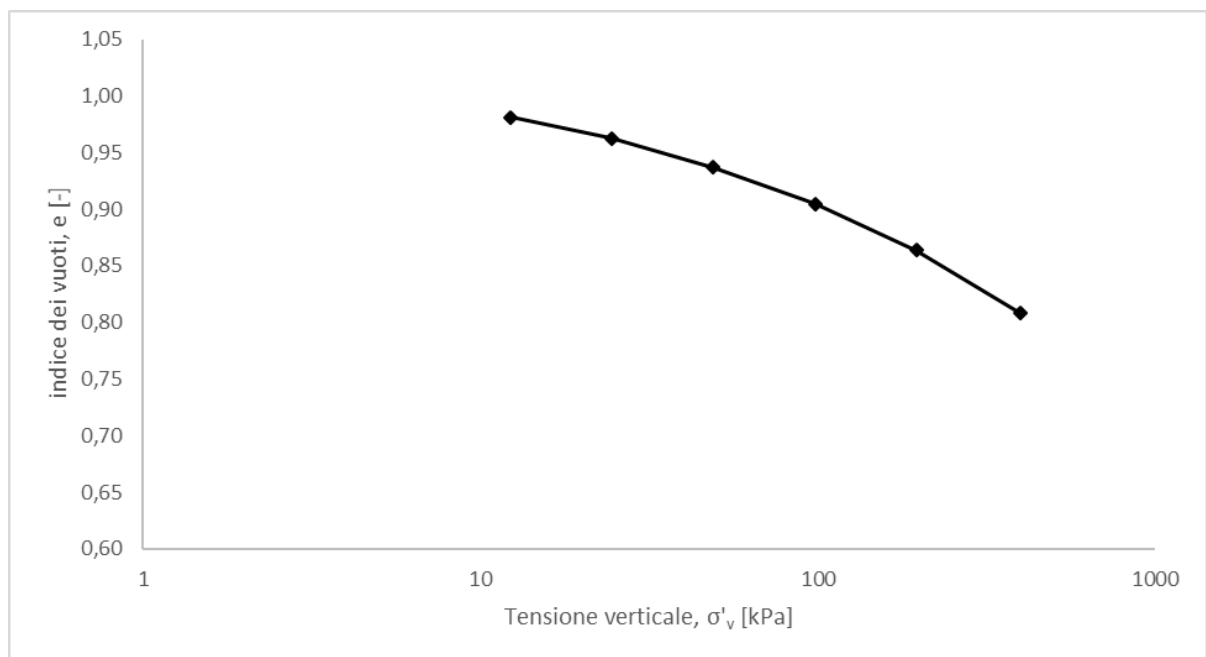


Figura 4-7 Curva edometrica campione ricostituito di Bentonite con olio di paraffina

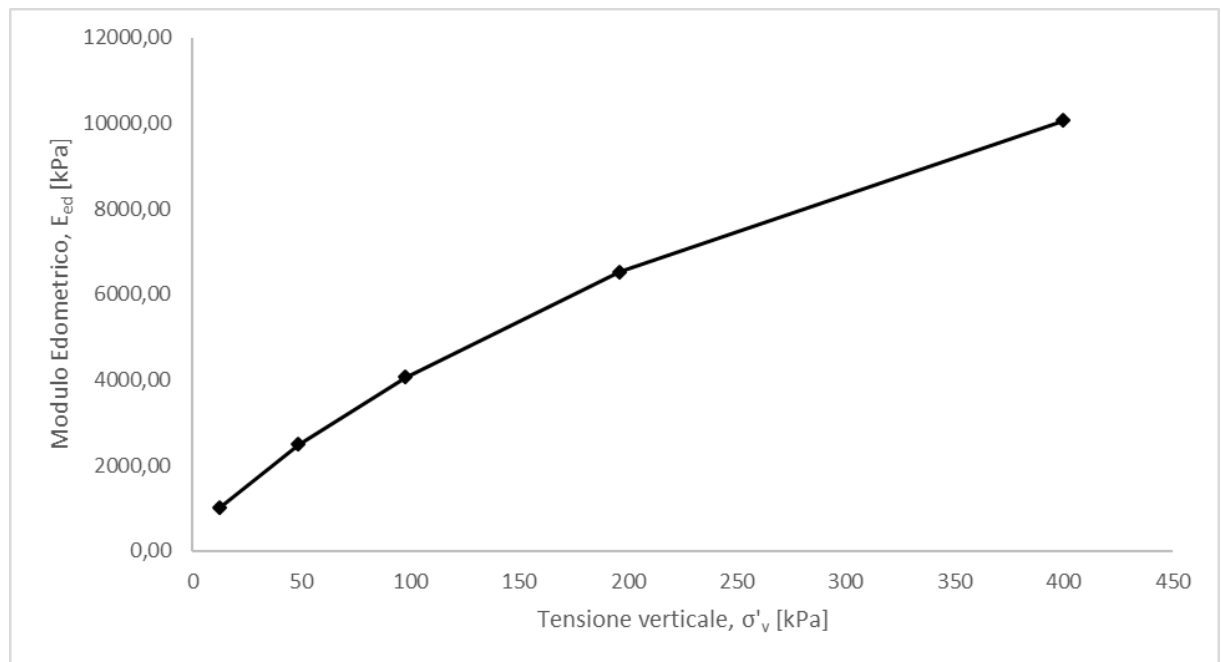


Figura 4-8 Andamento del Modulo Edometrico del campione ricostituito di Bentonite con olio di paraffina

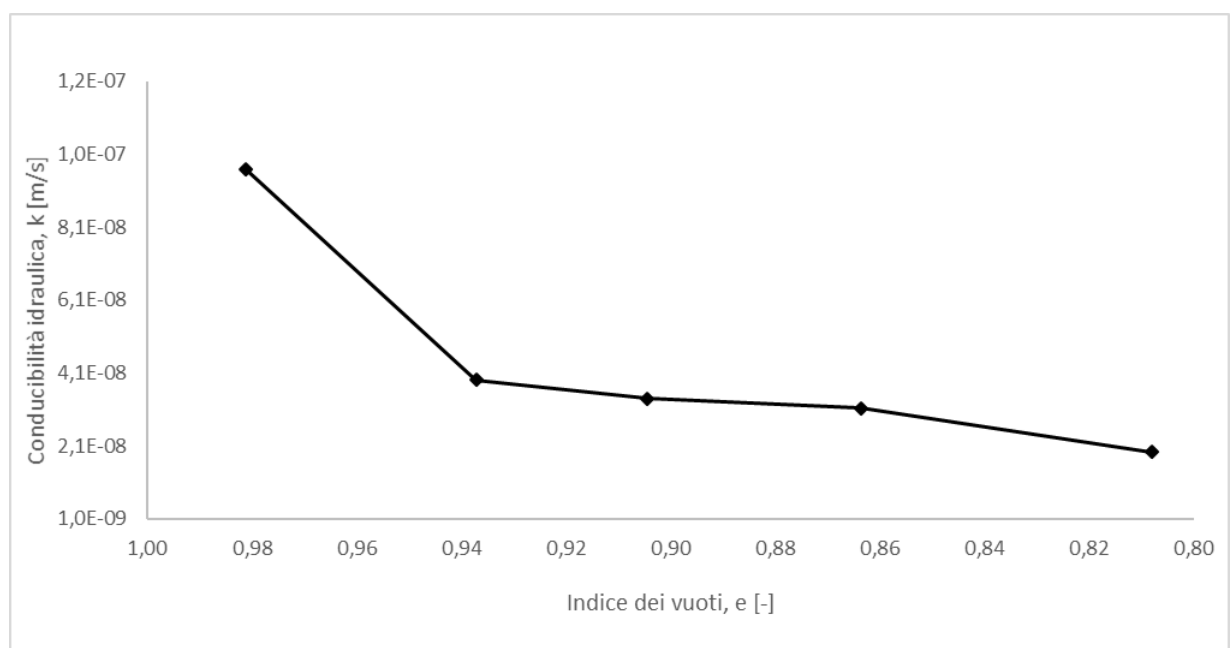


Figura 4-9 Conducibilità idraulica del campione ricostituito di Bentonite con olio di paraffina

- *Campione ricostituito di Caolino con Acqua distillata*

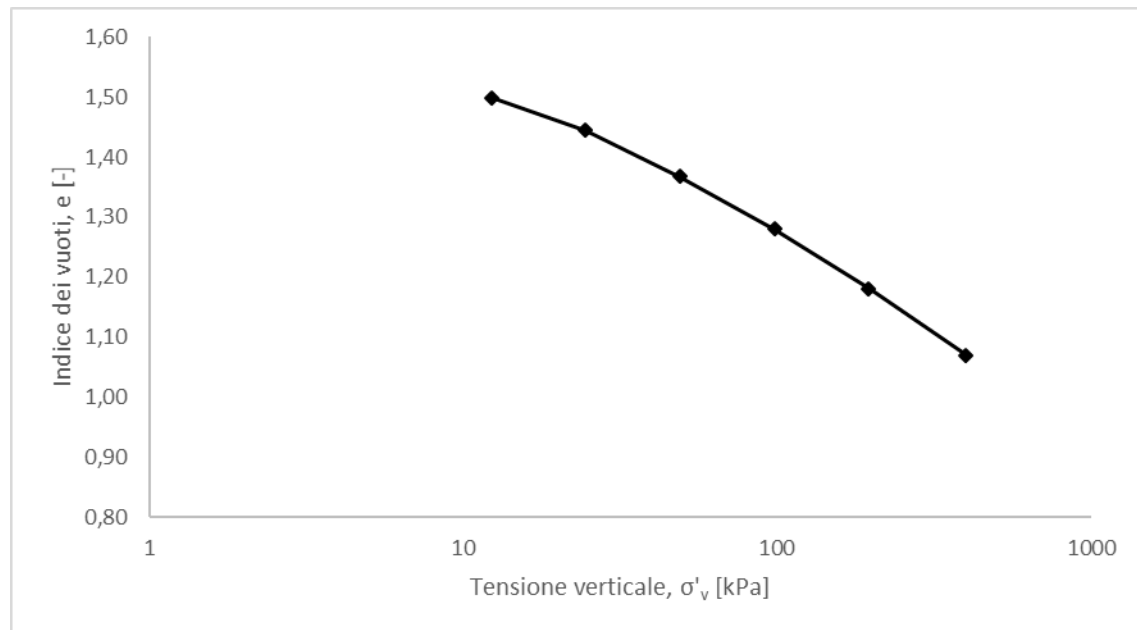


Figura 4-10 Curva edometrica del campione ricostituito di Caolino con Acqua distillata

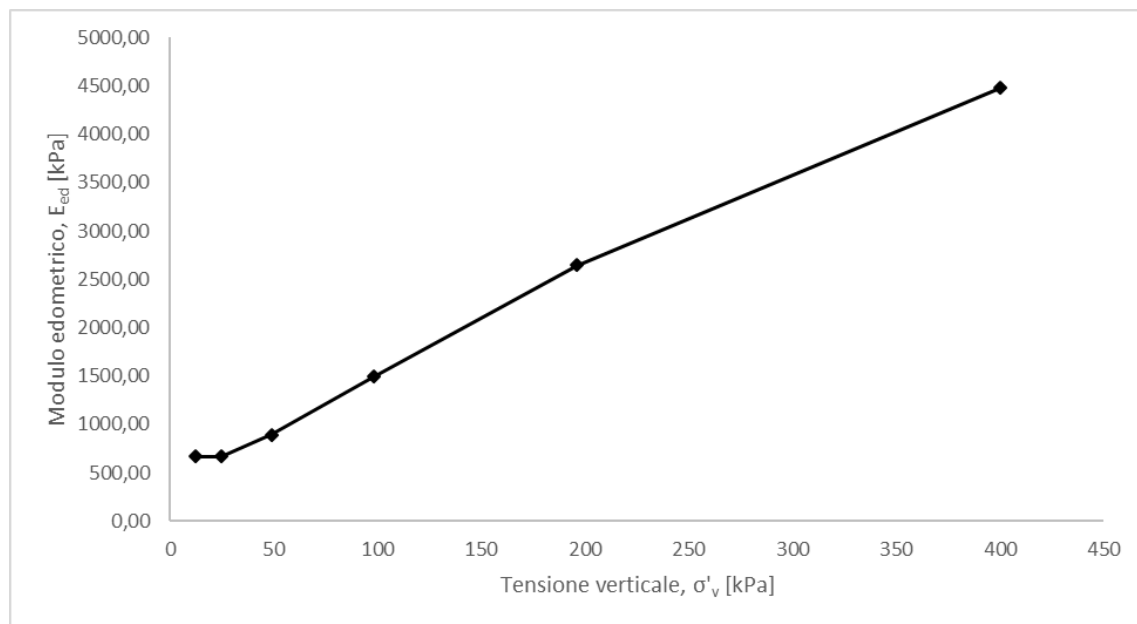


Figura 4-11 Andamento del Modulo Edometrico del campione ricostituito di Caolino con Acqua distillata

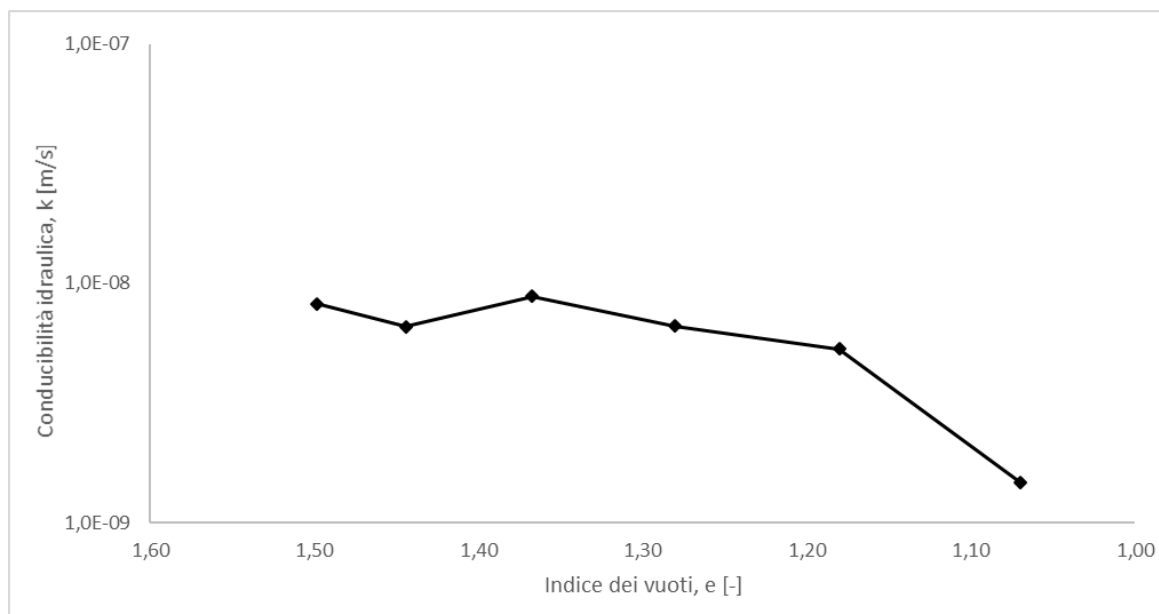


Figura 4-12 Conducibilità idraulica del campione ricostituito di Caolino con Acqua distillata

- *Campione ricostituito di Caolino con olio di paraffina*

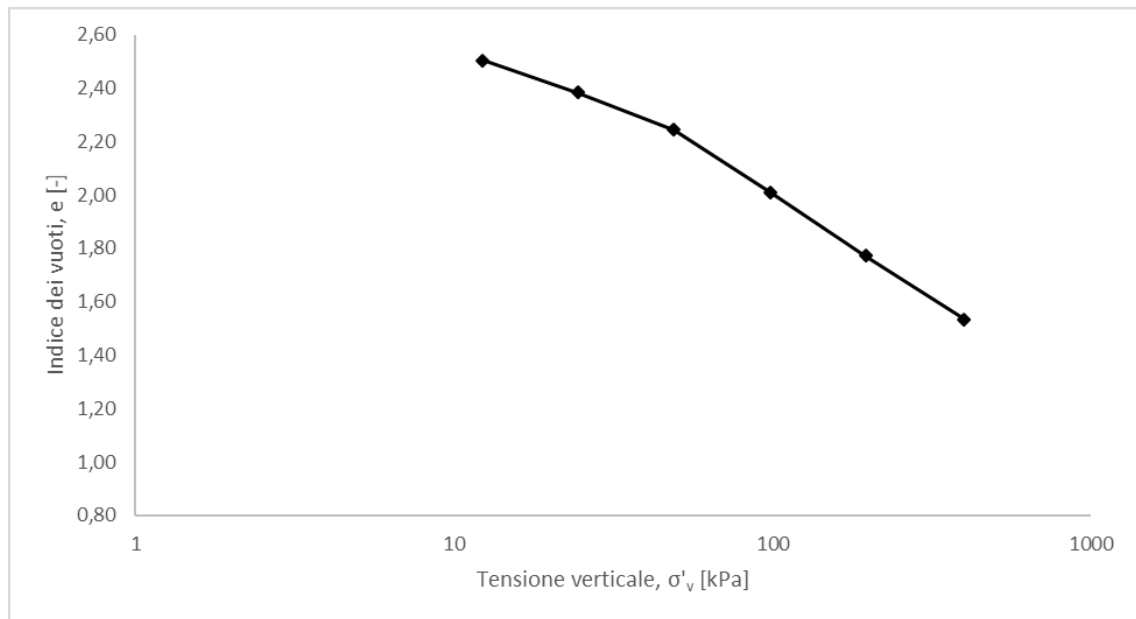


Figura 4-13 Curva edometrica del campione ricostituito di Caolino con olio di paraffina

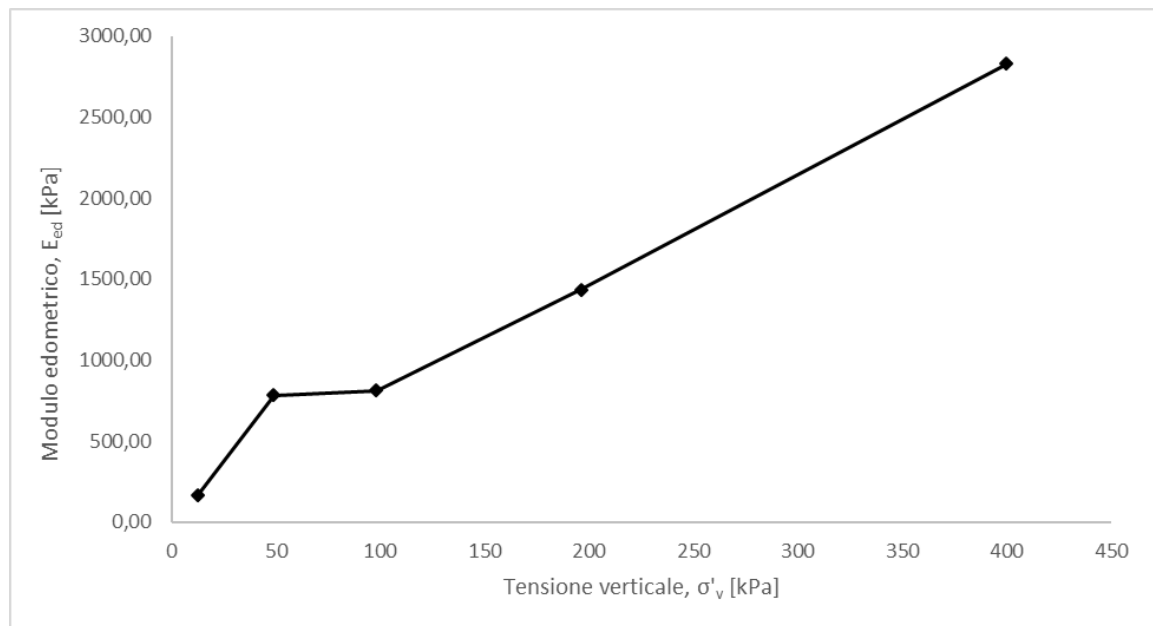


Figura 4-14 Andamento del Modulo Edometrico del campione di Caolino con olio di paraffina

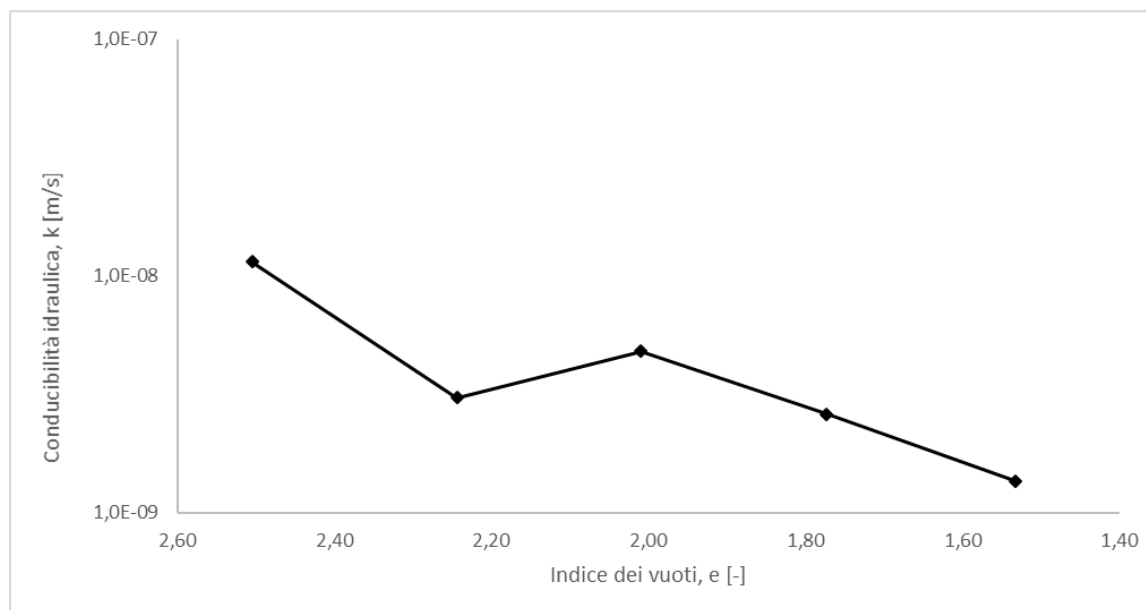


Figura 4-15 Conducibilità idraulica del campione ricostituito di Caolino con olio di paraffina

4.4.2. Prove edometriche con campioni compattati

In questo caso i campioni sono stati preventivamente compattati a secco, mediante una pressa meccanica, alla densità di $1,6 \text{ g/cm}^3$. Solo successivamente è stata eseguita la prova edometrica.

Si è già detto, nella sezione introduttiva, che la modalità di preparazione dei campioni a secco comporta una struttura costituita da aggregati, nettamente differente quindi da quella di un provino ricostituito.

- Campione compattato di Bentonite con Acqua distillata

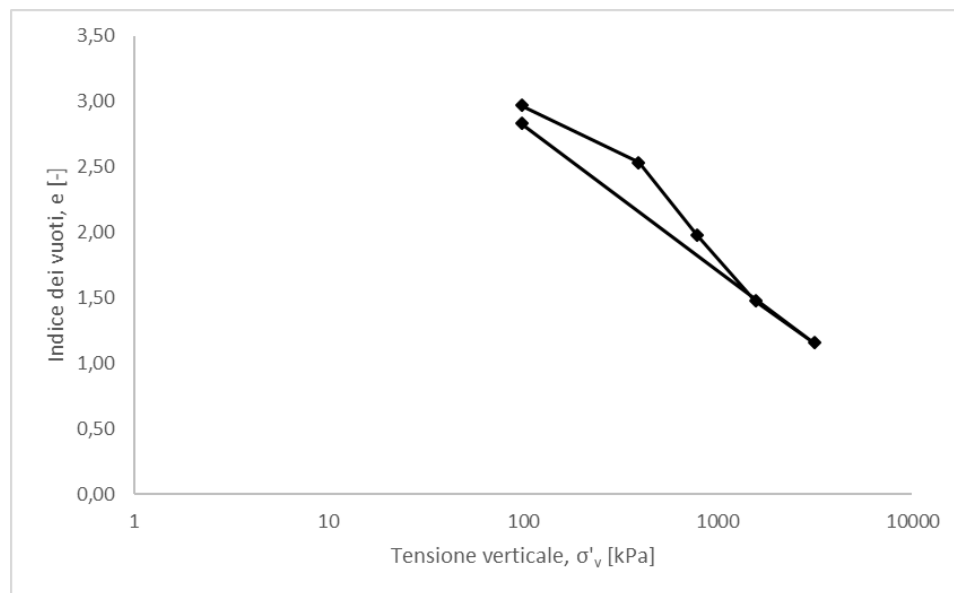


Figura 4-16 Curva edometrica del campione compattato con acqua distillata

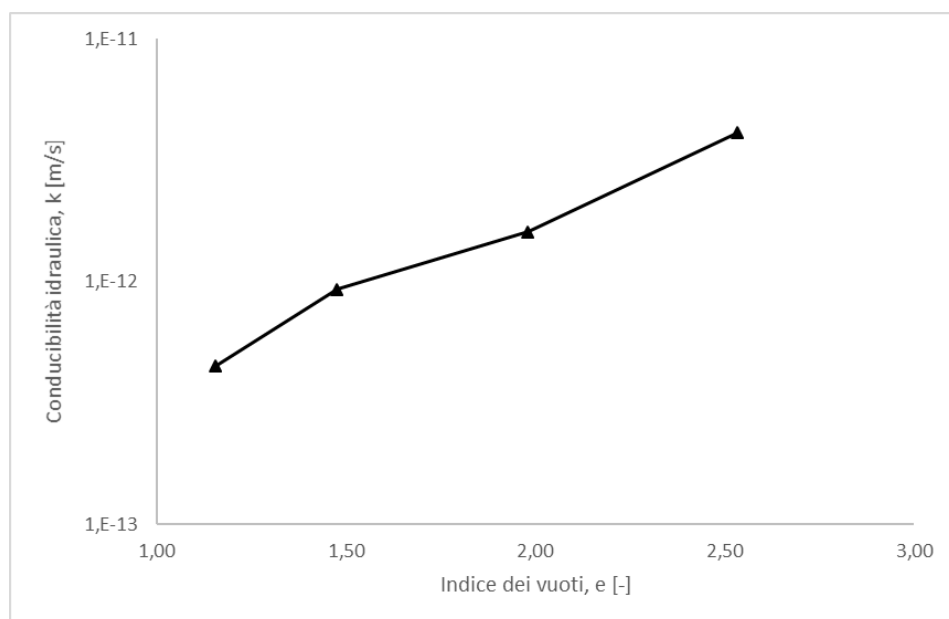


Figura 4-17 Conducibilità idraulica del campione compattato con acqua distillata

- *Campione compattato di Bentonite con Olio di paraffina*

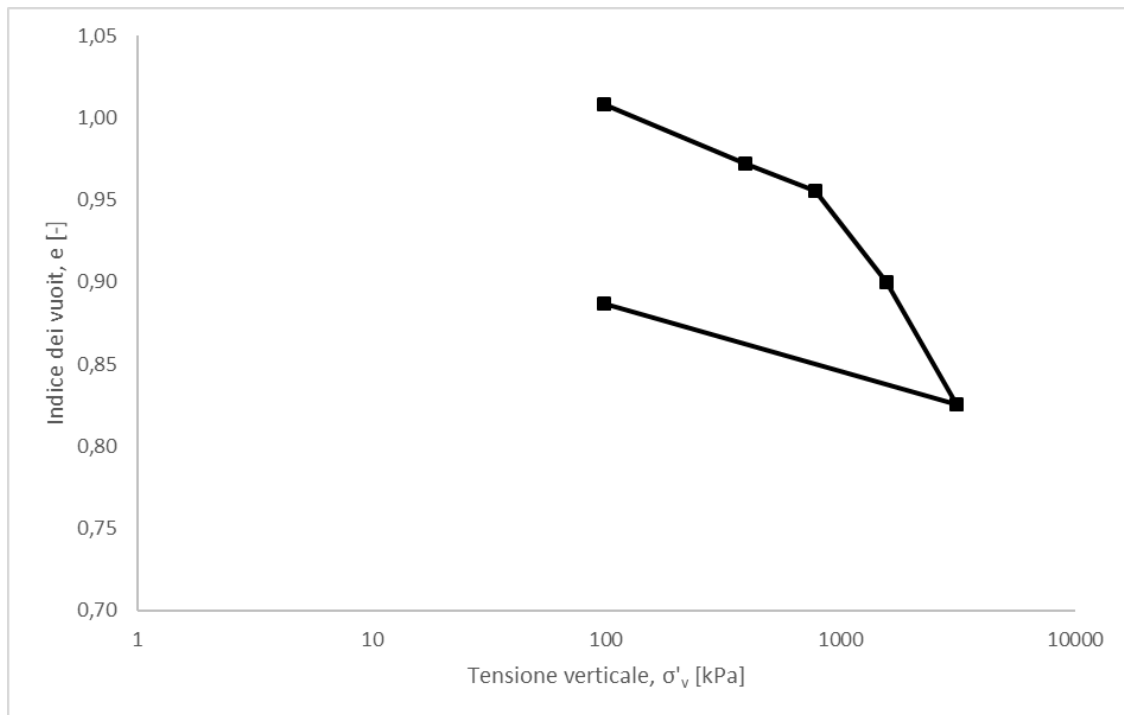


Figura 4-18 Curva edometrica campione compattato di Bentonite con Olio di paraffina

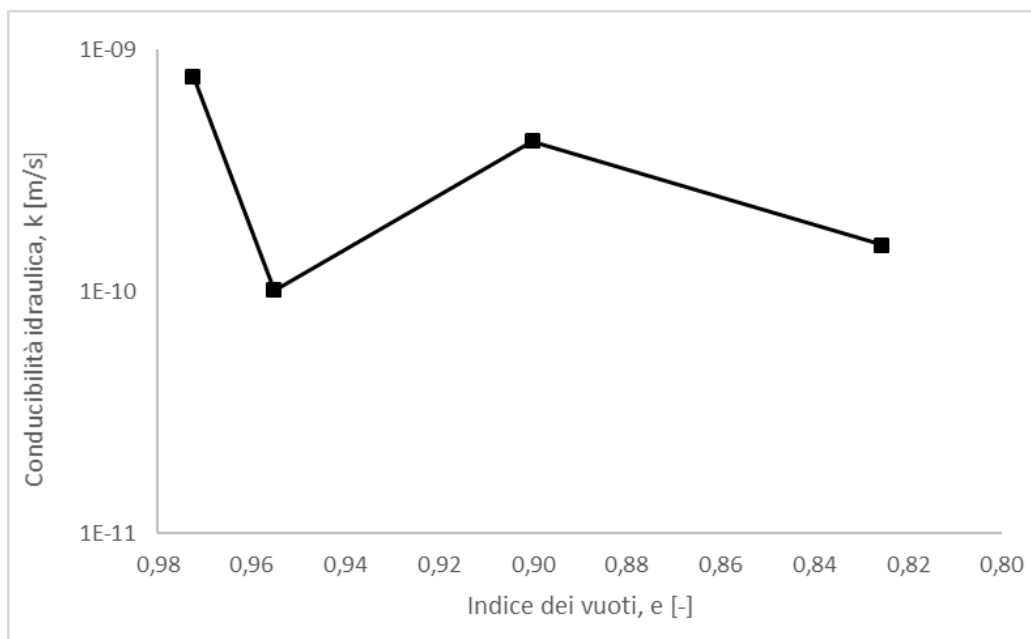


Figura 4-19 Conducibilità idraulica campione compattato di Bentonite con Olio di paraffina

- Risultati campione compattato di Bentonite con Aria

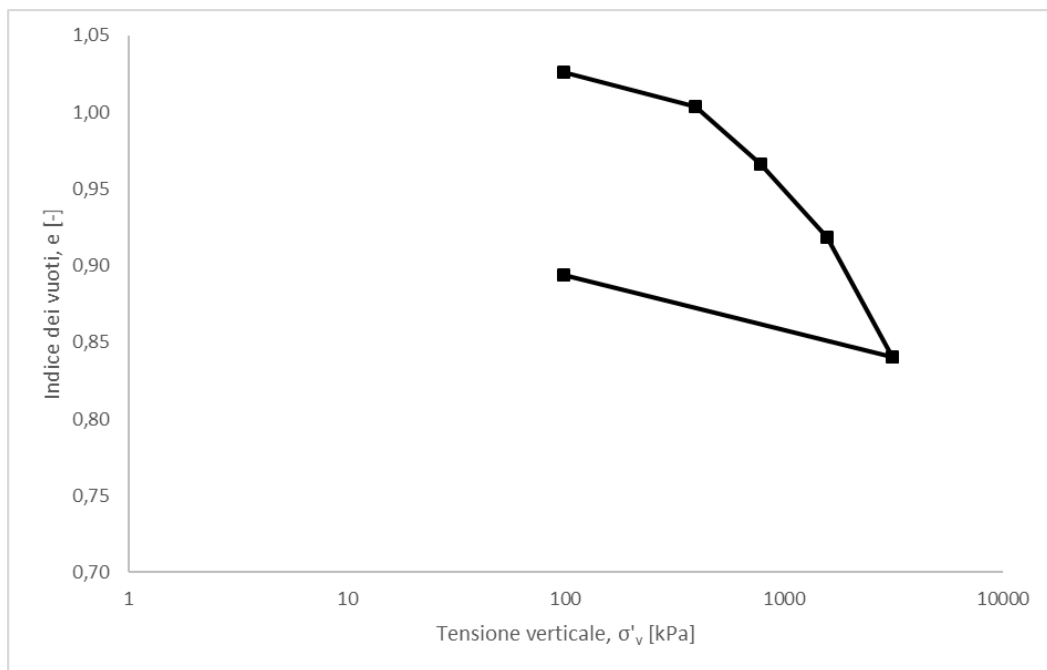


Figura 4-20 Curva edometrica campione compattato di Bentonite con Aria

4.5. Confronto risultati

Questa è una sezione redatta per il confronto dei risultati ottenuti con le diverse strumentazioni e per i diversi materiali.

Sulla base di tali risultati è possibile effettuare le seguenti considerazioni:

- 1) I campioni ricostituiti di bentonite hanno mostrato un valore di conducibilità idraulica nei confronti dell'acqua distillata (permeametro a pareti flessibili) pari a $k = 1.5 \cdot 10^{-12} \text{ m/s}$, mentre nei confronti dell'olio di paraffina (permeametro a pareti rigide) pari a $k = 4 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$. Pertanto, si ha un incremento di circa quattro ordini di grandezza, segno tangibile della variazione della microstruttura del campione sotto l'azione del fluido non acquoso per effetto della riduzione di costante dielettrica del permeante.
- 2) Per il caolino la variazione di conducibilità idraulica che si ha nel passaggio da acqua ad olio è molto più impercettibile, come mostrato in Figura 4-21.

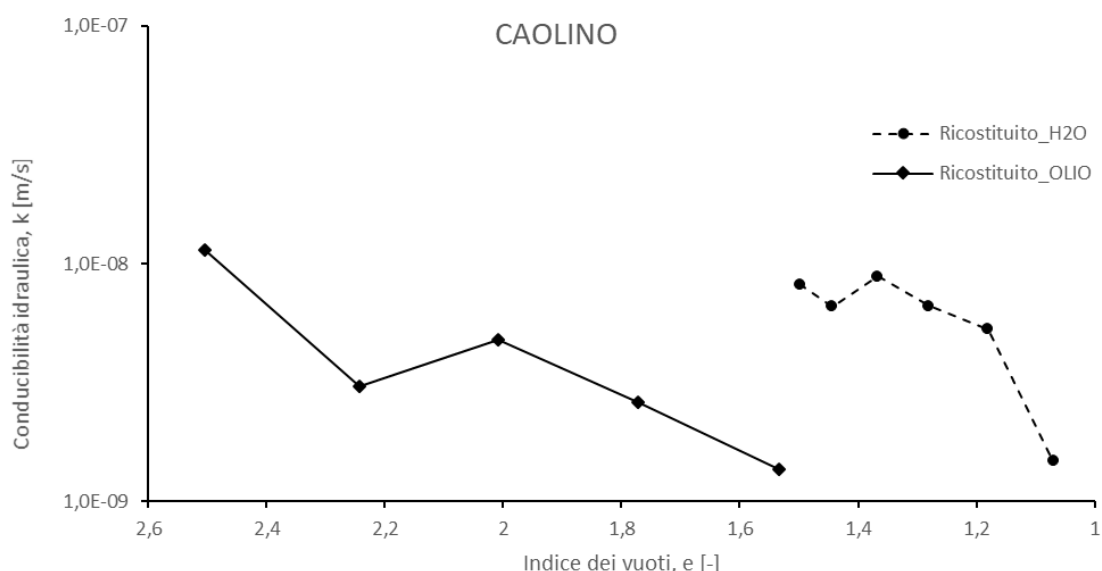


Figura 4-21 Confronto tra le conducibilità idrauliche dei campioni ricostituiti di caolino

Diversa è, infatti, la “sensibilità” dei due materiali nei confronti del permeante organico. Se la bentonite mostra un incremento di quattro ordini di grandezza del valore della conducibilità, per il caolino tale variazione è quasi inferiore all’ordine di grandezza. In realtà, si deve considerare il fatto che l’olio di paraffina ha una viscosità cento volte maggiore di quella dell’acqua. Questo influenza nettamente il valore di conducibilità idraulica. Pertanto, il confronto andrebbe fatto non tanto sulla conducibilità idraulica, quanto sulla permeabilità intrinseca, che è un parametro molto più indicativo della dimensione dei pori (e quindi della microstruttura del materiale).

Infatti, plottando i valori di permeabilità intrinseca si ha che:

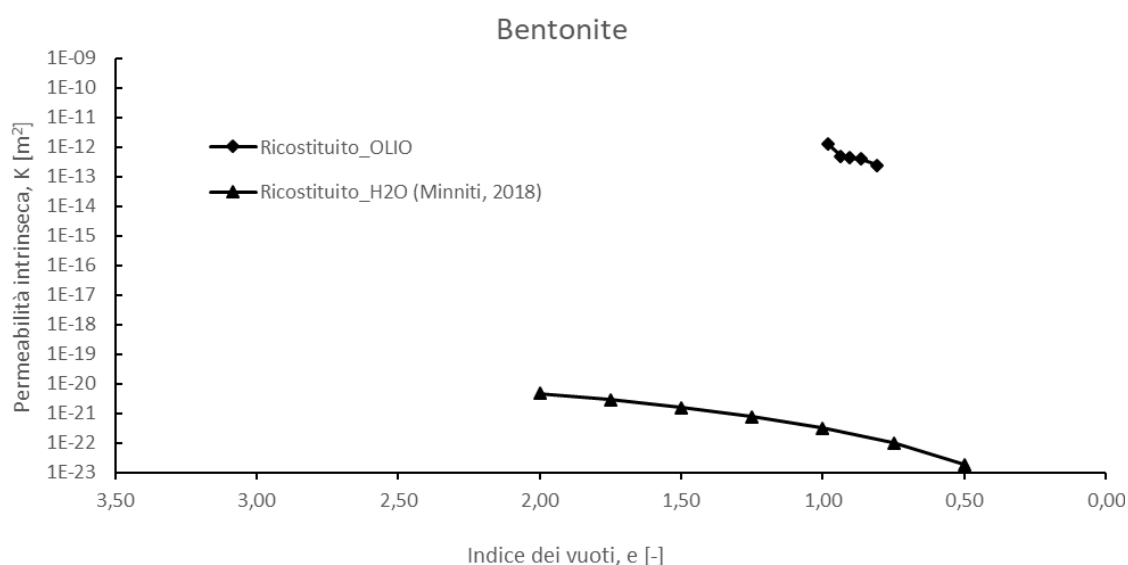


Figura 4-22 Confronto tra le permeabilità intrinseche dei campioni ricostituiti di bentonite

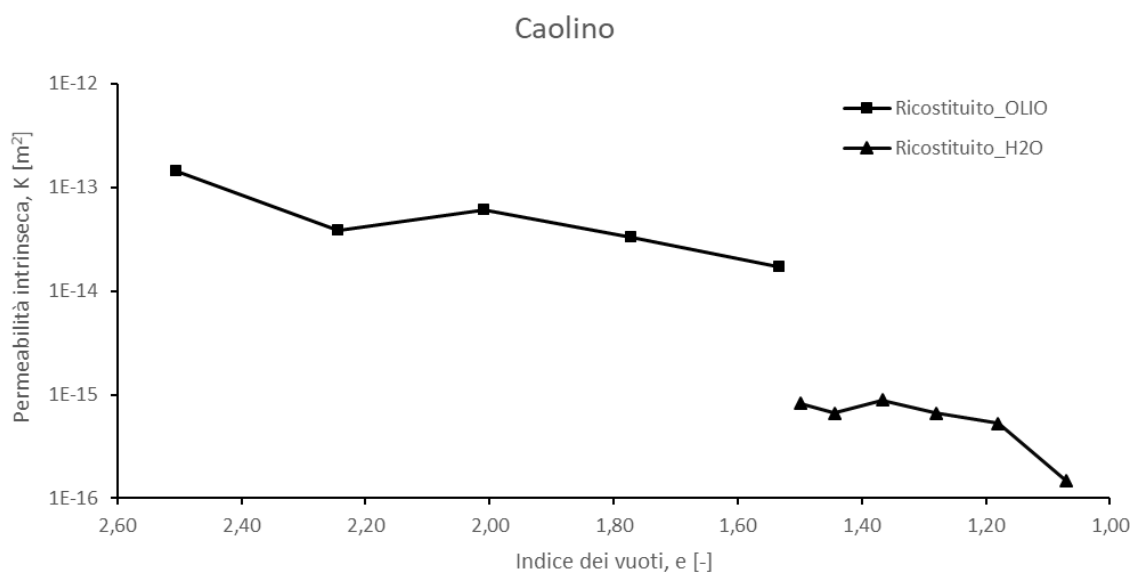


Figura 4-23 Confronto tra le permeabilità intrinseche dei campioni ricostituiti di caolino

Si nota subito come la reazione della bentonite al cambio di fluido sia molto più significativa rispetto a quella del caolino. Infatti, se per quest'ultimo si assiste ad una variazione di permeabilità intrinseca corrispondente ad un incremento di due ordini di grandezza (Figura 4-23), per la bentonite la variazione è di addirittura dieci ordini di grandezza (Figura 4-22). Questa evidenza può sicuramente essere messa in relazione con la differente natura mineralogica e granulometrica dei due materiali, con la bentonite molto più "attiva" del caolino. In presenza di olio di paraffina si assiste ad un processo di flocculazione delle particelle tale per cui si incrementa la dimensione dei macropori. A ciò è associato

l'incremento di conducibilità osservato sperimentalmente. La variazione di permeabilità intrinseca osservata è un indice del fatto che tale fenomeno sia molto più evidente per la bentonite che per il caolino.

- 3) Dal confronto dei moduli edometrici si nota che, passando da acqua distillata a olio di paraffina, aumenta la rigidità complessiva dei due materiali.
- 4) Dal confronto delle curve edometriche dei campioni ricostituiti relative all'acqua distillata e all'olio di paraffina, si notano due comportamenti diversi rispettivamente per bentonite (Figura 4-24) e caolino (Figura 4-25):

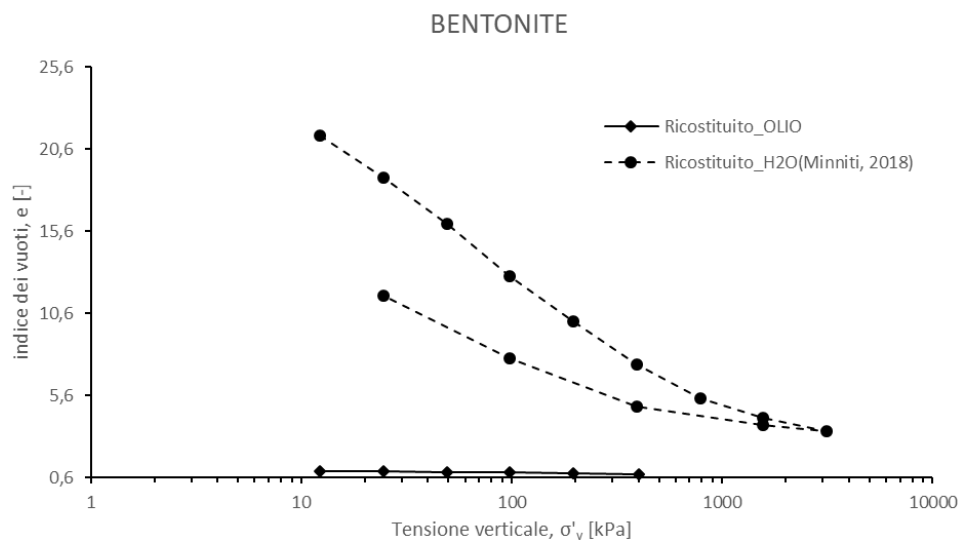


Figura 4-24 Confronto curve edometriche tra i campioni ricostituiti di bentonite

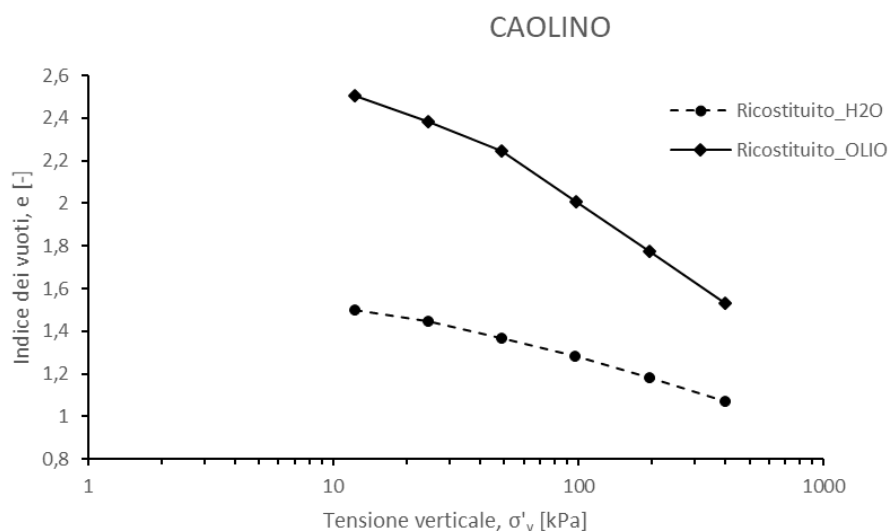


Figura 4-25 Confronto curve edometriche dei campioni ricostituiti di caolino

È ben visibile come per la bentonite la curva relativa all'acqua sovrasta quella relativa all'olio, mentre nel caso del caolino si ha l'andamento esattamente opposto.

5) In Figura 4-26 sono riportati tutti i risultati in termini di conducibilità idraulica valutati sulla bentonite con le diverse metodologie di prova:

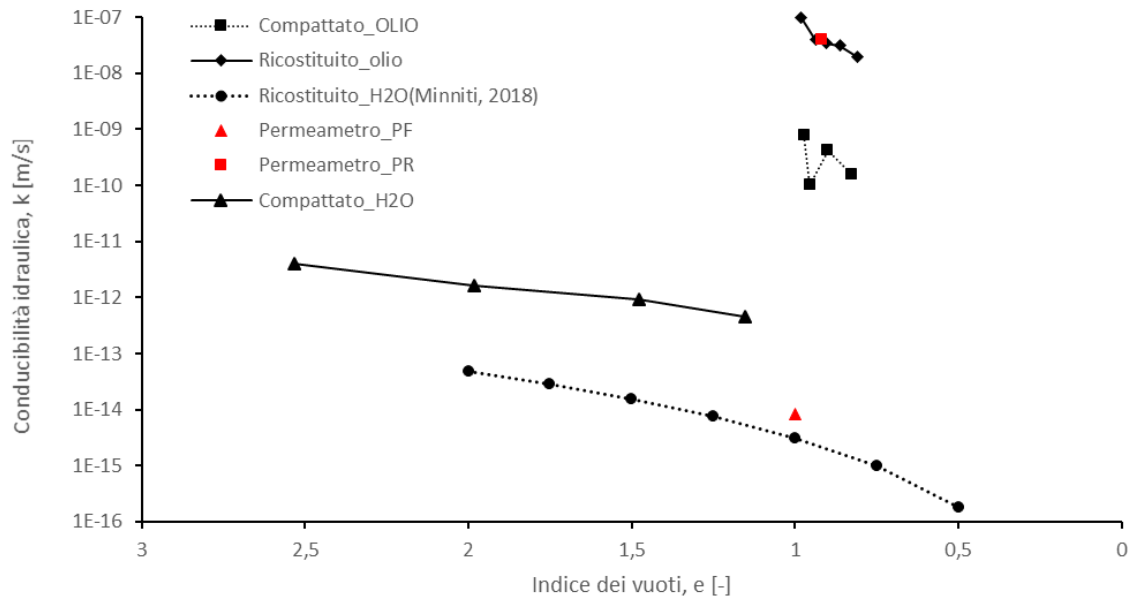


Figura 4-26 Confronto conducibilità idraulica bentonite valutata con le diverse tipologie di prova

Si nota che i valori di conducibilità valutati con i permeametri e con le prove edometriche sui campioni ricostituiti sono pressoché identici. Questo era prevedibile dato che la modalità di preparazione dei campioni è la medesima per le due tipologie di prova, nonostante la valutazione della conducibilità avvenga in maniera diversa, diretta con il permeametro e indiretta con l'edometro.

Se invece si effettua un confronto tra i valori di conducibilità tra campioni compattati e ricostituiti si nota che:

- Per i campioni saturi d'acqua distillata, la tipologia "compattato" mostra un valore maggiore rispetto a quello della tipologia di campione "ricostituito". Questo, probabilmente è associato al fatto che, nel caso di campione compattato, si ha una microstruttura costituita da aggregati, mentre nel campione ricostituito si ha una dispersione più o meno omogenea di microparticelle. I macropori, a cui è associato il flusso del fluido, hanno, probabilmente, dimensioni maggiori nel primo caso piuttosto che nel campione ricostituito.
- Per i campioni saturi d'olio, invece, si ha l'andamento esattamente opposto. Il campione "compattato" mostra una conducibilità idraulica inferiore rispetto a quella del campione

ricostituito. Molto probabilmente, i macropori inter-aggregato nel campione compattato hanno dimensioni inferiori a quelli inter-flocculo del campione ricostituito.

- Le curve di conducibilità dei campioni compattati sono comprese tra quelle dei campioni ricostituiti. Ciò è strettamente correlato alla microstruttura del campione ed alla modalità con cui essa varia nel passaggio da acqua distillata ad olio di paraffina. In particolare, si possono individuare due fenomeni: flocculazione di micro particelle nel campione ricostituito e collasso degli aggregati nel campione compattato.

In particolar modo, in un campione ricostituito si è già detto che la microstruttura può essere vista come un insieme di micro particelle che, in presenza di un fluido non acquoso con costante dielettrica inferiore a quella dell'acqua, tendono a flocculare formando macro particelle con una distanza inter-particellare nettamente incrementata rispetto al caso con acqua distillata (collasso del doppio strato con conseguente decadimento delle forze repulsive) (Figura 4-27 (a)). L'aggregato, invece, può essere visto come un'entità a sé stante, nel senso che, per le "grandi" dimensioni che lo caratterizzano, le interazioni descritte dalla teoria DLVO possono essere trascurate per l'interazione inter-aggregato, ma piuttosto devono essere prese in considerazione per quella intra-aggregato. Questo vuol dire che l'accrescimento dei macropori che si ha con la saturazione con olio di paraffina, in questo caso, è dovuto al collasso del generico aggregato su se stesso per effetto di un'interazione quasi puramente attrattiva tra le microparticelle che lo costituiscono (Figura 4-27 (b)).

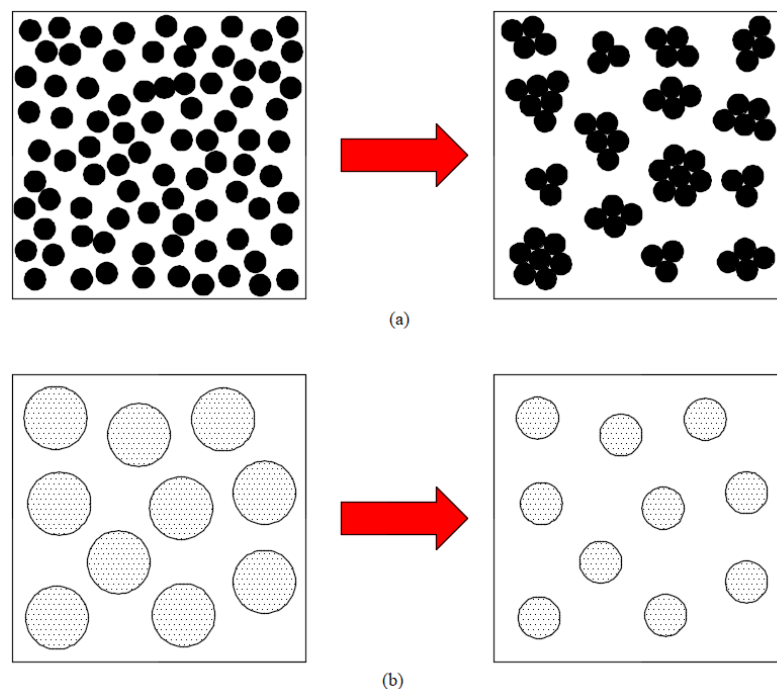


Figura 4-27 Variazione della microstruttura: (a) Flocculazione e (b) Collasso dell'aggregato

5. Modellazione numerica

Questo capitolo è dedicato alla fase conclusiva del progetto presentato in tale elaborato, ovvero la modellazione numerica dei risultati sperimentali. Tale operazione è stata effettuata mediante l'ausilio del codice di calcolo agli elementi discreti Mercury DPM.

In particolar modo, ciò che si vuole ottenere è una riproduzione del comportamento macroscopico del materiale attraverso uno studio micromeccanico basato sull'interazione tra gli aggregati costituenti il campione. Per tale motivo si è deciso di sfruttare il metodo degli elementi discreti (DEM), rappresentando il materiale come un elemento discontinuo costituito da particelle che interagiscono mediante azioni reciproche che si manifestano in corrispondenza dei contatti.

Prima di mostrare i modelli considerati e i risultati ottenuti, sono state redatte due sezioni dedicate alla teoria di base del metodo degli elementi discreti con particelle e ad una rapida descrizione del codice utilizzato.

5.1. Cenni teorici sul metodo agli elementi discreti (DEM)

Oggigiorno, una delle sfide della ricerca è la simulazione realistica di sistemi eterogenei di particelle in condizioni statiche e dinamiche. La disomogenea microstruttura di tali sistemi rende difficile la loro modellazione tramite i metodi del continuo, che tipicamente assumono un'omogeneità in corrispondenza della microscala. La modellazione a particelle discrete può essere considerata una valida alternativa per ottenere campi continui a partire dai dati delle particelle.

Esistono diverse tipologie di metodi discreti alle particelle, ma quello usato in tale progetto è il *Soft-Particle Discrete Element Method (DEM)*.

Sebbene la forma delle singole particelle all'interno del sistema può essere anche molto complicata, queste vengono modellate attraverso forme elementari più semplici (sfere) per semplificare il problema. Una volta definite le proprietà delle particelle e le leggi di interazione, tali metodi si basano sulla risoluzione delle equazioni del moto nel tempo. A partire da una perturbazione iniziale imposta, si studia la propagazione di questa all'interno del sistema da elemento a elemento. Le equazioni del moto sono risolte attraverso un approccio esplicito per ogni timestep Δt (valutato in maniera tale da essere almeno un ordine di grandezza minore del tempo di contatto tra le particelle).

Per ogni timestep si susseguono le seguenti fasi:

- 1) Si valutano le forze dovute alle tensioni o a forze di volume applicate esternamente agenti su ogni singolo elemento;
- 2) Si integrano le equazioni del moto per determinare nuovi valori di velocità e spostamenti;
- 3) Si valutano le deformazioni a partire dalle velocità;
- 4) A partire dalla legge costitutiva adottata, dalle deformazioni si ricava il nuovo campo di tensioni e si riparte così dal punto 1.

Per quanto riguarda le particelle, queste vengono schematizzate come corpi rigidi che entrano in contatto in corrispondenza di un'area molto piccola sintetizzata ad un punto. Per simulare l'interazione tra diverse particelle si utilizza l'approccio del "soft-contact", in cui è consentito l'overlap (δ) in corrispondenza del punto di contatto. Nella realtà, tale sovrapposizione non esiste, ma in un approccio modellistico come quello del DEM questo è necessario per riprodurre la deformabilità del sistema sotto l'azione di carichi e pressioni. L'entità dell'overlap è relazionata alla legge forza-spostamento considerata.

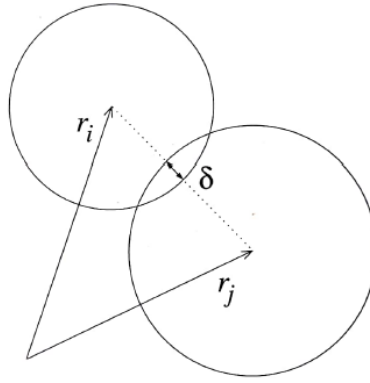


Figura 5-1 Overlap tra due particelle

Il contatto tra particelle viene simulato attraverso molle elastiche ideali caratterizzate da una rigidità normale e trasversale e da un coefficiente di attrito. Si tratta di “microparametri”, riferiti cioè alla microscala, e non hanno nulla a che vedere con i parametri globali che caratterizzano una terra alla macroscala e che possono essere determinati attraverso prove di laboratorio. Si dovrà pertanto effettuare un processo di calibrazione per la loro determinazione ovvero, a partire da un fenomeno sperimentale reale, si dovranno effettuare svariate analisi variando tali microparametri fino a quando non si riuscirà a simulare numericamente il fenomeno macroscopico realmente osservato. Si tratta di una fase molto delicata e molto dispendiosa dal punto di vista computazionale.

L’analisi in sé, come già accennato precedentemente, si basa sulla risoluzione delle equazioni del moto che, nel caso in cui è nota la forza totale f_i agente sull’ i -esima particella, si riduce alla risoluzione dell’equazione del moto di Newton:

$$m_i \frac{d^2}{dt^2} \vec{r}_i = \vec{f}_i + m_i \cdot \vec{g} \quad (1.23)$$

$$I_i \frac{d}{dt} \vec{\omega}_i = \vec{t}_i \quad (1.24)$$

In cui, considerando che il pedice i sta ad indicare la i -esima particella, si ha:

- m_i è la massa;
- $\vec{r}_i$ è la posizione;
- $\vec{f}_i$ è la forza totale agente dovuta al contatto con altre particelle o con eventuali muri;
- $\vec{g}$ è l’accelerazione gravitazionale;
- I_i è il momento di inerzia sferico;
- $\vec{\omega}_i$ è la velocità angolare;
- $\vec{t}_i$ è il torcente totale;

Nello specifico, considerando due particelle sferiche i e j con raggi a_i e a_j , queste interagiscono se e solo se entrano in contatto, ovvero se risulta:

$$\delta = (a_i + a_j) - (\vec{r}_i - \vec{r}_j) \cdot \vec{n} > 0 \quad (1.25)$$

essendo $\vec{n} = \vec{n}_{ij} = (\vec{r}_i - \vec{r}_j) / |\vec{r}_i - \vec{r}_j|$ il versore da j ad i . La forza agente sulla particella i derivante dall'interazione con la particella j in corrispondenza del contatto c si può scrivere come somma di due aliquote, quella normale e quella tangenziale:

$$\vec{f}^c = \vec{f}_{ij}^c = f^n \vec{n} + f^t \vec{t} \quad (1.26)$$

Esistono differenti modelli per definire la legge forza-spostamento, alcune anche abbastanza sofisticate per tenere in conto la complessità dell'interazione tra particelle. Soffermendosi esclusivamente sulla componente normale della forza, si introduce a titolo esemplificativo il modello più semplice ovvero quello del *modello di contatto normale lineare*. Tale modello si può schematizzare attraverso la relazione:

$$f^n = k\delta + \gamma_0 v_n \quad (1.27)$$

in cui k è la rigidità della molla, γ_0 lo smorzamento viscoso e v_n la velocità relativa in direzione normale. L'interazione tra particelle viene quindi schematizzata sulla base del modello dell'oscillatore armonico smorzato. Il tempo di contatto può essere valutato attraverso la:

$$t_c = \frac{\pi}{\omega} \quad (1.28)$$

con

$$\omega = \sqrt{(k / m_{ij}) - \eta_0^2} \quad (1.29)$$

in cui:

- ω è la frequenza del contatto;
- $\eta_0 = \gamma_0 / m_{ij}$ è il coefficiente di smorzamento scalato;
- $m_{ij} = m_i m_j / (m_i + m_j)$ è la massa ridotta.

È possibile, inoltre, ricavare il coefficiente di restituzione

$$r = -v'_n / v_n = \exp(-\pi \eta_0 / \omega) = \exp(-\eta_0 t_c) \quad (1.30)$$

definito come il rapporto tra la velocità dopo e prima della collisione. La durata del contatto definita nella (1.20) rappresenta un parametro molto importante nell'analisi numerica con DEM. Infatti, affinché l'analisi sia rappresentativa, è necessario settare un timestep Δt che risulti essere almeno un ordine di grandezza inferiore al t_c . Tempi di collisione eccessivamente piccoli comportano entità del timestep infinitesime e, quindi, tempi

computazionali eccessivamente lunghi. Pertanto, nella modellazione di un problema è necessario effettuare un processo di “scalatura” delle dimensioni reali del problema, in maniera tale da ridurre quanto più possibile tale problematica.

Un modello sicuramente più dettagliato è il *modello del contatto adesivo-elasto plastico normale* che permette di modellare il comportamento plastico del materiale e delle deformazioni residue che si hanno in un processo di carico-scarico. Tale modello è schematicamente rappresentato in figura.

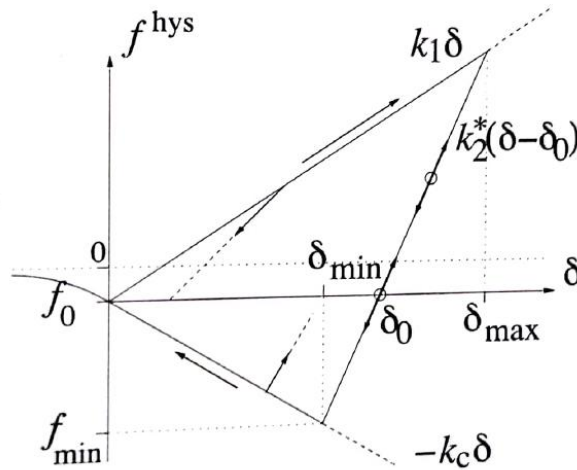


Figura 5-2 Legge adesiva elasto plastica

In formule diventa:

$$f^{hys} = \begin{cases} k_1 \delta & \text{se } k_2^*(\delta - \delta_0) \geq k_1 \delta \\ k_2^*(\delta - \delta_0) & \text{se } k_1 \delta > k_2^*(\delta - \delta_0) > -k_c \delta \\ -k_c \delta & \text{se } -k_c \delta \geq k_2^*(\delta - \delta_0) \end{cases} \quad (1.31)$$

con f^{hys} che indica la forza repulsiva (isteretica).

5.2. Codice di calcolo MercuryDPM

Questa è una sezione dedicata ad una breve descrizione del codice di calcolo usato nelle simulazioni numeriche: MercuryDPM. Si tratta un codice di calcolo ideato per eseguire simulazioni tridimensionali DEM con particelle basato sul codice di programmazione orientato ad oggetti C++. L'utente deve specificare tutte le particolarità del modello (numero di particelle, loro forma e dimensione, contorni, muri, leggi costitutive e parametri di interazione) in un singolo file, il quale richiama il "kernel" per effettuare la simulazione. Il kernel può essere considerato come un contenitore ideale, all'interno del quale si trovano una serie di funzioni implementate quali, per esempio, tipologia di particelle, legami costitutivi, muri e così via. L'output dell'analisi consiste in diverse tipologie di files, tra cui i principali sono:

- File *.data* contenenti tutte le posizioni e le velocità che possiedono le particelle ad ogni timestep;
- File *.ene* contenenti tutte le varie forme di energia del sistema istante per istante;
- File *.fstat* contenenti le forze che le particelle si interscambiano durante il processo di propagazione della perturbazione.

Sicuramente la prima delle tre rappresenta la tipologia più versatile in termini di trattamento dei dati in "post processing", mentre i *.ene* sono fondamentali per monitorare l'andamento del rapporto tra energia cinetica e potenziale, usato come parametro di controllo per la stazionarietà del processo di carico. Ovvero, la velocità di applicazione del carico, considerando la natura viscosa del materiale, potrebbe comportare l'insorgenza di azioni aggiuntive dipendenti dalla velocità. Il processo di carico edometrico è tale per cui esso può essere ritenuto un processo "lento" quasi statico. Per riprodurre questo numericamente è necessario monitorare durante l'analisi, step by step, il rapporto di cui sopra. Convenzionalmente, si assume che per valori di tale rapporto inferiori alla soglia di 10^{-5} il processo di carico può ritenersi stazionario.

5.3. Caso studio

A causa delle lunghe tempistiche necessarie per l'esecuzione delle liofilizzazioni e delle porosimetrie, non si è riusciti ad ottenere in tempo utile i risultati di queste per i campioni oggetto di tale studio. Per tarare i modelli ed ottenere, quindi, delle corrispondenze attraverso le analisi numeriche si è fatto riferimento ai risultati relativi alla bentonite FEBEX (Castellanos et al., 2005 e Musso et al., 2013).

Si tratta di una bentonite prelevata dal deposito di Cortijo de Archidona, Almería, Spagna. È contraddistinta da un quantitativo molto elevato di montmorillonite, pari a circa il 92%, limite liquido $W_L=102\%$, limite plastico $W_P=49\%$, superficie specifica di $725 \text{ m}^2/\text{g}$ ed una capacità di scambio di cationi pari a $112 \text{ meq}/100\text{g}$.

Tale bentonite è stata sottoposta a prove edometriche, considerando campioni compattati a secco e successivamente saturati con acqua distillata e soluzioni saline di NaCl e CaCl_2 a diverse concentrazioni molari. Come già detto al paragrafo 1.4 l'effetto dell'aumento della concentrazione salina in soluzione è analogo alla riduzione di costante dielettrica del fluido interstiziale. Ambedue i fenomeni, infatti, provocano un collasso del doppio strato e l'incremento di conducibilità idraulica osservato sperimentalmente con le prove di laboratorio.

Si ricorda che la compattazione a secco comporta la formazione di aggregati, i quali possono essere considerati come un insieme di particelle argillose elementari vincolate da legami idraulici ed elettrochimici, che si comportano come un unico corpo deformabile.

Pertanto, si possono distinguere due tipologie di porosità:

- *Microporosità*, associata ai vuoti intra-aggregato;
- *Macroporosità*, relativa ai vuoti inter-aggregato;

Quindi, a rigore, il volume di vuoti complessivo del campione può essere scritto come somma di due contributi:

$$V_V = V_{Vm} + V_{VM} \quad (1.32)$$

con V_{Vm} volume dei vuoti associato ai micropori e V_{VM} volume dei vuoti associato ai macropori. In funzione di questi, è possibile quindi definire un indice dei vuoti micro ed un indice dei vuoti macro nel seguente modo:

$$e_m = \frac{V_{Vm}}{V_S}; e_M = \frac{V_{VM}}{V_S(1 + e_m)} \quad (1.33)$$

in cui V_s è il volume solido e il termine $V_s(1 + e_m)$ rappresenta il volume dell'aggregato.

Quindi, a rigore, l'indice dei vuoti complessivo che si valuta nelle prove edometriche può essere scritto nella seguente forma (Mašin, 2013):

$$e = e_M + e_m e_M + e_m \quad (1.34)$$

Sulla base di questa distinzione, si assume che il flusso del fluido interstiziale avvenga esclusivamente in corrispondenza dei macropori.

In figura sono riportate le curve di densità della PSD dei campioni sottoposti a MIP relativi alla condizione in cui i campioni, compattati a secco e successivamente saturati con il fluido di interesse, hanno esaurito il processo di rigonfiamento:

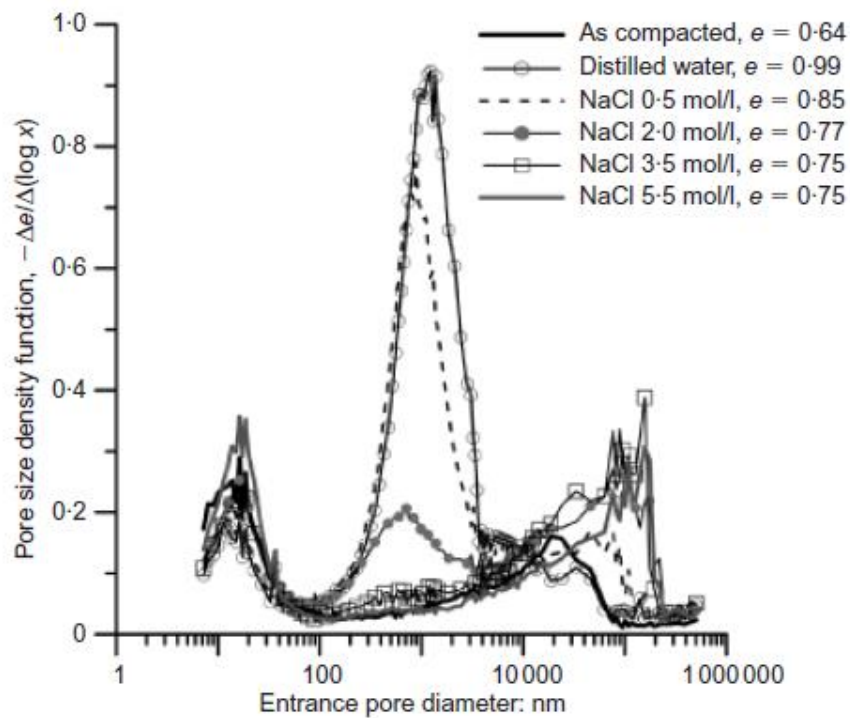


Figura 5-3 Curve di densità della distribuzione della dimensione dei pori (PSD) per le varie concentrazioni molari (Musso, Romero, & Della Vecchia, 2013)

Dalla figura è evidente che passando dall'acqua distillata alla soluzione salina si assiste ad una netta variazione della PSD. Infatti, se nel primo caso la curva evidenzia la presenza di un "modo" di pori prevalente, nel secondo caso i modi diventano due.

Questo significa che il generico aggregato costituente il campione, anche sotto l'azione di una soluzione salina con concentrazione relativamente modesta di 0.5 mol/l, subisce una contrazione. Esso si contrae su stesso per effetto della presenza degli ioni Na^+ nel doppio strato che ne causano il collasso e di conseguenza si ha un abbattimento delle azioni repulsive tra le particelle (Teoria DLVO).

Le particelle costituenti l'aggregato tendono ad attrarsi riducendo le distanze interparticellari di equilibrio.

Quindi, considerando le due grandi famiglie di pori di cui sopra, intra-aggregato e inter-aggregato, ciò che avviene è una riduzione dei primi e concomitante incremento dei secondi. Questi ultimi, come già detto, rappresentano anche i principali “canali” del flusso del fluido. Pertanto, il risultato a livello dell'elemento di volume del fenomeno microscopico appena descritto è l'incremento di conducibilità idraulica osservata sperimentalmente (Figura 5-4).

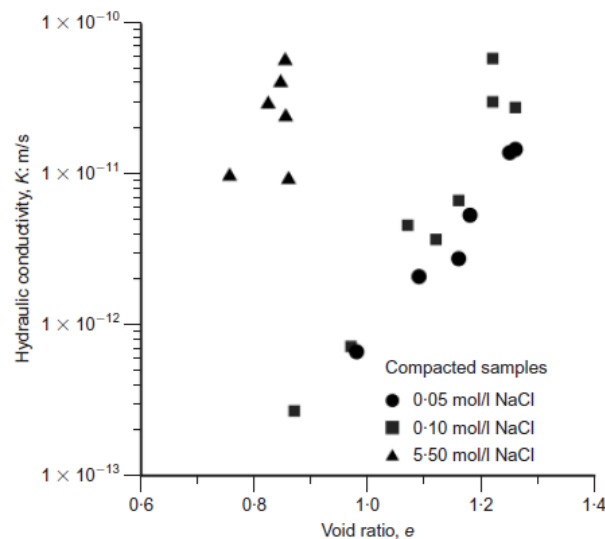


Figura 5-4 Andamento della conducibilità idraulica della bentonite FEBEX saturata con soluzioni saline di NaCl con diverse concentrazioni molari (Musso et al., 2013)

In Figura 5-5, invece, vengono riportati i risultati delle prove edometriche eseguite sulla bentonite FEBEX saturata con acqua distillata e diverse soluzioni di NaCl, che si tenterà di riprodurre con l'analisi numerica:

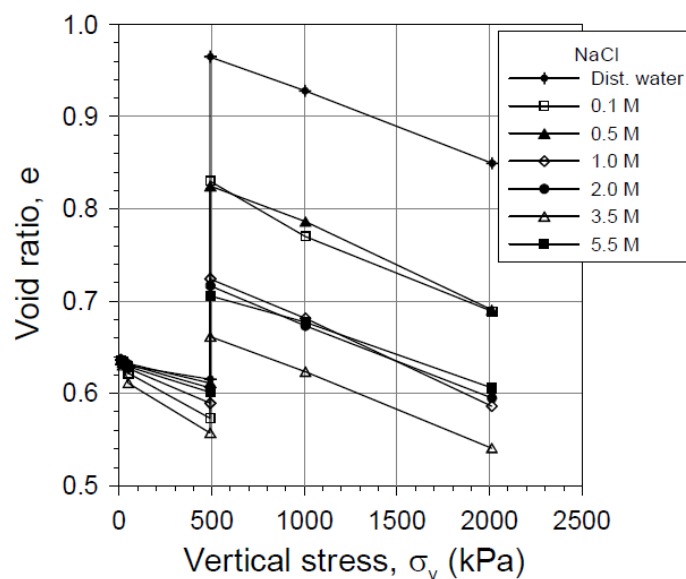


Figura 5-5 Curve edometriche della bentonite FEBEX (Castellanos et al., 2005)

5.4. Ipotesi per la formulazione del modello DEM

La modellazione attraverso il metodo DEM della reale dimensione dei singoli aggregati è sicuramente un'operazione onerosa e, dato lo stato preliminare di questo studio, si è deciso di limitarsi all'ipotesi di aggregati sferici di dimensioni uniformi.

Si è inoltre optato per l'utilizzo di aggregati non porosi (per limitare la complessità del problema) così da permettere la modellazione della sola macroporosità. Gli aggregati risultano, ad ogni modo, deformabili.

Per l'ipotesi di aggregati con dimensioni uniformi, sarà pertanto necessario estrapolare un valore unico medio rappresentativo del diametro degli aggregati e questo, come si vedrà nel seguito, può essere determinato dai risultati del MIP, sulla base di alcuni modelli di "fabric" semplificati.

Per fare ciò è necessario, dapprima, definire una soglia, cioè un valore di diametro dei pori che segni in maniera netta il passaggio da micro a macro porosità e viceversa. In particolare modo, i diametri che si trovano alla destra di tale limite possono essere inglobati all'interno della macroporosità, mentre quelli a sinistra alla microporosità.

L'ipotesi di base per definire la soglia è la seguente: una volta compattati, i campioni vengono saturati con il fluido di interesse e si assiste al processo del rigonfiamento, in cui accrescono le dimensioni dei micropori e si riducono quelle dei macropori. In particolare modo, la dimensione massima che può essere raggiunta dai micropori è quella minima dei macropori. Pertanto, tale soglia rappresenta allo stesso tempo il limite superiore per la dimensione dei micropori e quello inferiore per la dimensione dei macropori.

Se si prendono in considerazione le PSD relative al campione "as-compacted" e a quello saturato con acqua distillata, queste rappresentano una "fotografia" del fenomeno di variazione della dimensione dei pori all'interno del campione. Infatti, la curva relativa alla condizione "as-compacted" descrive la microstruttura del campione compattato a secco e ben evidenzia la presenza delle due tipologie di porosità descritte precedentemente. La PSD relativa al campione saturato con acqua distillata, invece, descrive la microstruttura che contraddistingue il campione a seguito del rigonfiamento, in cui i micropori hanno accresciuto la loro dimensione, mentre i macro hanno subito una riduzione, assistendo al passaggio da curva bi-modale a quella con un solo picco.

Assumendo che il campione saturato con acqua distillata è quello a cui corrisponde l'entità di rigonfiamento maggiore (rispetto ai campioni saturati con soluzione salina), si può

affermare che questo è contraddistinto dalla massima dimensione dei micropori e dalla minima dei macropori.

Quindi, la soglia è stata scelta come quel valore di diametro associato al picco della curva monomodale relativa all'acqua distillata corrispondente ad un valori pari a circa 1000 nm (Musso et al., 2013) (Figura 5-6).

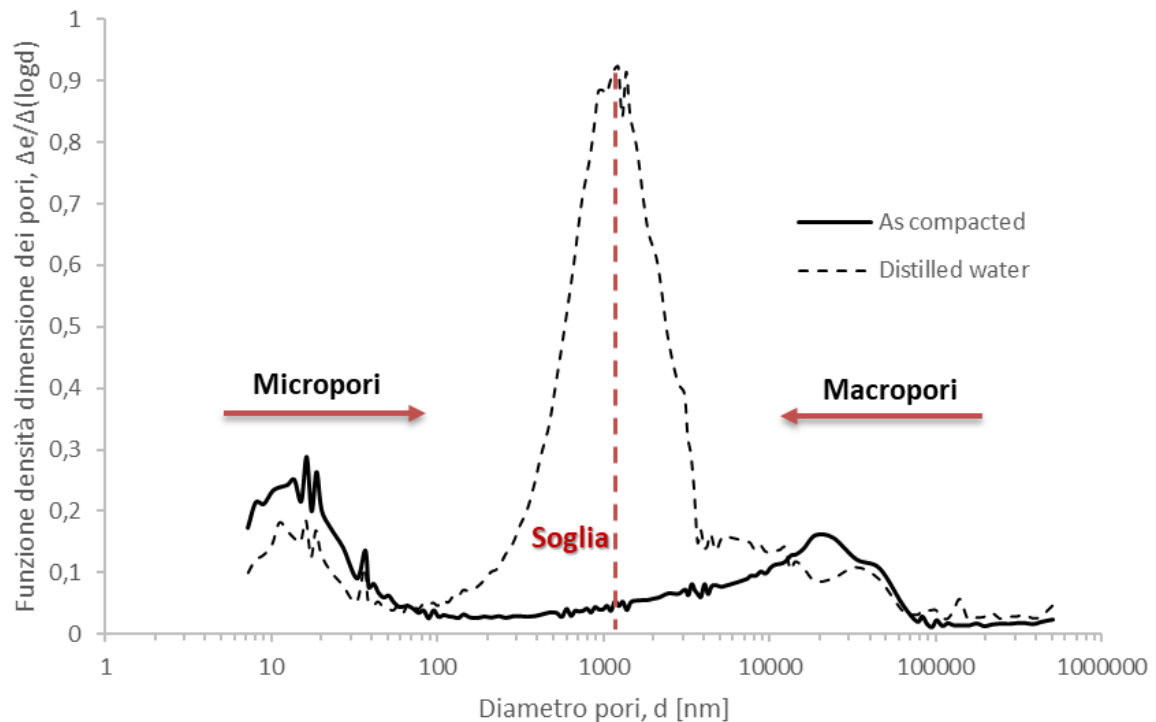


Figura 5-6 Variazione della PSD in seguito al rigonfiamento e valutazione della soglia tra micro e macro porosità

A questo punto, è possibile associare alla macroporosità ed alla microporosità tutti quei pori con diametro, rispettivamente, superiore ed inferiore ai 1000 nm.

Definita tale soglia, è possibile risalire alle grandezze di interesse (e_m , e_M e diametro medio dei macropori).

In particolar modo, nell'esecuzione delle porosimetrie il mercurio viene iniettato con una pressione che aumenta linearmente nel tempo, in maniera tale da rintracciare pori con diametro via via più piccolo (equazione di Washburn).

Quindi con la generica pressione di iniezione p_i si riescono ad intrudere i pori con diametro d_i , cui corrisponde un indice dei vuoti incrementale Δe_i , che rappresenta una certa frazione dell'indice dei vuoti totale del campione. Pertanto, considerando diverse pressioni di iniezione è possibile associare ad ogni famiglia di pori (d_i) il corrispondente contributo Δe_i a quello complessivo del campione.

Infatti, sommando tutti i vari contributi, si ottiene una curva cumulata del tipo (Figura 5-7):

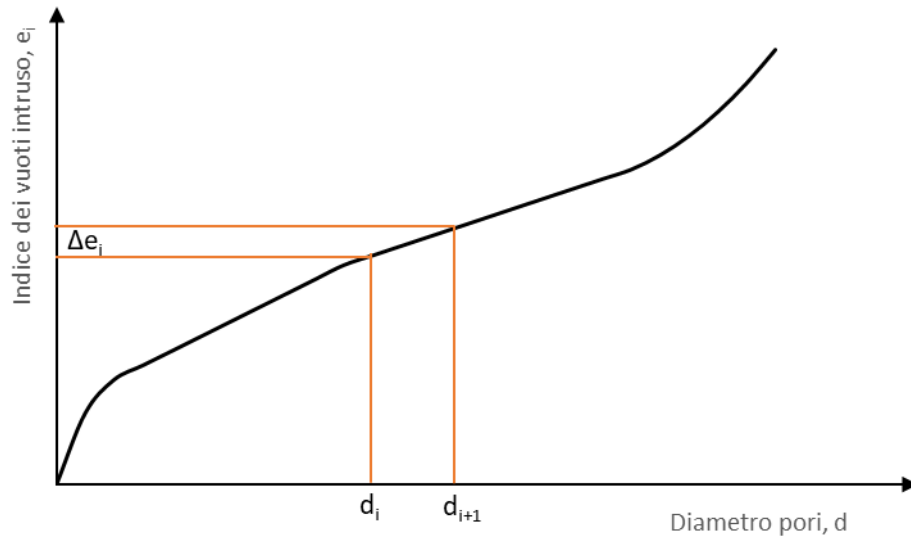


Figura 5-7 Curva cumulata dell'indice dei vuoti intruso

In cui sulle ordinate è riportato l'indice dei vuoti intruso (e_i) e sulle ascisse i diametri dei pori. Ovviamente, l'ultimo valore di indice dei vuoti della curva cumulata corrisponde a quello complessivo del campione (a meno di un certo range di pori che non possono essere rintracciati dall'intrusione del mercurio perché o troppo piccoli o troppo grandi).

Quindi, se in realtà l'indice dei vuoti complessivo è dato dalla somma dei contributi di diverse famiglie di pori, assumere un diametro medio rappresentativo (d_{poro}) vuol dire andare a ricavare un'unica famiglia di pori equivalente media a cui corrisponde lo stesso indice dei vuoti complessivo del campione.

Ovvero, in formule:

$$\sum_{i=1}^n d_i \left(\frac{A_{p,i}}{A_s} \right) = d_{poro} \frac{n \bar{A}_p}{A_s} \quad (1.35)$$

In cui $A_{p,i}$ è l'area dei pori corrispondente all' i -esima famiglia, A_s è l'area del solido, n è il numero di famiglie di pori e $\bar{A}_p$ l'area media dei pori.

Il termine $n \bar{A}_p / A_s$ rappresenta l'indice dei vuoti complessivo del campione mentre $A_{p,i} / A_s$ l'indice dei vuoti incrementale relativo all' i -esima famiglia, pertanto, la (1.35) può essere riscritta come:

$$\sum_{i=1}^n d_i \Delta e_i = d_{poro} e \quad (1.36)$$

Da cui si ricava l'espressione del diametro medio rappresentativo dei pori:

$$d_{poro} = \frac{\sum_{i=1}^n d_i \Delta e_i}{e} \quad (1.37)$$

Questo corrisponde ad eguagliare l'area sottesa dalla curva cumulata a quella di un rettangolo equivalente con altezza e (indice dei vuoti complessivo del campione) e base d_{poro} (Figura 5-8).

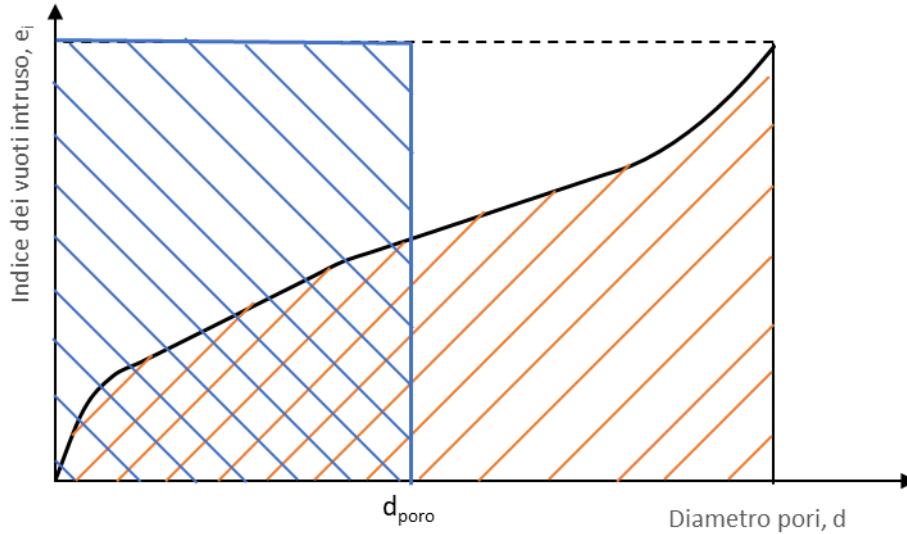


Figura 5-8 Calcolo del d_{poro} con il metodo di uguaglianza delle aree

In realtà, come si è già detto precedentemente, nel modello numerico si considera esclusivamente la macroporosità. Pertanto, il d_{poro} che deve essere valutato è quello medio rappresentativo delle famiglie che contribuiscono solo all'indice dei vuoti macro.

Quindi, la (1.37) deve essere riscritta nel seguente modo:

$$d_{poro} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta e_{i,M} d_i}{e_M} \quad (1.38)$$

con $\Delta e_{i,M}$ indice dei vuoti incrementale macro.

In tal senso la definizione di una soglia di diametro tra micro e macroporosità è un'operazione necessaria e imprescindibile.

Banalmente, la valutazione degli indici dei vuoti micro e macro si effettua sommando i rispettivi contributi incrementali:

$$e_m = \sum_{i=1}^n \Delta e_{i,m}; e_M = \sum_{i=1}^n \Delta e_{i,M} \quad (1.39)$$

Sulla base dei ragionamenti appena esplicitati, si riportano in Tabella 3 i risultati ottenuti in termini di d_{poro} , e , e_m ed e_M :

Tabella 3 Valori di diametro medio dei pori e indici dei vuoti dedotti dal MIP

	d_{poro} [nm]	e [-]	e_M [-]	e_m [-]
Acqua distillata	2,50E+04	0,99	0,37	0,45
NaCl 0,5M	4,1E+04	0,85	0,39	0,33
NaCl 2M	6,1E+04	0,77	0,38	0,28
NaCl 3,5M	6,5E+04	0,75	0,46	0,2
NaCl 5,5M	8,1E+04	0,75	0,46	0,2

Adesso, avendo assunto che il terreno in esame è costituito da una serie di aggregati sferici uguali tra di loro, questi possono disporsi all'interno del volume secondo una tessitura regolare e ripetitiva.

Uno schema delle diverse tipologie semplificate di "fabric" considerate è riportato in Figura 5-9 (Santamarina, 2001):

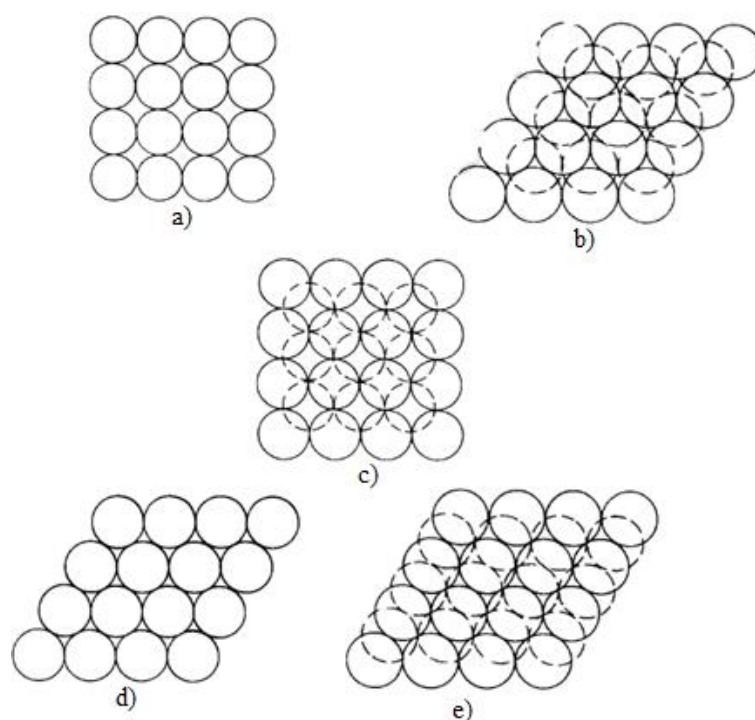


Figura 5-9 Schemi di arrangement "fabric": a) cubico, b) tetraedrico, c) piramidale, d) cubico tetraedrico, e) tetragonale sfenoidale

Sulla base di tali schemi è stato possibile definire, attraverso semplici considerazioni geometriche, delle relazioni tra il diametro medio rappresentativo dei pori e quello degli aggregati.

Prima di mostrare le relazioni ottenute, è però necessario effettuare alcune precisazioni sui ragionamenti effettuati per l'assunzione di tali modelli semplificati.

I risultati sperimentali dicono che, nonostante un indice dei vuoti complessivo maggiore, la conducibilità idraulica dei campioni permeati con acqua è inferiore a quella dei campioni permeati con soluzione salina o altro fluido non acquoso con costante dielettrica inferiore a quella dell'acqua. Le porosimetrie confermano che, in realtà, ciò che accade è una riduzione netta della microporosità dovuta al collasso degli aggregati (passando da acqua ad altro fluido non acquoso gli aggregati hanno dimensioni inferiori), con parallelo incremento dei macropori (responsabili del flusso del fluido interstiziale).

Se si considera l'espressione dell'indice dei vuoti macro, questo viene definito “banalmente” come il rapporto tra volume dei vuoti macro su quello del solido:

$$e_M = \frac{V_{VM}}{V_s} \quad (1.40)$$

Se si considerasse una sola “fabric”, uguale quindi per tutti e due i fluidi utilizzati, e si effettuasse la modellazione sulla base della sola dimensione degli aggregati, in un caso o nell'altro l'indice dei vuoti che si otterrebbe sarebbe esattamente lo stesso. Cioè, la sola variazione della dimensione degli aggregati non è sufficiente a spiegare le variazioni di macroporosità.

Pertanto, per le ipotesi fatte in precedenza, l'unico modo per spiegare l'incremento di macroporosità dovuto all'incremento della salinità del fluido interstiziale (o alla riduzione della costante dielettrica) è assumere un cambio di disposizione passando da uno all'altro fluido.

Sulla base dei ragionamenti appena descritti, per ogni singolo modello semplificato, sono stati definiti i valori di e_M e del rapporto tra il diametro medio rappresentativo del poro e quello dell'aggregato.

In tal modo, se si conosce il valore di e_M e il valore medio del diametro del poro (dai risultati del MIP), è possibile definire il modello semplificato più verosimile per il provino e ricavare il corrispondente diametro medio degli aggregati, input dell'analisi numerica.

L'analisi è basata sul fatto che il poro è un'entità bidimensionale e che il diametro considerato dal MIP è quello di ingresso del poro (cioè il più piccolo).

Il rapporto tra poro rappresentativo e diametro dell'aggregato ricade quindi solo all'interno di due configurazioni: cella elementare quadrata o triangolare (Figura 5-10).

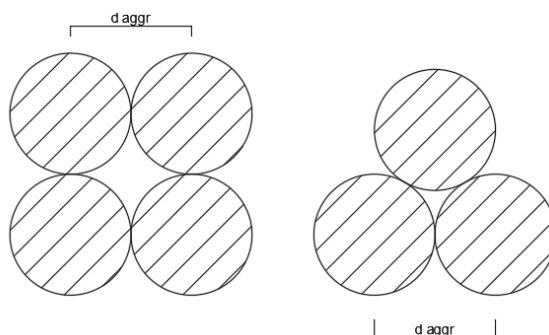


Figura 5-10 Celle elementari quadrata e triangolare

Per ogni singolo schema sono state ricavate, quindi, le seguenti caratteristiche:

Tabella 4 Valori di indice dei vuoti relativo alla macroporosità e rapporti tra i diametri del poro e dell'aggregato per i diversi modelli semplificativi

Configurazione	ϵ_M	d_{poro}/d_{agg}
CUBICA	0.91	$\sqrt{\frac{4 - \pi}{\pi}} \cong 0.46$
TETRAEDRICA	0.65	$\sqrt{\frac{2\sqrt{3} - \pi}{\pi}} \cong 0.23$
PIRAMIDALE	0.43	$\sqrt{\frac{4 - \pi}{\pi}} \cong 0.46$
TETR. CUBICA	0.35	$\sqrt{\frac{2\sqrt{3} - \pi}{\pi}} \cong 0.23$
SFENOIDALE	0.35	$\sqrt{\frac{2\sqrt{3} - \pi}{\pi}} \cong 0.23$

Da notare che d_{poro} è la dimensione del diametro del cerchio equivalente all'area del vuoto della cella elementare di Figura 5-10.

Considerando i valori riportati in Tabella 3, si nota che l'indice dei vuoti macro per il campione saturato con acqua distillata è pari a 0,37. Ciò vuol dire che questo può essere associato alla "fabric" tetraedrica cubica o sfenoidale. In ambedue i casi il rapporto tra i diametri del poro e dell'aggregato risulta essere pari a 0,23. Pertanto, essendo il diametro del poro (valutato in funzione dei risultati del MIP) pari a:

$$d_{poro,H2O} = 25 \mu m$$

Si ricava che:

$$d_{agg,H2O} = \frac{d_{poro,H2O}}{0,23} \cong 110 \mu m$$

A questo punto, si consideri l'espressione relativa al volume del singolo aggregato in funzione dell'indice dei vuoti micro:

$$V_{agg} = V_s(1 + e_m) \quad (1.41)$$

Per l'ipotesi di aggregato sferico si può scrivere:

$$V_{agg} = \frac{\pi d_{agg}^3}{6} \quad (1.42)$$

Combinando la (1.27) e la (1.28) si risale alla seguente espressione:

$$\frac{d_{agg,H2O}}{d_{agg,sale}} = \sqrt[3]{\frac{1 + e_{m,H2O}}{1 + e_{m,sale}}} \quad (1.43)$$

Prendendo ad esempio il campione relativo ad una concentrazione molare pari a 5,5M si ottiene che:

$$\frac{d_{agg,sale}}{d_{agg,H2O}} \cong 0,94$$

Ciò significa che:

$$d_{agg,sale} = 0,94 d_{agg,H2O} \cong 100 \mu m$$

Sulla base di tali semplici relazioni, si è riusciti a risalire a valori indicativi di diametro degli aggregati che saranno utilizzati come input dell'analisi numerica. Si nota dai numeri ottenuti come il diametro degli aggregati relativo al campione bagnato con acqua distillata sia circa il 10% più grande di quello dei campioni bagnati con soluzione salina.

Una volta definito il diametro degli aggregati, è necessario definire un valore di "polidispersività", intesa come il rapporto tra il diametro più grande e più piccolo degli aggregati. Questo è necessario per ottenere un insieme di particelle che abbiano una certa varietà di dimensioni (diametri) in maniera tale da riprodurre in qualche modo l'eterogeneità reale del materiale ed evitare che durante l'analisi numerica le particelle si dispongano secondo una tessitura regolare.

5.5. Valutazione dell'interazione elettrochimica e meccanica tra gli aggregati

È necessario scegliere a questo punto la legge costitutiva della singola particella sulla base del legame forza-overlap. Questa è una fase molto delicata in quanto materiali come la bentonite sono contraddistinti da un'attività chimica molto intensa e oltre alle azioni meccaniche, si dovrebbe considerare anche l'interazione elettrochimica tra le particelle (Teoria DLVO).

A tal proposito, è possibile effettuare una valutazione sommaria dell'entità delle azioni di repulsione (doppio strato) e attrazione (Van Der Waals) sulla base delle relazioni esplicitate al paragrafo 1.4.

Tenendo conto dei diametri degli aggregati valutati preventivamente, si è inizialmente valutato lo spessore approssimato del doppio strato tramite la (1.4) per i campioni bagnati con acqua distillata e soluzione salina con concentrazione 5,5M.

I risultati ottenuti sono i seguenti:

Tabella 5 Entità dello spessore del doppio strato

Campione	$1/K$ [m]
Acqua	$9,64E-10$
NaCl 5.5M	$1,63E-10$

Si nota come nel caso di soluzione salina ci sia un abbattimento dello spessore del doppio strato di quasi un ordine di grandezza. Questo comporta che, per la teoria DLVO, nel caso di campione bagnato con soluzione salina di NaCl la risultante delle azioni elettrochimiche tra particelle sia contraddistinta in maniera preponderante dalla componente attrattiva annullandosi quasi completamente l'aliquota repulsiva associata al doppio strato.

Infatti, applicando le equazioni (1.4), (1.7) e (1.10), in cui si inseriscono i valori di diametro degli aggregati e spessore del doppio strato ricavati precedentemente, si ottiene l'andamento delle azioni risultanti agenti tra due "particelle" nel caso di acqua distillata e soluzione salina 5.5M (Figura 5-11) (per convenzione si assumono con segno positivo le azioni repulsive):

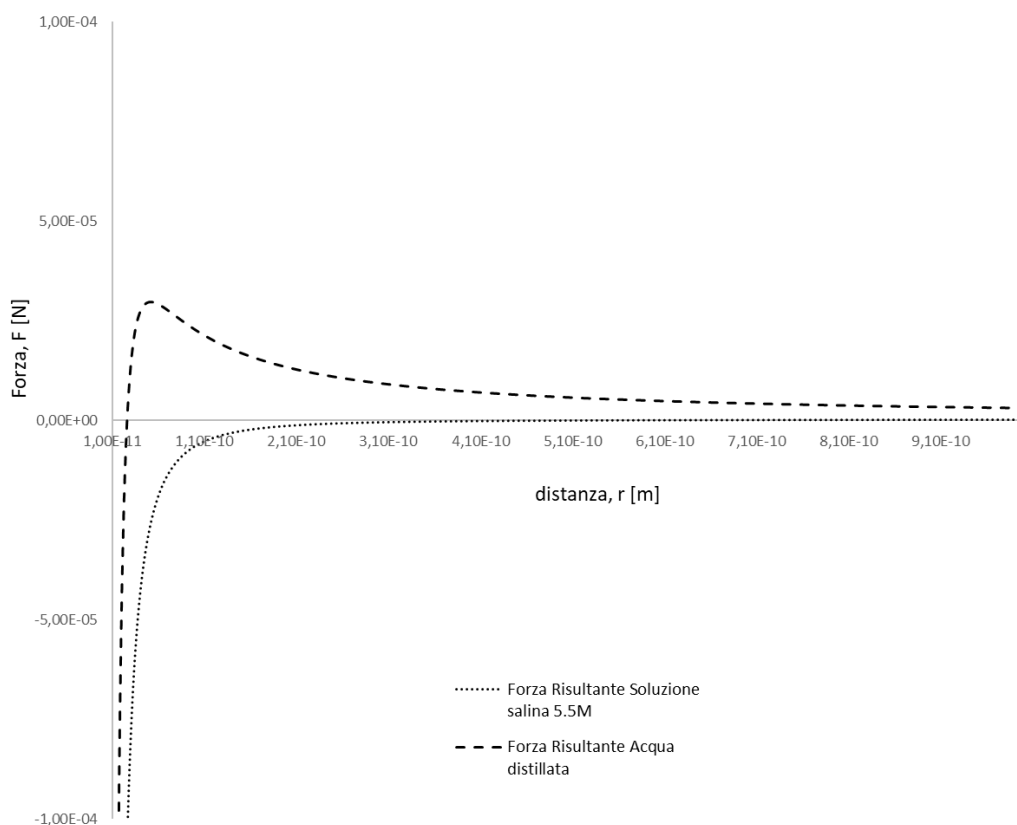


Figura 5-11 Risultante delle azioni di natura elettrochimica per Acqua distillata e Soluzione di NaCl 5.5M

A rigore, inoltre, se si considera il contatto tra due generiche particelle sotto l'azione di forze meccaniche applicate esternamente, questo dovrebbe seguire un andamento di tipo Hertziano (Figura 5-12).

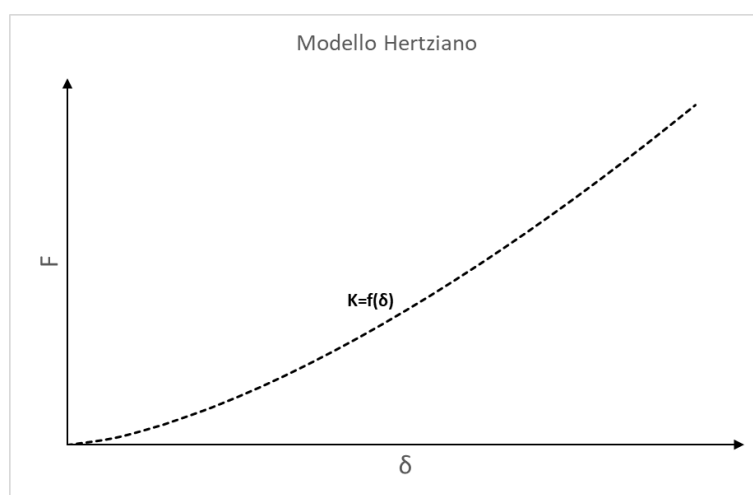


Figura 5-12 Modello Hertziano per il contatto tra due particelle

Ovvero, man mano che la sovrapposizione δ tra le due particelle aumenta si incrementa la loro rigidezza, che risulta, pertanto, una funzione del δ stesso secondo la seguente espressione:

$$K_N = \frac{G_g d^{1/2}}{1 - \nu} \delta^{1/2} \quad (1.44)$$

In cui G_g , ν e d sono, rispettivamente, modulo di taglio, coefficiente di Poisson e diametro della particella.

Considerare una legge di questo tipo, però, complicherebbe notevolmente il problema. Si è pertanto deciso di semplificare il modello Hertziano attraverso una sua linearizzazione, cioè assumendo una rigidità “media” semplificativa (Figura 5-13).

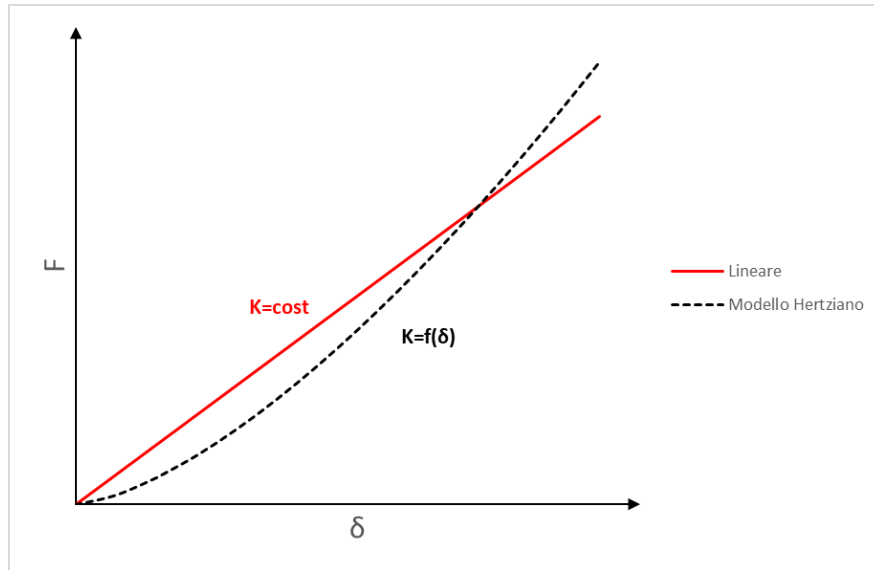


Figura 5-13 Legge costitutiva viscoelastica lineare semplificata per il contatto tra particelle

Ovviamente, quest’ultima rappresenta esclusivamente l’interazione meccanica tra le particelle, che inizia nel momento in cui queste entrano in contatto. Ma per ciò che si è detto sulla teoria DLVO, in realtà si dovrebbe tenere in conto anche dell’interazione elettrochimica. Linearizzando l’andamento delle curve rappresentate in Figura 5-11, le leggi di interazione tra particelle nel caso di provino bagnato con acqua distillata e soluzione salina potrebbero essere modellate nel seguente modo:

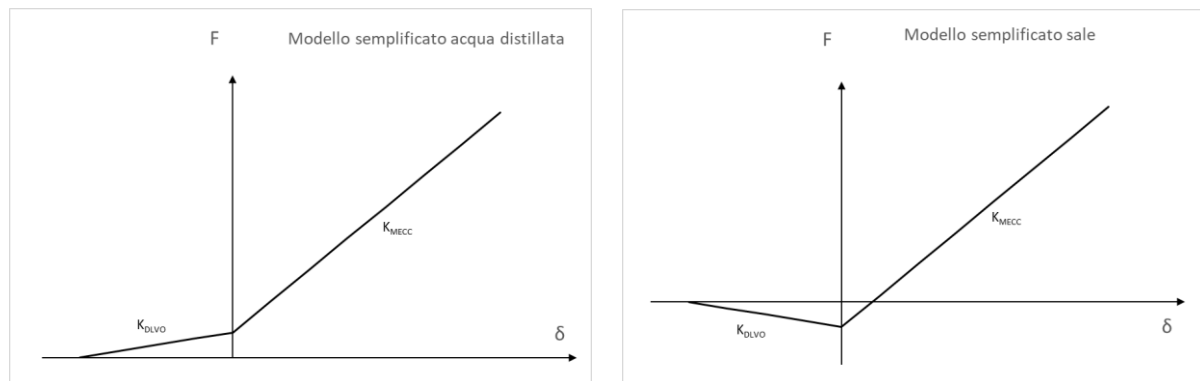


Figura 5-14 Leggi di interazione tra particelle semplificate con componente elettrochimica e meccanica

Per una legge di questo tipo è necessario settare diversi parametri, quali:

- Coefficiente di attrito;
- Rigidezza K_{MECC} del tratto relativo all'interazione meccanica;
- Rigidezza K_{DLVO} del tratto relativo all'interazione elettrochimica.

Per semplificare ulteriormente il problema, si è deciso di trascurare la componente di natura elettrochimica e considerare solo quella di natura meccanica. La legge definitiva assunta nelle analisi è pertanto quella lineare mostrata in Figura 5-13. Questa assunzione può avere senso nel momento in cui si assume che il materiale sia costituito da aggregati di “grandi” dimensioni, se rapportate a quelle delle particelle elementari di argilla, per i quali l'entità delle azioni elettrochimiche può essere considerata ininfluyente. Si riduce, pertanto, a due il numero di parametri del modello che dovranno essere calibrati con le analisi numeriche.

5.6. Calibrazione dei parametri per la simulazione DEM

Altro parametro di input da inserire è il numero di particelle da considerare all'interno del dominio. Premettendo che all'aumentare del numero di particelle cresce in maniera esponenziale anche il tempo computazionale dell'analisi, in tale sede si è deciso di utilizzare un numero complessivo di particelle pari a 125. In questo modo si ottiene un buon compromesso tra i tempi computazionali e la veridicità del modello numerico.

In particolar modo, questo è il numero di particelle che ricade all'interno del REV (volume rappresentativo dell'intero campione). Cioè, per eliminare eventuali problemi di bordo, si va a considerare un elemento rappresentativo centrale del campione, lontano quindi dalle pareti della strumentazione, e si analizza il comportamento di questo. Per simulare ciò in Mercury DPM si è scelto di adottare contorni del modello appartenenti alla categoria “*periodic wall*”. In questo modo è come se le particelle che si trovano ai bordi del dominio fossero in contatto con le particelle di altri domini adiacenti.

Una volta ricavati tutti i parametri di input è possibile costruire il modello e lanciare l'analisi.

In realtà, come detto precedentemente, ancora è necessario tarare i valori di rigidità della legge costitutiva per la singola particella (K) e il valore del coefficiente di attrito. È bene ricordare che questi sono “microparametri”, ovvero riferiti alla microscala, e non hanno nulla a che vedere con quelli che sono rigidità e attrito dell'intero provino (comportamento globale del campione) valutati attraverso le prove di laboratorio. Pertanto, è necessario considerare una procedura di *calibrazione* per la loro determinazione. Questo vuol dire che, a partire da un certo range di valori relativamente ampio, si lanciano una serie di analisi e si scelgono come parametri definitivi quelli che meglio approssimano l'andamento sperimentale. La calibrazione deve poi essere seguita da una fase di *validazione*. Quindi, a partire dai risultati sperimentali relativi ad un'ulteriore prova di laboratorio totalmente indipendente da quella usata nella fase di calibrazione, si verifica che i parametri individuati siano rappresentativi del materiale considerato. In realtà, nel caso in esame, a causa della scarsità di risultati a disposizione, si è effettuata la calibrazione sul primo punto della curva e la validazione su quelli successivi.

L'analisi è stata suddivisa essenzialmente in tre fasi:

- 1) Creazione modello;
- 2) Compressione Isotropa;
- 3) Compressione Assiale.

Nella prima fase viene generato il modello e quindi le particelle a partire dall'assegnazione di un valore di indice dei vuoti iniziale. Si è scelto in questo caso un valore pari ad $e = 1$ che corrisponde ad una configurazione in cui le particelle non si toccano. Si dice in questo caso che il materiale si trova nella “condizione di gas” (Figura 5-15 (a)).

Successivamente si applica una velocità di spostamento costante ai contorni della “scatola” rappresentante il REV. In questo modo le particelle cominceranno ad avvicinarsi e nel momento in cui si toccano iniziano a svilupparsi le forze in corrispondenza dei contatti e, di conseguenza, le tensioni (Figura 5-15 (b)).

In questa fase viene calibrato il valore di K . In particolar modo si fissa come obiettivo il valore di indice dei vuoti sperimentale.

Non appena viene raggiunto questo valore la computazione si arresta e si può leggere il corrispettivo valore di tensione raggiunto. Il K idoneo sarà quello per il quale si ottiene l'esatta corrispondenza tra i valori di indice dei vuoti e tensione numerici con quelli sperimentali.

Infine, calibrato il K , si effettua la compressione edometrica considerando il movimento dei contorni nella sola direzione Z (Figura 5-15 (c)), che coinciderà con la fase di validazione dei parametri scelti.

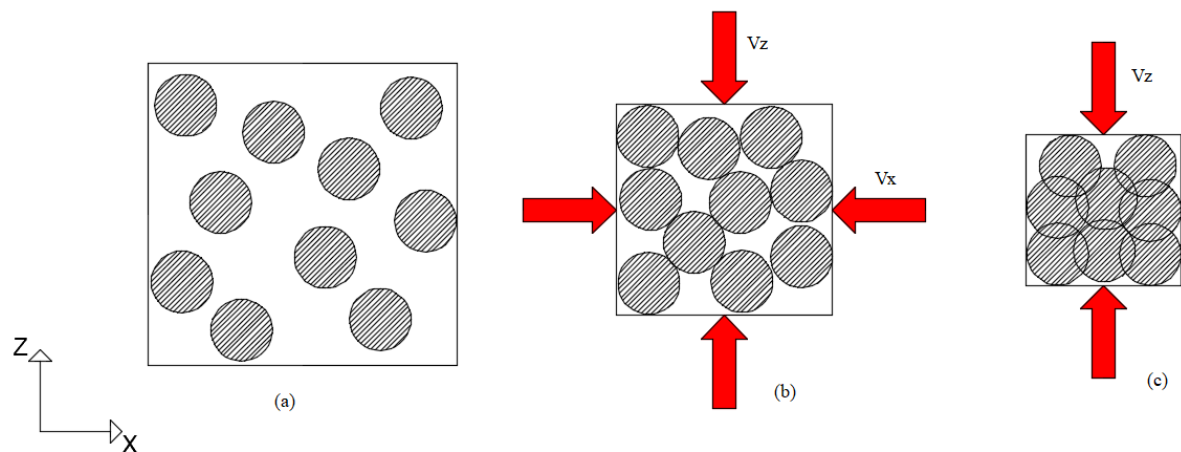


Figura 5-15 Schematizzazione delle fasi dell'analisi numerica: (a) Creazione dominio, (b) Compressione isotropa e (c) Compressione edometrica

Quello che si simula con l'analisi numerica è esclusivamente la fase di carico edometrico, trascurando, pertanto, la storia di carico subita dal campione nella fase di preparazione (compattazione e rigonfiamento). Simulare anche questa fase richiederebbe un dispendio computazionale non indifferente. Per i tempi a disposizione, si è pertanto deciso di applicare tale semplificazione. Ovviamente, si è consapevoli del fatto che questa ha un'incidenza

considerevole sul comportamento complessivo del campione soggetto a prova edometrica e, a rigore, dovrebbe essere presa in considerazione nel modello numerico.

Pertanto, l'indice dei vuoti "iniziale" e la corrispondente tensione sono stati scelti come quelli ottenuti a seguito della saturazione dei campioni (punti contrassegnati in rosso in Figura 5-16).

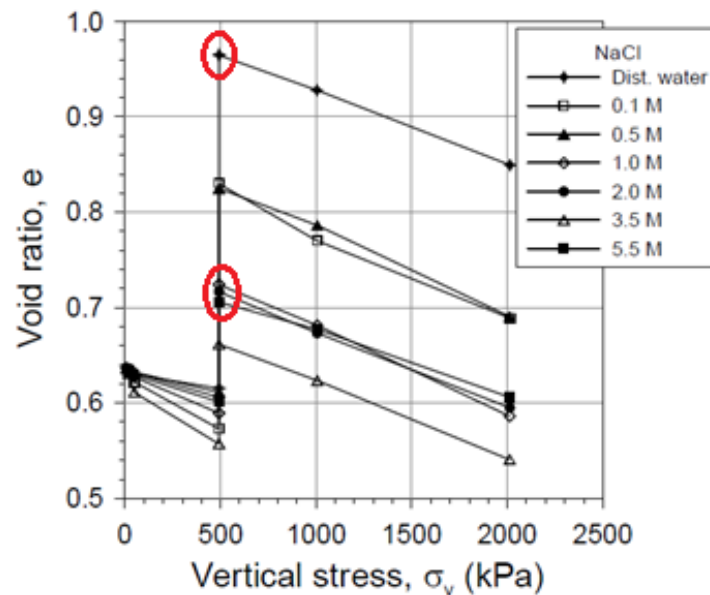


Figura 5-16 Punti iniziali per la calibrazione dei parametri

Sono state considerate tre ipotesi differenti sia per i campioni con acqua distillata che con soluzione salina, ovvero:

- a) Ipotesi con attrito presente in tutte le fasi;
- b) Ipotesi con attrito presente solo nella fase di compressione assiale;
- c) Ipotesi con assenza di attrito;

In particolar modo, con le ipotesi *a* e *b* si simulano, rispettivamente, la condizione di provino normalconsolidato e quella di provino sovraconsolidato. Questo ha senso farlo se si considera il processo di preparazione del campione: compattazione a secco, imbibizione con il fluido di interesse, cui segue una fase di rigonfiamento a carico costante, e infine applicazione dei carichi edometrici.

Per quanto riguarda l'ipotesi *c*, invece, questo è stato preso in considerazione per verificare qual è l'effettivo contributo dell'attrito in un problema del genere.

Per il modello con acqua distillata sono stati presi in considerazione due diversi valori di coefficiente di attrito: $\mu=0.14$ ($\varphi = 8^\circ$) e $\mu=0.47$ ($\varphi = 25^\circ$). Per il modello con soluzione salina 5.5M, invece, è stato usato solo il valore $\mu=0.47$. Tali valori sono stati scelti sulla base di quelli proposti in letteratura (Mitchell & Soga, 2005). Questi, però, fanno

riferimento alla macroscale, cioè descrivono il comportamento globale dell'intero campione, mentre, come detto in precedenza, tale coefficiente fa riferimento alla microscale e dipende dall'interazione tra due particelle e dalle molecole comprese all'interno dello spazio interparticellare. In particolar modo, nei terreni a grana fine particolarmente "attivi", quale la bentonite, bisogna considerare anche il fatto che c'è la tendenza a formare aggregati e macroparticelle durante il processo di formazione del terreno, pertanto, la resistenza allo scorrimento del mezzo è controllata dall'interazione tra aggregati piuttosto che particelle (Santamarina, 2001).

È pertanto probabile che la scelta più opportuna sia introdurre un coefficiente di attrito relativo non più alla microscale, ma piuttosto alla mesoscale, e quindi a maggior ragione uguale per i due modelli (con acqua e con sale).

5.7. Risultati dell'analisi numerica

A seguito della fase di calibrazione sono stati determinati i seguenti parametri (Tabella 6 e Tabella 7):

Tabella 6 Parametri per il modello con Acqua distillata

Acqua distillata	
d [μm]	110
μ_1	0,14
μ_2	0,47
K_{NC} [N/m]	70000
K_{OC} [N/m]	94000

Tabella 7 Parametri per il modello con soluzione salina di NaCl 3.5M

Soluzione NaCl 5,5M	
d [μm]	100
μ	0,47
K_{NC} [N/m]	90000
K_{OC} [N/m]	160000

Determinati i parametri soprascritti, è stato possibile eseguire le analisi numeriche che hanno restituito i seguenti risultati per il modello con acqua distillata (Tabella 8 e Figura 5-17):

Tabella 8 Risultati analisi numerica sul campione di bentonite FEBEX con acqua distillata

ACQUA DISTILLATA								
e	e_m	e_M	$\sigma_{sper.}$ [kPa]	σ_{DEM,OC_014} [kPa]	σ_{DEM,NC_014} [kPa]	$\sigma_{DEM,SA}$ [kPa]	σ_{DEM,OC_047} [kPa]	σ_{DEM,NC_047} [kPa]
0,96	0,45	0,35	500	500	500	500	500	500
0,93		0,33	1000	595,7	547,1	570,6	595,9	625,8
0,85		0,28	2000	904,7	730,2	812,1	907,3	810,7

Si è indicato con:

- σ_{sper} l'entità delle tensioni sperimentali applicate;
- σ_{DEM,OC_014} l'entità della tensione ricavata numericamente con il modello sovraconsolidato e coefficiente di attrito $\mu = 0.14$;
- σ_{DEM,NC_014} l'entità della tensione ricavata numericamente con il modello normalconsolidato e coefficiente di attrito $\mu = 0.14$;

- σ_{DEM,OC_047} l'entità della tensione ricavata numericamente con il modello sovraconsolidato e coefficiente di attrito $\mu = 0.47$;
- σ_{DEM,NC_047} l'entità della tensione ricavata numericamente con il modello normalconsolidato e coefficiente di attrito $\mu = 0.47$;
- $\sigma_{DEM,SA}$ l'entità della tensione ricavata numericamente con il modello senza attrito.

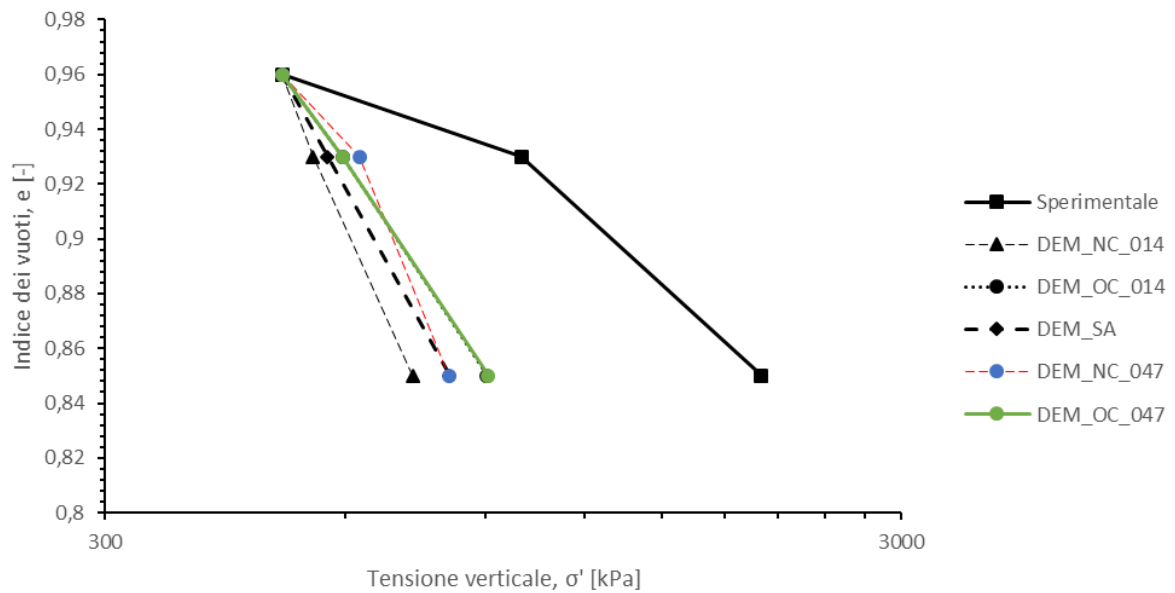


Figura 5-17 Risultati analisi numerica sul campione di bentonite FEBEX con acqua distillata

Mentre per la soluzione salina 5.5M si ha che (Tabella 9 e Figura 5-18):

Tabella 9 Risultati analisi numerica sul campione di bentonite FEBEX con soluzione salina di NaCl 5.5M

SOLUZIONE SALINA 5,5M						
e	e _m	e _M	$\sigma_{sper.}$ [kPa]	$\sigma_{DEM,OC}$ [kPa]	$\sigma_{DEM,NC}$ [kPa]	$\sigma_{DEM,SA}$ [kPa]
0,72	0,2	0,43	500	500	500	500
0,68		0,4	1000	857,4	640,3	780,8
0,60		0,33	2000	1671,3	972,1	1195,2

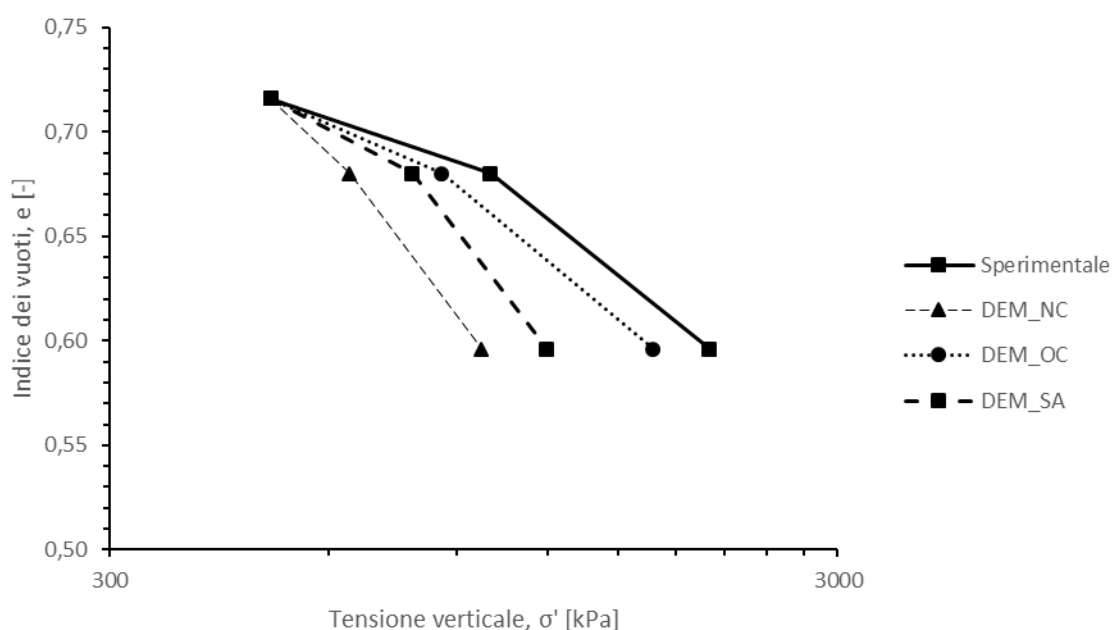


Figura 5-18 Risultati analisi numerica sul campione di bentonite FEBEX con soluzione salina di NaCl 5.5M

Qualche osservazione:

- La simulazione delle prove con acqua distillata non ha restituito risultati soddisfacenti. Le curve relative ai dati numerici sono abbastanza distanti da quella sperimentale. Il contributo del coefficiente di attrito non sembra essere così rilevante, dato che il miglioramento che si ha nel passare da $\mu = 0.14$ a $\mu = 0.47$ sembra essere davvero minimo. Il modello che più si avvicina a quello sperimentale è quello relativo alla condizione OC con $\mu = 0.47$;
- La simulazione delle prove con soluzione salina, invece, risulta essere molto più soddisfacente. La variazione tra le due curve, sperimentale e numerica, seppur con tutte le semplificazioni del caso, risulta essere molto ridotta. Anche in questo caso, il modello che meglio approssima l'andamento sperimentale è quello relativo al campione sovraconsolidato;

- La differenza che si ha nei due casi è da imputare, molto probabilmente, a due fattori: diversa porosità tra i due sistemi e ipotesi di aggregati di dimensioni (quasi) omogenee. Infatti, quello relativo alla soluzione salina è un sistema caratterizzato da una macroporosità nettamente maggiore rispetto a quella del campione con acqua distillata. Molto probabilmente, il codice di calcolo Mercury DPM analizza con maggior difficoltà sistemi di particelle più chiusi.
Inoltre, la dimensione omogenea degli aggregati fa sì che, durante la simulazione, le particelle tendano a disporsi secondo tessiture regolari e, pertanto, diventa molto più complicato raggiungere determinati valori di indice dei vuoti macro al di sotto di una certa soglia.

6. Conclusioni e possibili sviluppi futuri

Con il presente studio si è analizzata l'influenza del liquido interstiziale sulla microstruttura delle argille sature e, quindi, sul loro comportamento idro-meccanico.

La permeazione di un fluido non acquoso, con costante dielettrica inferiore a quella dell'acqua, causa il collasso del doppio strato nelle particelle di argilla e, di conseguenza, l'abbattimento delle azioni repulsive tra particelle. Per la teoria DLVO, quindi, l'interazione tra le particelle sarà dominata da azioni di natura attrattiva, a cui corrispondono fenomeni di flocculazione e/o collasso degli aggregati. In ambedue i casi si assiste ad un incremento dei macropori, responsabili del flusso del fluido, e pertanto, all'incremento di conducibilità idraulica mostrato dai risultati sperimentali.

Questo comporta che, quando tali materiali vengono impiegati in cambio ambientale per esempio per la realizzazione delle barriere nei siti contaminati, la loro efficacia è fortemente compromessa dal flusso di fluidi non acquosi.

La sperimentazione eseguita in laboratorio ha riguardato una bentonite sodica e un caolino, così da evidenziare i differenti effetti su minerali argillosi diversi. Inoltre, nel caso della bentonite, si sono studiati due strutture iniziali differenti, ossia quelle di campioni ricostituiti e di campioni compattati a secco. La sperimentazione ha così permesso di formulare una serie di osservazioni preliminari, ma comunque significative, sui fenomeni oggetto di studio.

fornito indicazioni importanti sul fenomeno appena descritto.

In particolar modo, dalle prove sperimentali condotte con permeametro e con edometro si è dedotto che l'influenza del contaminante è molto più evidente in un'argilla attiva come la bentonite piuttosto che in una inattiva come il caolino.

Relativamente al caso di campioni ricostituiti a partire dal limite liquido, se per il caolino l'incremento di conducibilità idraulica, in seguito alla permeazione con olio di paraffina, comporta un incremento inferiore all'ordine di grandezza, per la bentonite l'incremento è pari a quattro ordini di grandezza. Questo vuol dire che, senza dubbio, la microstruttura della bentonite subisce una variazione molto più marcata rispetto a quella del caolino.

Per via dell'elevata viscosità dell'olio di paraffina (due ordini di grandezza superiore a quella dell'acqua), in realtà il confronto va effettuato sulla permeabilità intrinseca, che è un parametro direttamente correlato alla dimensione dei pori e, quindi, alla microstruttura del campione. Così facendo, si è visto che tale parametro, a seguito della permeazione con olio di paraffina, subisce un incremento di circa dieci e due ordini di grandezza, rispettivamente,

per la bentonite e per il caolino. Questo dato evidenzia nuovamente come l'influenza sulla bentonite del contaminante sia molto più netta che sul caolino.

Relativamente all'influenza della struttura iniziale sul comportamento idraulico della bentonite, si è visto che i campioni saturi d'acqua mostrano una conducibilità idraulica maggiore nella condizione "compattato" rispetto a quella "ricostituito". Andamento totalmente opposto si ha, invece, considerando la saturazione con olio di paraffina. La bentonite ricostituita, essendo maggiormente soggetta all'influenza del fluido interstiziale, restituisce quindi i campi estremi di permeabilità, i cui valori sono intermedi nel caso della bentonite compattata.

Ciò è strettamente correlato alla microstruttura del campione che, in un caso, è caratterizzata da micro "particelle", disperse più o meno uniformemente all'interno della fase fluida, tendenti alla flocculazione (campione ricostituito), mentre nell'altro l'unità fondamentale è costituita dall'aggregato, inteso come un'entità a sé stante costituito dall'unione di micro "particelle" tenute insieme da legami idro-elettro-chemo-meccanici. In particolar modo, la variazione di microstruttura (incremento dei macropori), a cui è associato il drastico incremento di conducibilità osservato sperimentalmente, nei due casi sembra essere controllata da due scale differenti: flocculazione di singole particelle nel campione ricostituito e collasso degli aggregati nel campione compattato.

Se nel primo caso, le interazioni descritte dalla teoria DLVO sono direttamente correlate alle "particelle" che caratterizzano lo scheletro solido del campione ricostituito, nel secondo le forze di natura elettrochimica entrano in gioco nell'interazione intra-aggregato piuttosto che in quella inter-aggregato.

L'analisi numerica mediante Metodo agli Elementi Distinti (DEM) ha riguardato i risultati sperimentali di una bentonite compattata a secco e saturata con acqua a differenti salinità. L'introduzione di una serie di ipotesi semplificative ha comunque permesso un'ottima riproduzione dei risultati sperimentali per la bentonite saturata da una soluzione 5.5M di NaCl.

Cosa diversa, invece, per il modello relativo all'acqua distillata. Infatti, in quest'ultimo caso, l'andamento delle curve edometriche numeriche risulta abbastanza distante da quello sperimentale. Tale diversità è stata imputata a due fattori: omogeneità dimensionale degli aggregati e sistema saturo d'acqua più "chiuso" di quello saturo d'olio.

Alla luce di quanto detto, si propongono i seguenti possibili sviluppi futuri per il miglioramento di tale studio:

- Da un punto di vista sperimentale, si potrebbero eseguire ulteriori prove utilizzando differenti fluidi con un certo range di costanti dielettriche e viscosità, su campioni compattati a diverse densità. In questo modo si possono simulare diverse possibili condizioni di sito e prevedere cosa è possibile aspettarsi in ognuna di queste;
- Per quanto riguarda i modelli DEM, invece, si potrebbero prendere in considerazione leggi costitutive più sofisticate della semplice legge lineare assunta per simulare la sovrapposizione degli aggregati. Inoltre, si potrebbe riprodurre il materiale attraverso un insieme di elementi porosi che si deformino sotto l'effetto di variazioni di composizione chimica del fluido interstiziale, che rappresentano gli aggregati. Quindi, in tal modo, tenere conto anche della microporosità e non più solo di quella macro. Alla luce di quanto visto sperimentalmente in termini di rigonfiamento, è previsto che si possa introdurre una legge specifica che consenta di riprodurre l'espansione o il collasso dell'aggregato in funzione del fluido utilizzato.

Inoltre, si potrebbe incrementare la polidispersività delle particelle, prendendo in considerazione, ad esempio, distribuzioni granulometriche con variazione statistica. In tal modo si ridurrebbe il rischio di ottenere configurazioni con tessiture regolari di particelle, che impediscono di raggiungere valori di indice dei vuoti inferiori ad una certa soglia.

Bibliografia

- Abdul, A. S., Gibson, T. L., & Rai, D. N. (1990). Laboratory studies of the flow of some organic solvents and their aqueous solutions through bentonite and kaolin clays. *Ground Water*, 524-533.
- Bowders, J. J., & Daniel, D. E. (1987). Hydraulic conductivity of compacted clay to dilute organic chemicals. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1432-1448.
- Burghignoli, A. (s.d.). Lezioni di Meccanica delle Terre. Università di Roma La Sapienza.
- Candelaria, L., & Matsumoto, M. (2000). Effects of napl contaminants on the permeability of a soil-bentonite slurry wall material. *Transport in porous media*, 43-56.
- Castellanos, E., Musso, G., Romero, E., & Lloret, A. (2005, Marzo). Chemical influence on the hydro-mechanical behaviour of a high-density bentonite. *International meeting 'Clays in Natural & Engineered Barriers for Radioactive Waste Confinement'*.
- Fernandez, F., & Quigley, R. (1985). Hydraulic conductivity of natural clays permeated with simple liquid hydrocarbons. *Canadian Geotechnical Journal*, vol.22, 205-214.
- Fernandez, F., & Quigley, R. (1988). Viscosity and dielectric controls on the hydraulic conductivity of clayey soils permeated with water-soluble organics. *Canadian Geotechnical Journal*, vol.25, 582-589.
- Fernandez, F., & Quigley, R. (1991). Controlling the destructive effects of clay-organic liquid interactions by application of effective stresses. *Canadian Geotechnical Journal*, vol.28, 388-398.
- From soft and hard particle simulations to continuum theory for granular flow. (2017). In S. Luding, N. Rivas, T. Weinhart, F. Radjai, J.-Y. Delenne, L. Amarsid, . . . A. Thornton, *ALERT Doctoral School* (p. 3-9). Aussois: G. Combe, S. Luding, K. Taghizadeh.
- Gates, W. P., Nefiodovas, A., & Peter, P. (2004). Permeability of an organo-modified bentonite to ethanol-water solutions. *Clays and Clay Minerals* , 192-203.
- Gnanapragasam, N., Lewis, B. G., & Finno, R. J. (1995). Microstructural changes in sand-bentonite soils when exposed to aniline. *Journal of Geotechnical Engineering*, 119-125.
- Hueckel, T., Kaczmarek, M., & Caramuscio, P. (1997). Theoretical assessment of fabric and permeability changes in clays affected by organic contaminants. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.34, 588-603.
- Israelachvili, J. N. (1991). *Intermolecular and surface forces*. Academic Press.
- Mašin , D. (2013). Double structure hydromechanical coupling formalism and a model for unsaturated expansive clays Engineering Geology. *Géotechnique*, 73-88.

- Minniti, M. (2018). Comportamento chemo-meccanico di minerali argillosi. *Tesi di laurea*. Torino.
- Mitchell, J. K., & Soga, K. (2005). *Fundamentals of soil behavior (third edition)*. John Wiley & Sons.
- Musso, G., Romero, E., & Della Vecchia, G. (2013). Double-structure effects on the chemo-hydro-mechanical behaviour of a compacted active clay. *Geotechnique*, 206-220.
- Musso, G., Romero, E., & Jommi, C. (2012). Experimental techniques for multi-scale description of soil fabric and its dual pore network. In *ALERT Doctoral School* (p. 125-156).
- Santamarina, J. C. (2001). *Soil and Waves*. John Wiley & Sons.
- Tarantino, A. (s.d.). *Dispense_Tarantino/geotecnica_Classificazione dei materiali geotecnici*. Tratto da Sito Web Università degli Studi di Trento-Facoltà di Ingegneria: www.ing.unitn.it
- Uppot, J. O., & Stephenson, R. W. (1989). Permeability of clays under organic permeants. *Journal of Geotechnical Engineering*, 115-131.

Appendice

A.1. Grafici dei risultati ottenuti mediante procedura con il cucchiaio di Casagrande per la valutazione dei limiti liquidi del caolino e della bentonite

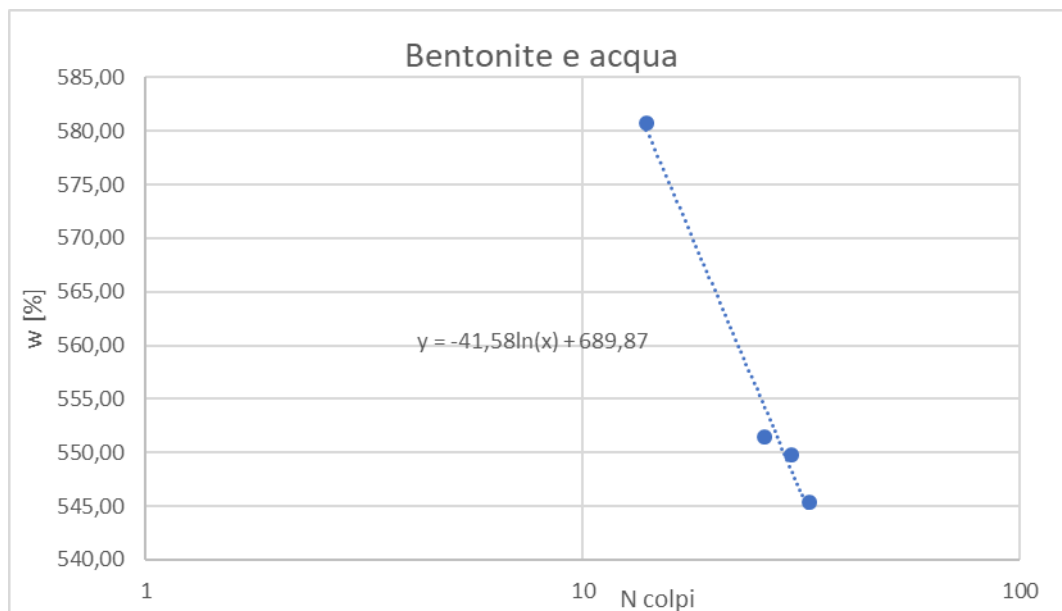


Figura A- 1 Retta interpolante per la valutazione del limite liquido per la miscela Bentonite-Acqua distillata

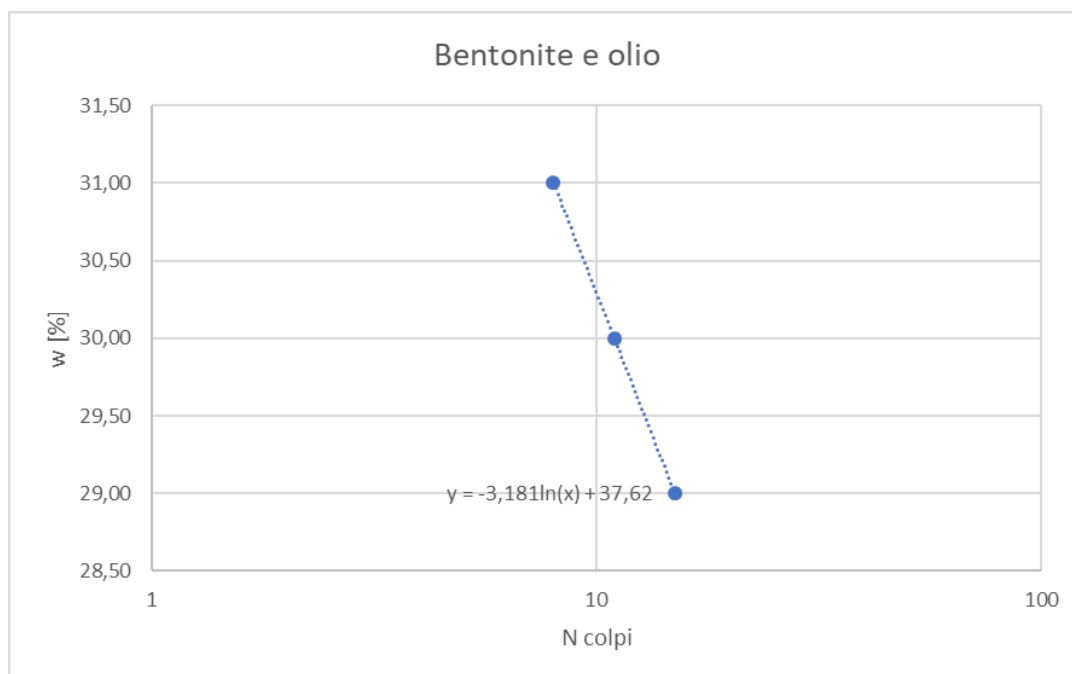


Figura A- 2 Retta interpolante per la valutazione del limite liquido per la miscela Bentonite-Olio di paraffina

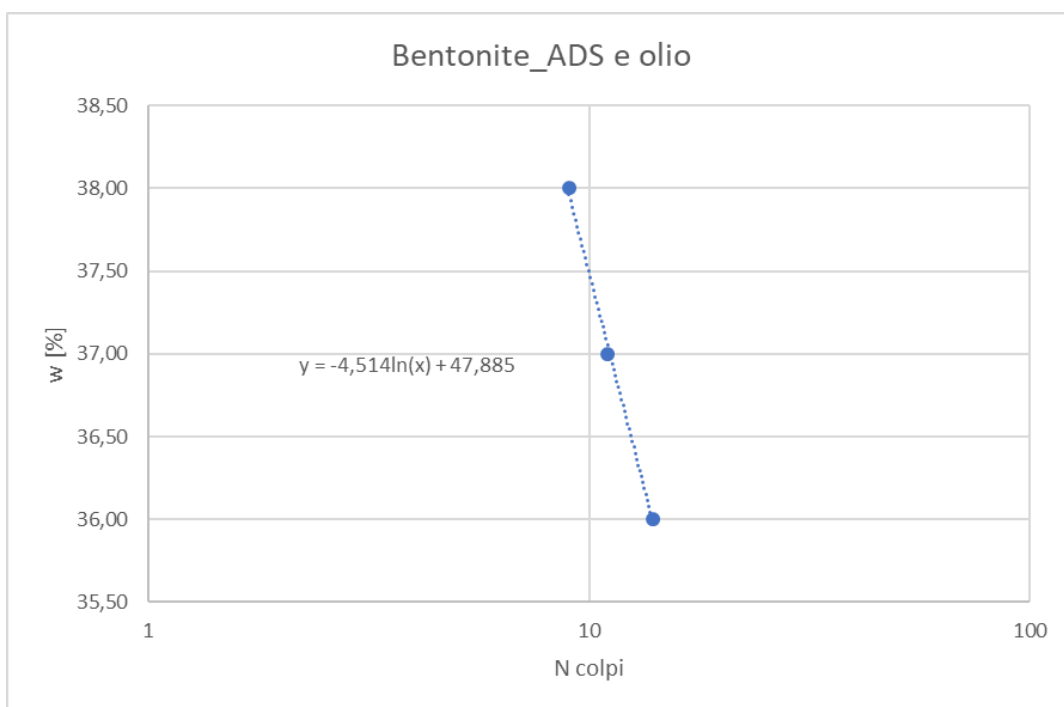


Figura A- 3 Retta interpolante per la valutazione del limite liquido per la miscela Bentonite essiccata in forno a 60°-
Olio di paraffina

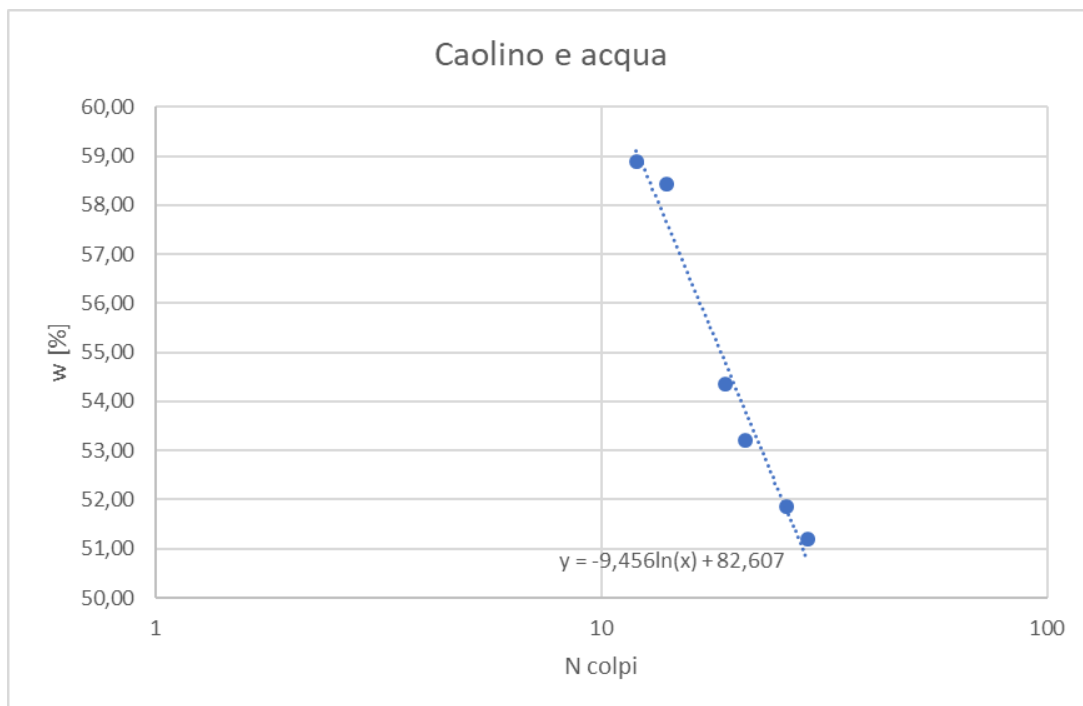


Figura A- 4 Retta interpolante per la valutazione del limite liquido per la miscela Caolino-Acqua distillata

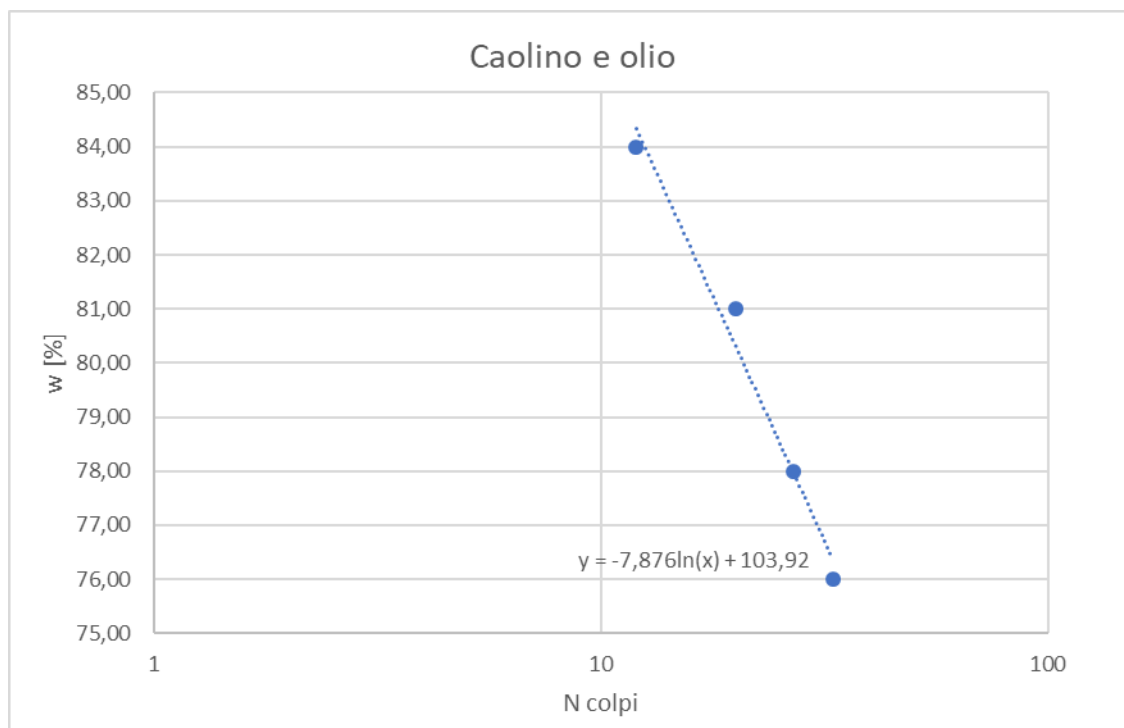


Figura A- 5 Retta interpolante per la valutazione del limite liquido per la miscela Caolino-Olio di paraffina

A.2. Curve di consolidazione dei campioni ricostituiti di bentonite saturati con olio di paraffina

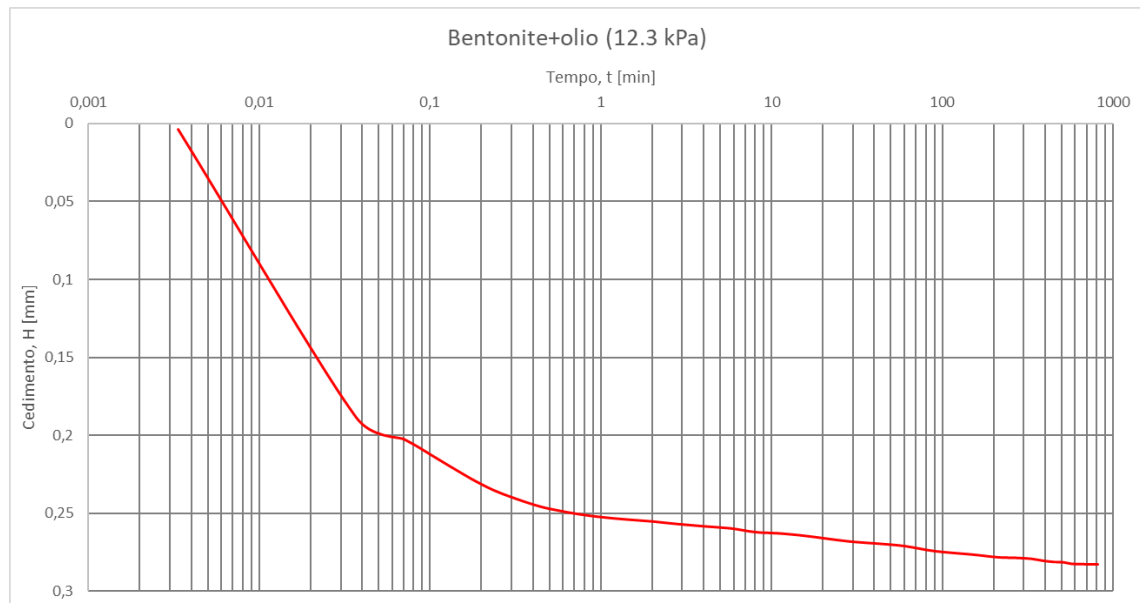


Figura A- 6 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale 12.3kPa del campione ricostituito di bentonite saturato con olio di paraffina

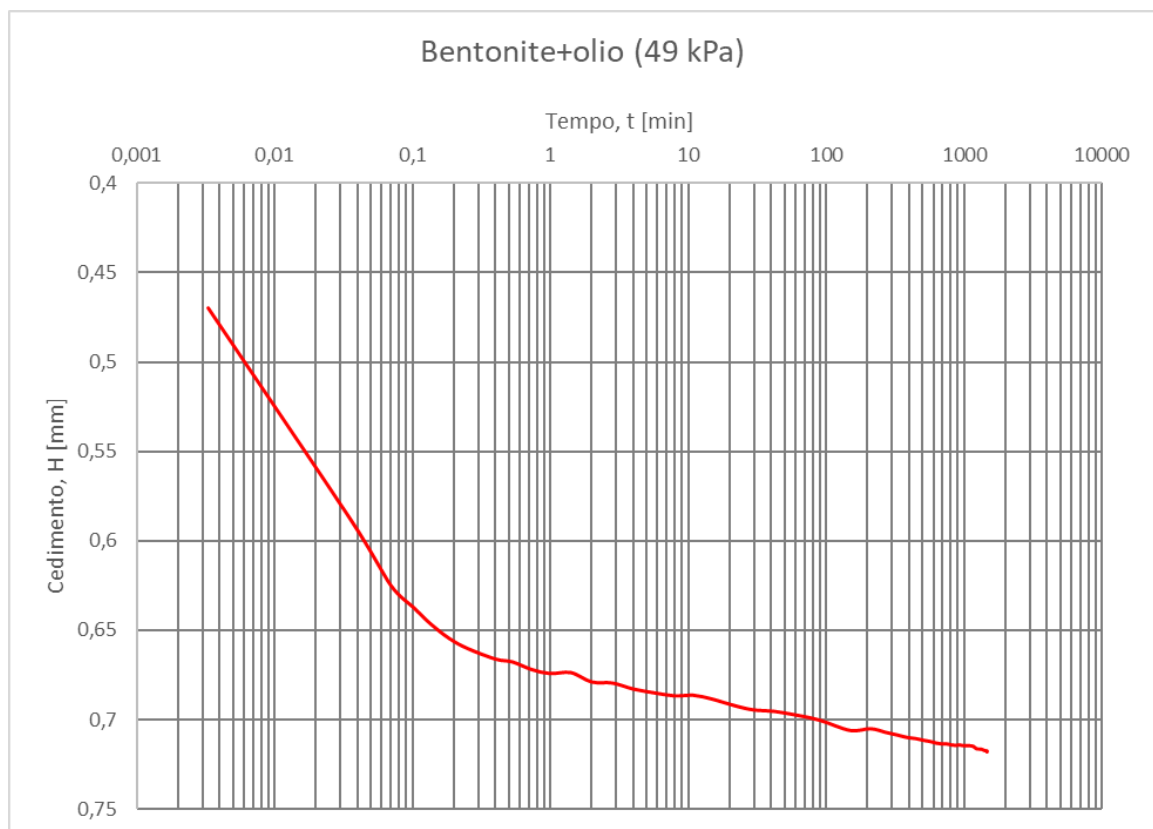


Figura A- 7 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale 49kPa del campione ricostituito di bentonite saturato con olio di paraffina

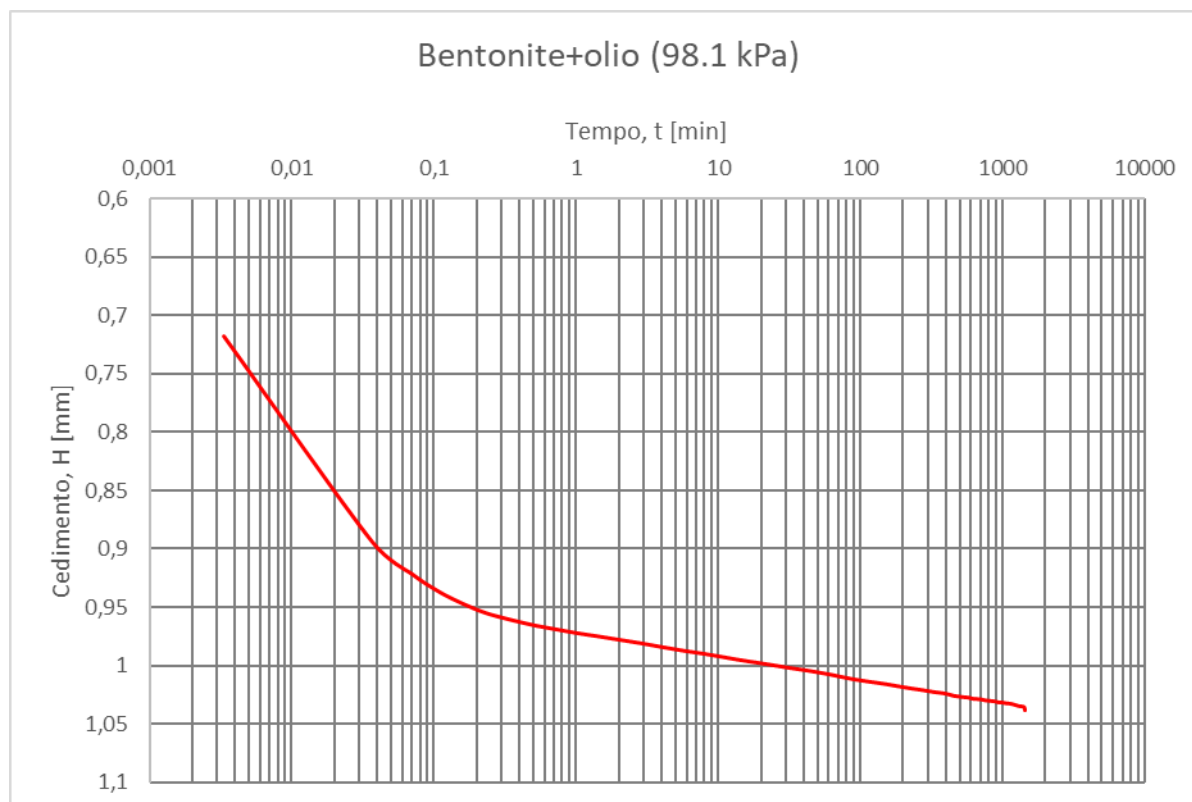


Figura A- 8 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale 98.1kPa del campione ricostituito di bentonite saturato con olio di paraffina

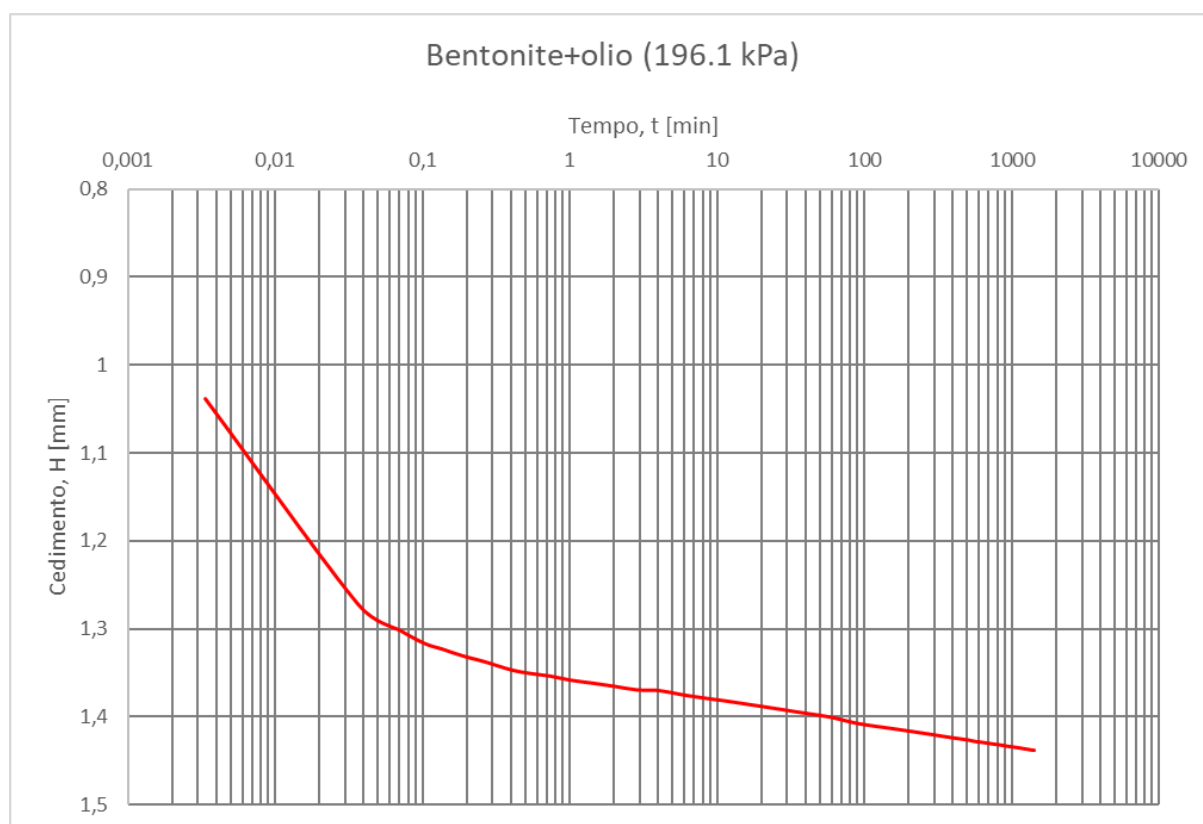


Figura A- 9 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale 196.1kPa del campione ricostituito di bentonite saturato con olio di paraffina

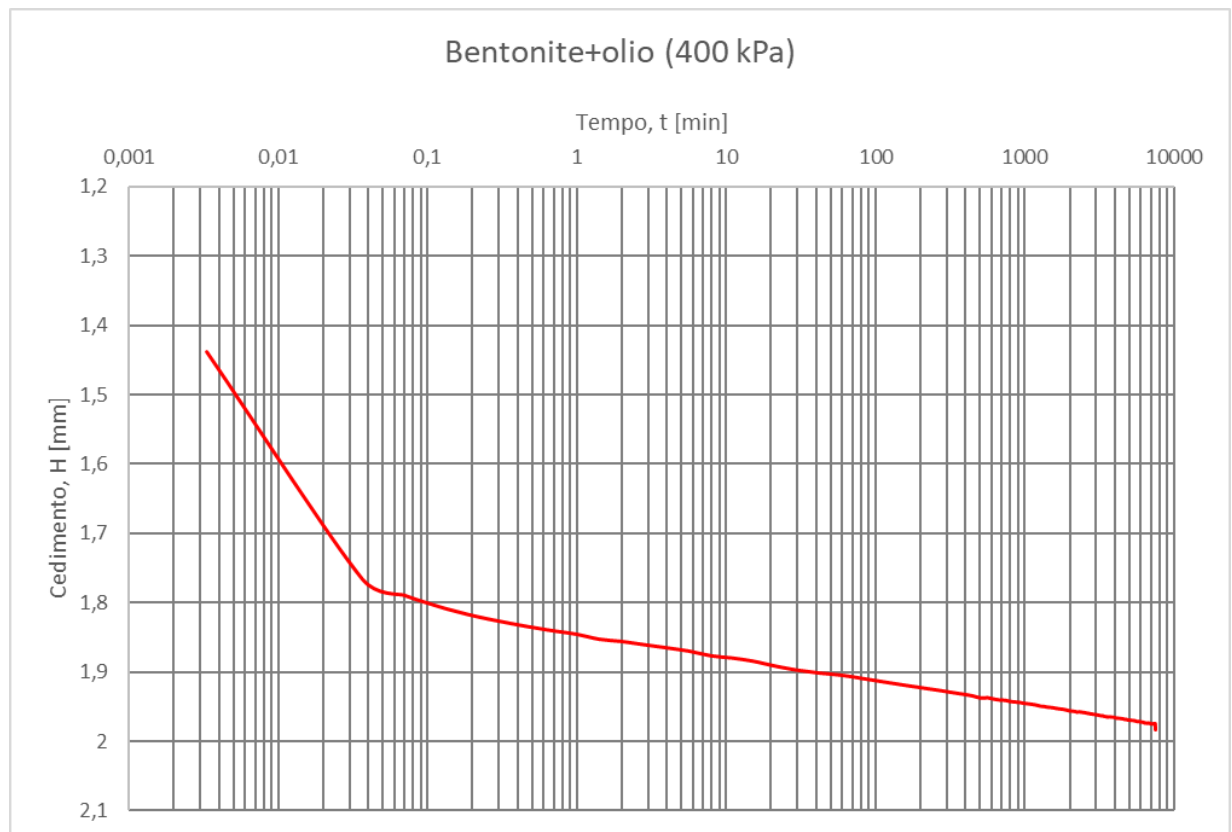


Figura A- 10 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale 400kPa del campione ricostituito di bentonite saturato con olio di paraffina

A.3. Curve di consolidazione dei campioni ricostituiti di caolino saturati con acqua distillata

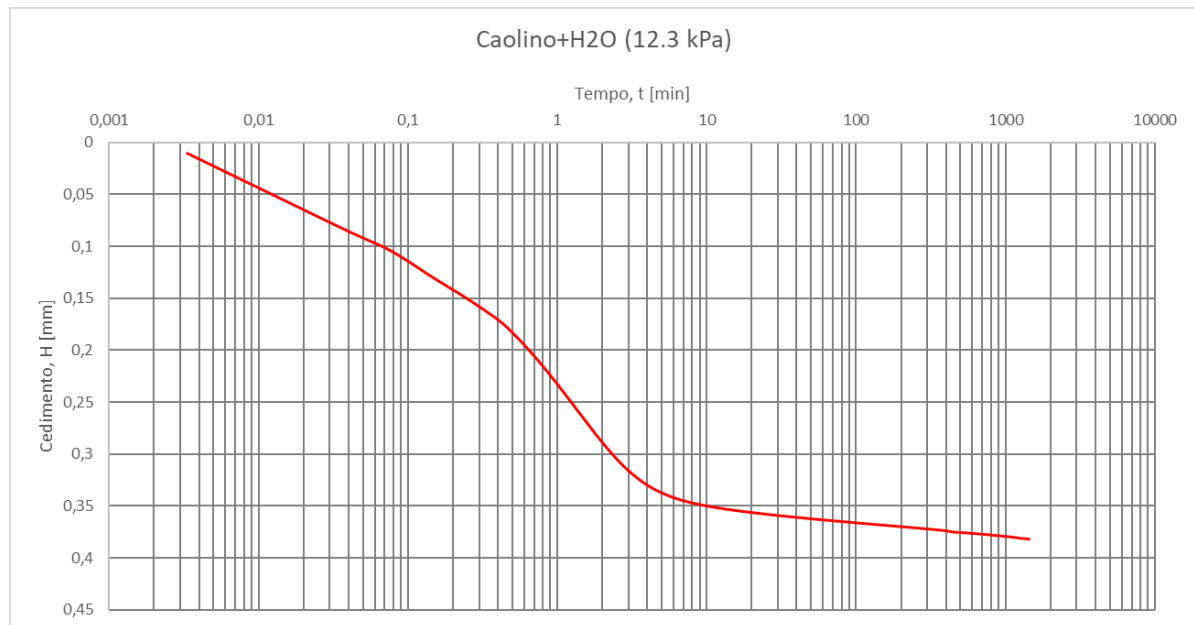


Figura A- 11 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale 12.3kPa del campione ricostituito di caolino saturato con acqua distillata

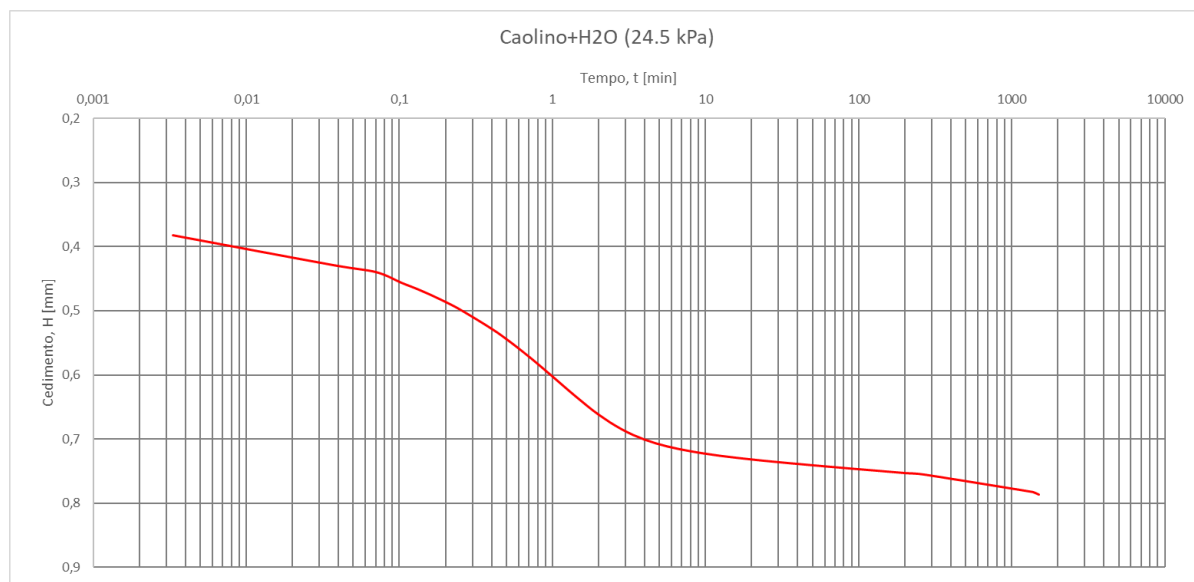


Figura A- 12 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale 24.5kPa del campione ricostituito di caolino saturato con acqua distillata

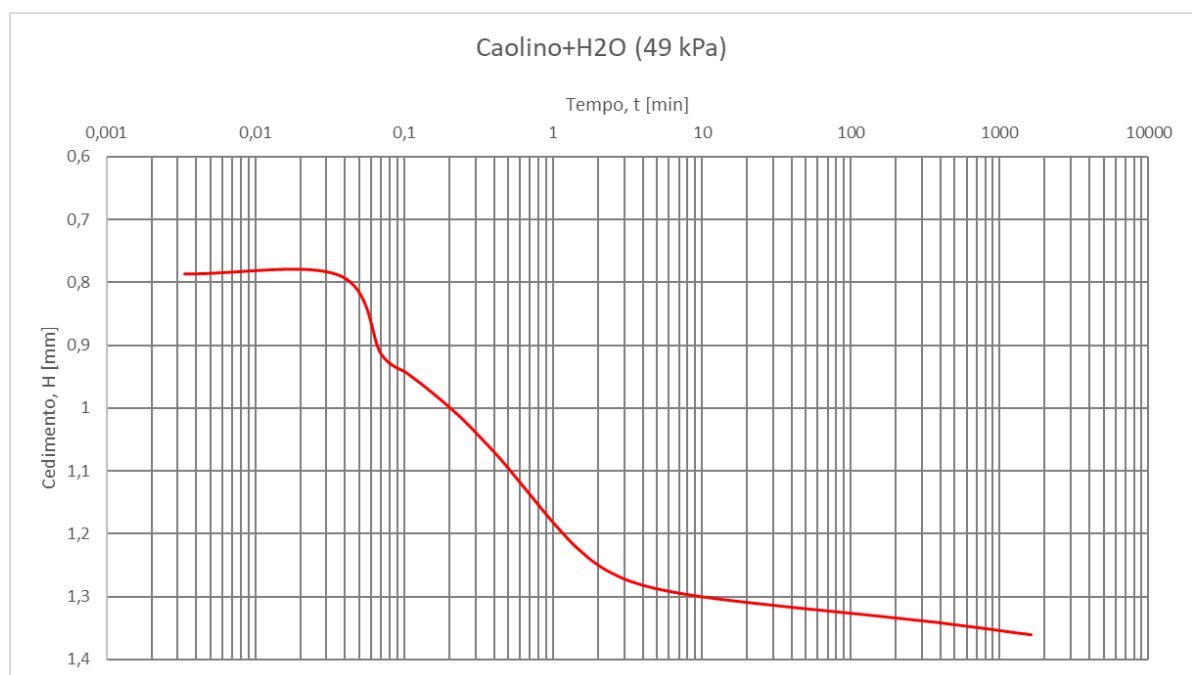


Figura A- 13 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale 49kPa del campione ricostituito di caolino saturato con acqua distillata

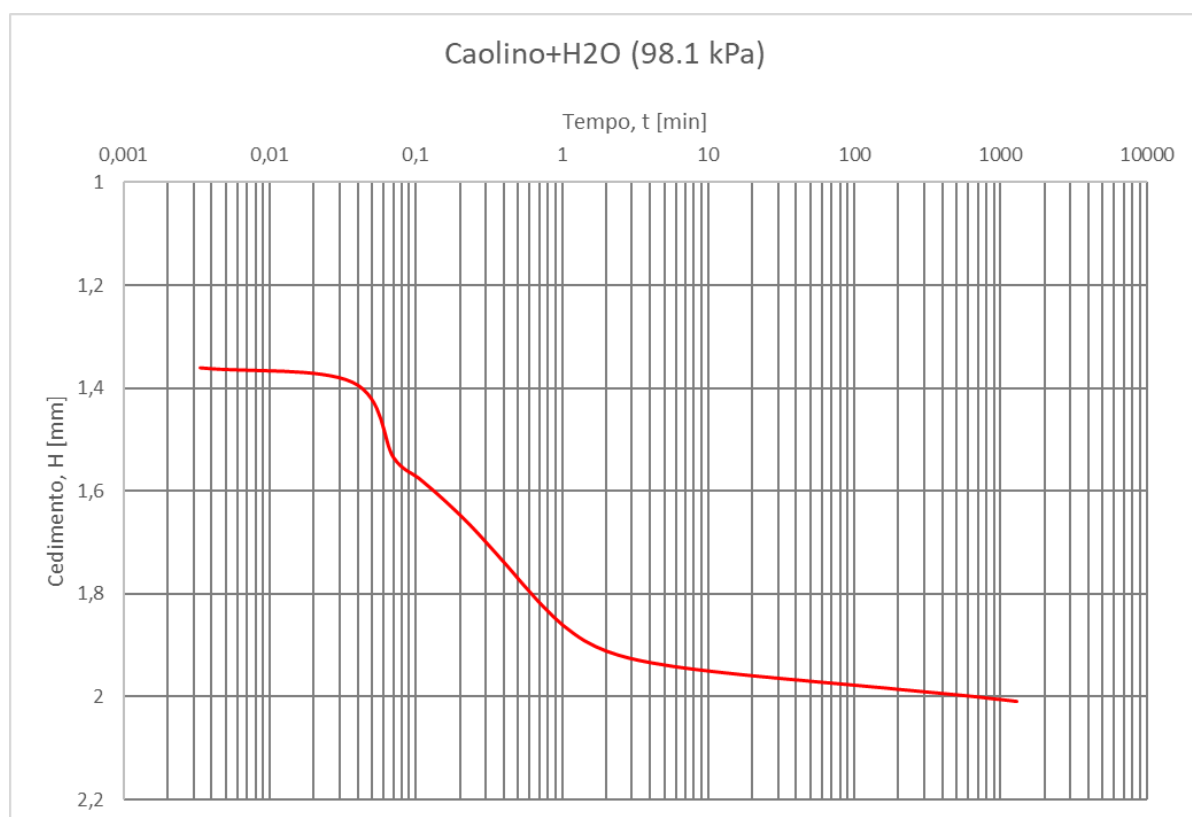


Figura A- 14 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale 98.1kPa del campione ricostituito di caolino saturato con acqua distillata

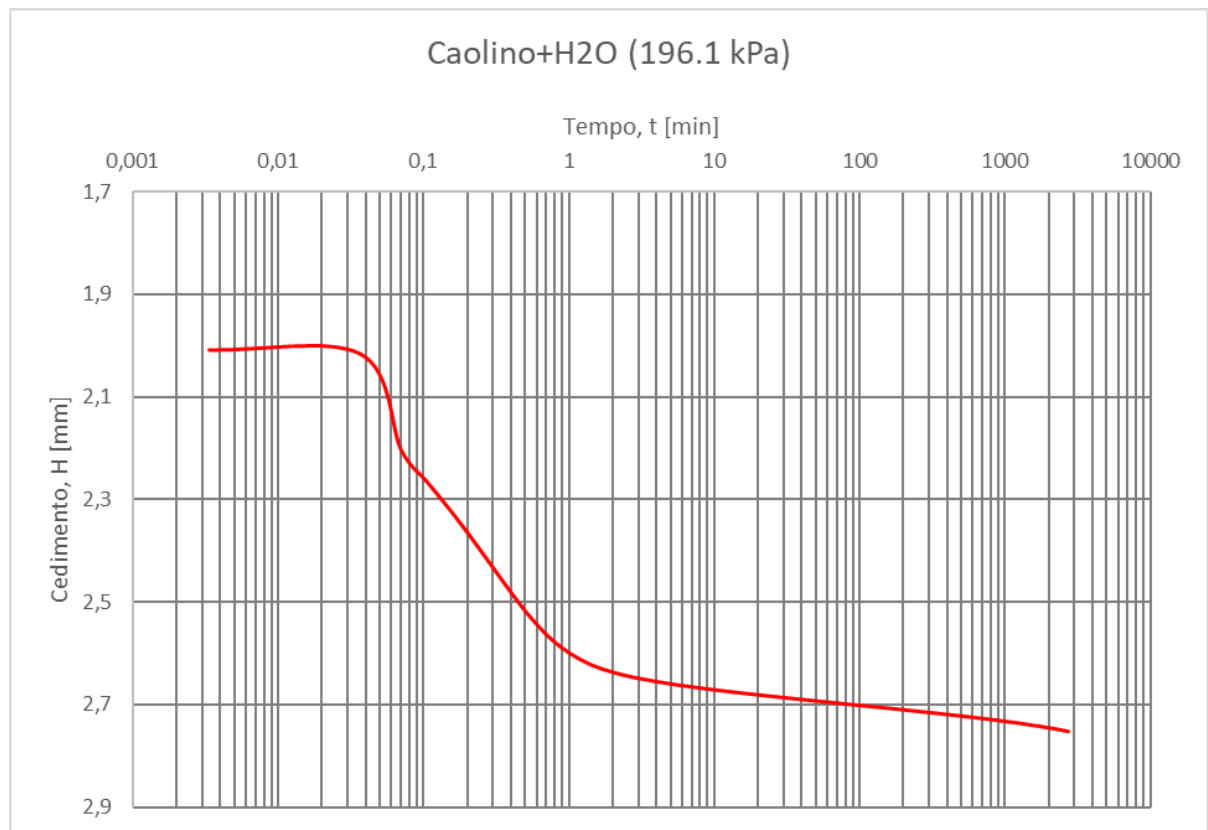


Figura A- 15 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale 196.1kPa del campione ricostituito di caolino saturato con acqua distillata

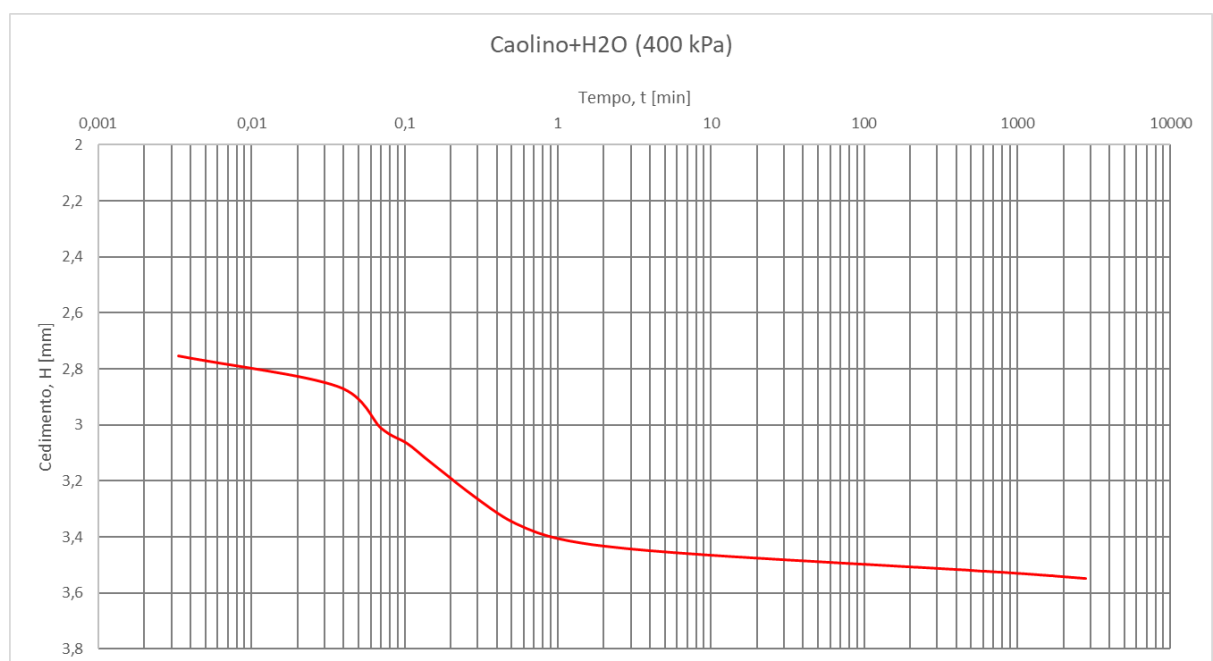


Figura A- 16 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale 400kPa del campione ricostituito di caolino saturato con acqua distillata

A.4. Curve di consolidazione dei campioni ricostituiti di caolino saturati con olio di paraffina

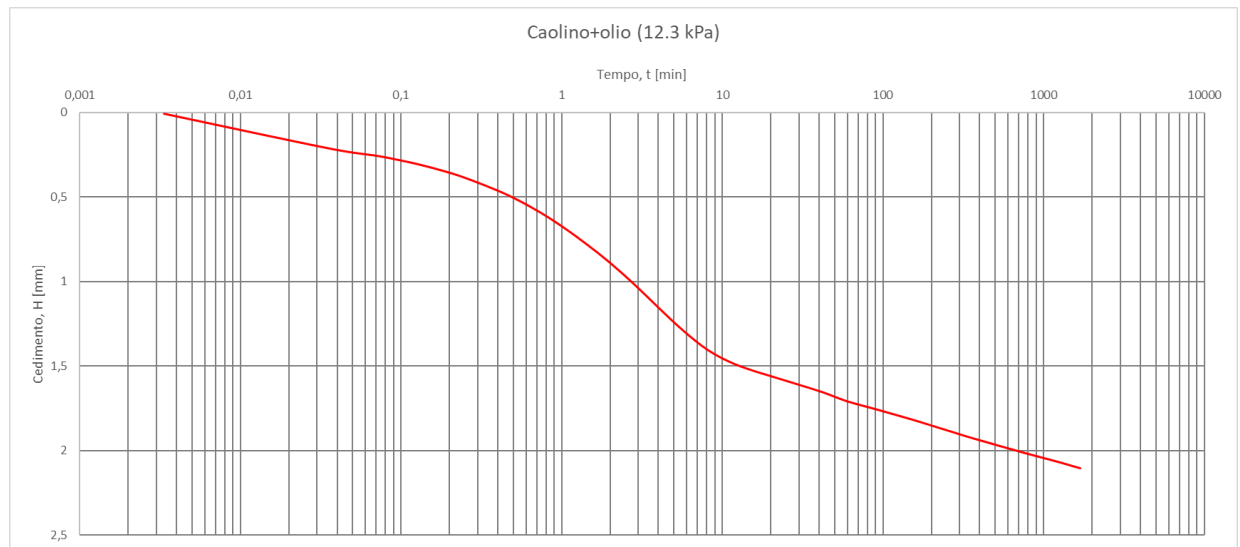


Figura A- 17 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale 12.3kPa del campione ricostituito di caolino saturato con olio di paraffina

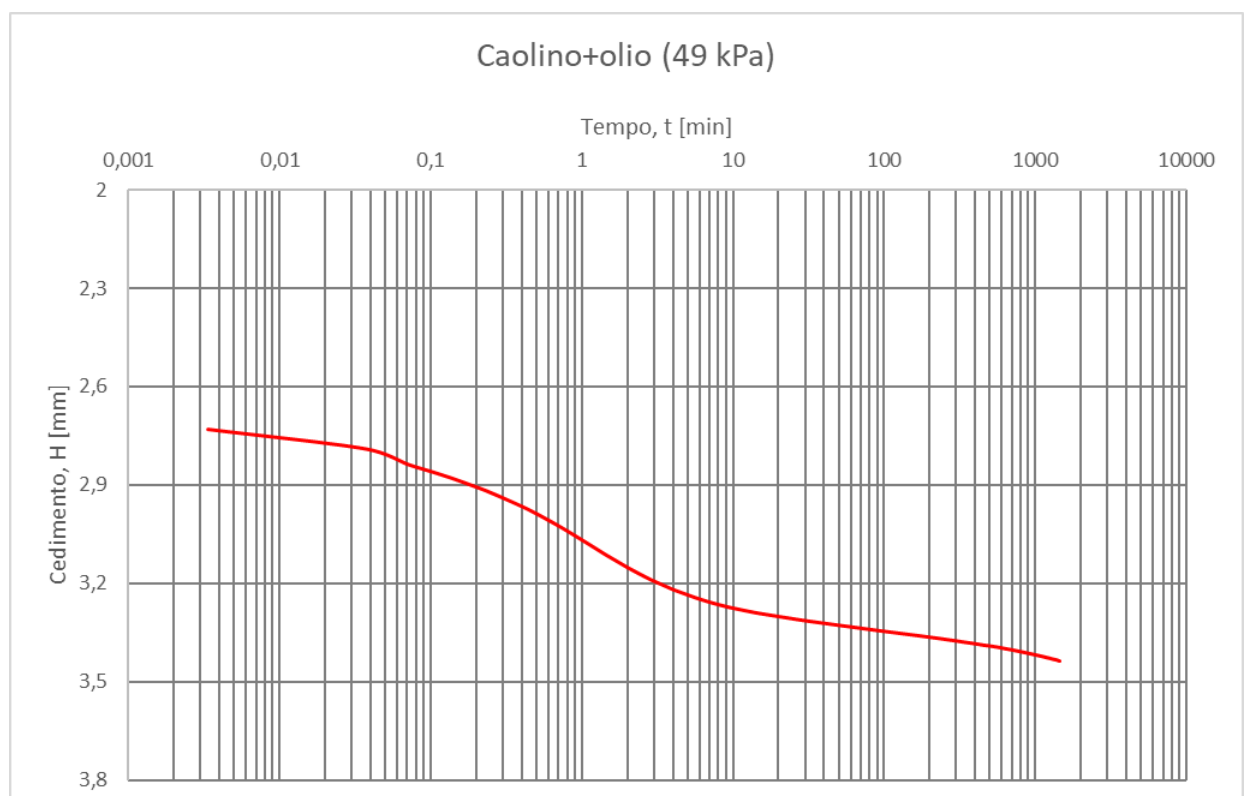


Figura A- 18 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale 49kPa del campione ricostituito di caolino saturato con olio di paraffina

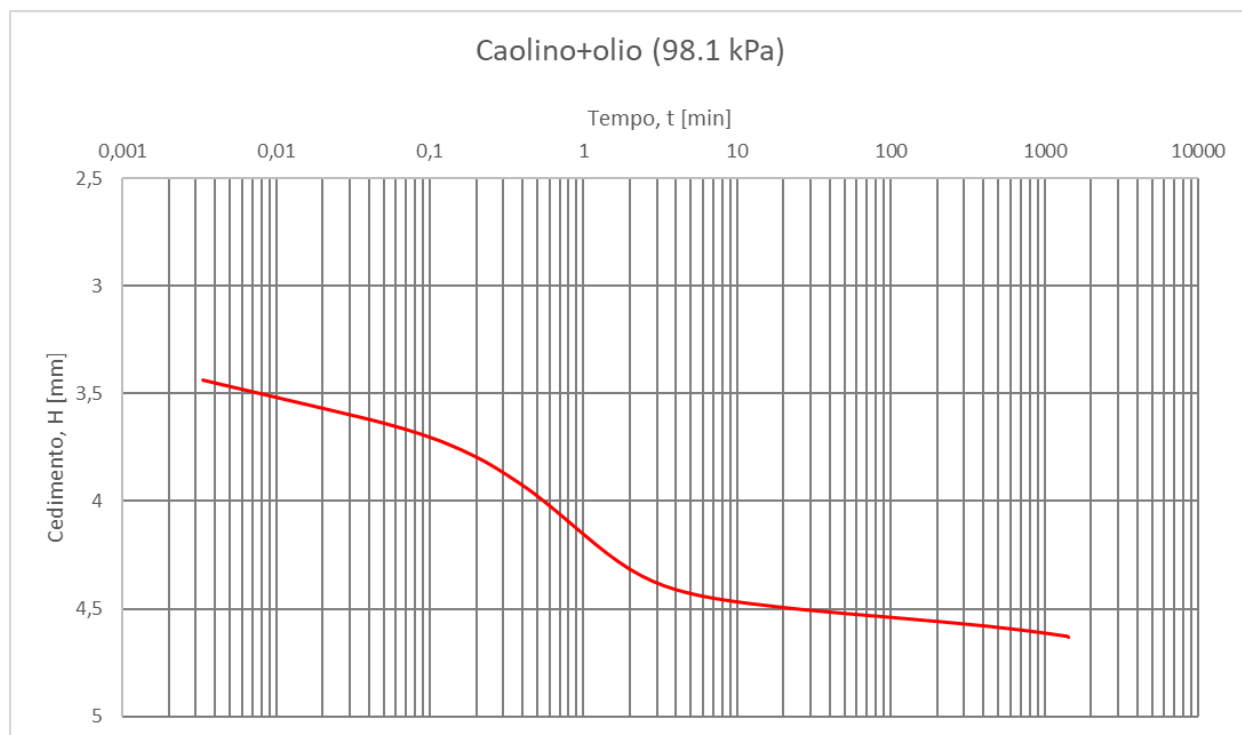


Figura A- 19 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale 98.1kPa del campione ricostituito di caolino saturato con olio di paraffina

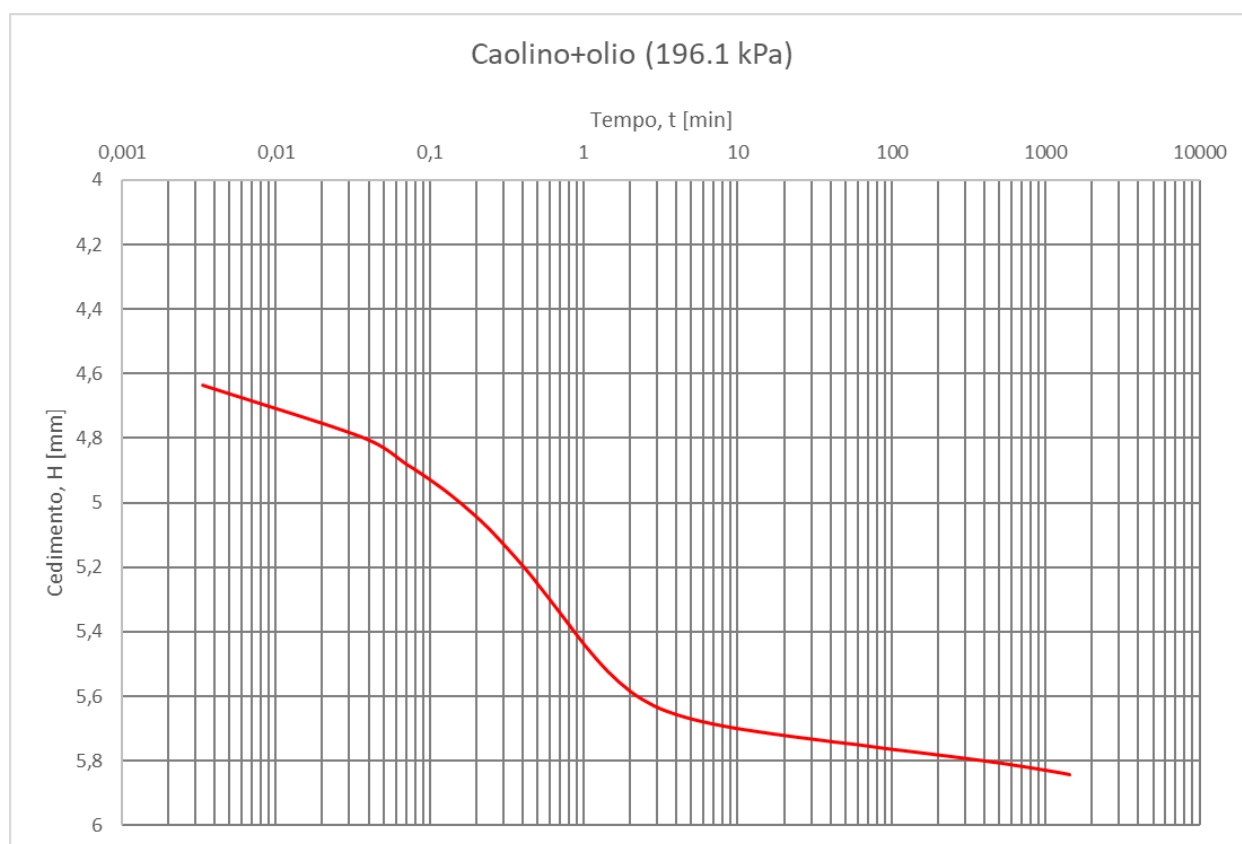


Figura A- 20 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale 196.1kPa del campione ricostituito di caolino saturato con olio di paraffina

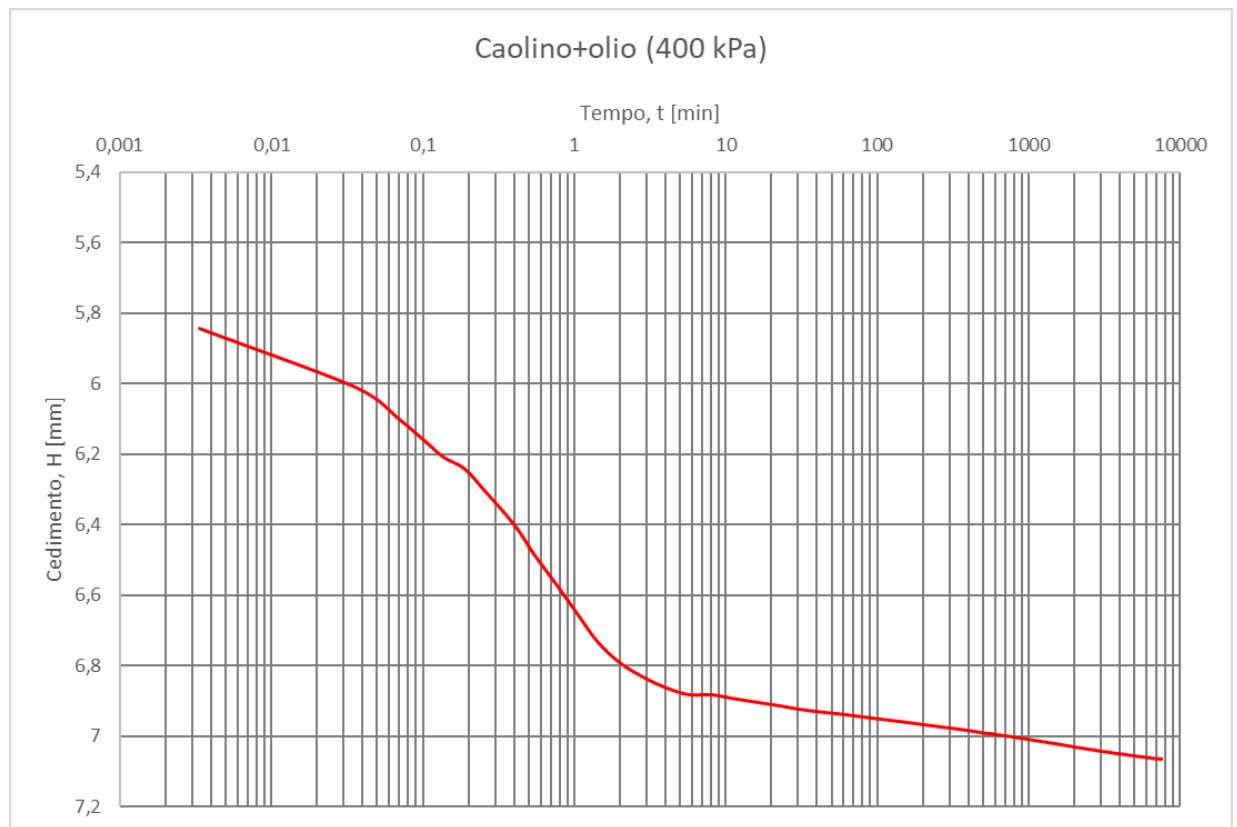


Figura A- 21 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale 400kPa del campione ricostituito di caolino saturato con olio di paraffina

A.5. Curve di consolidazione dei campioni compattati di bentonite saturati con acqua distillata

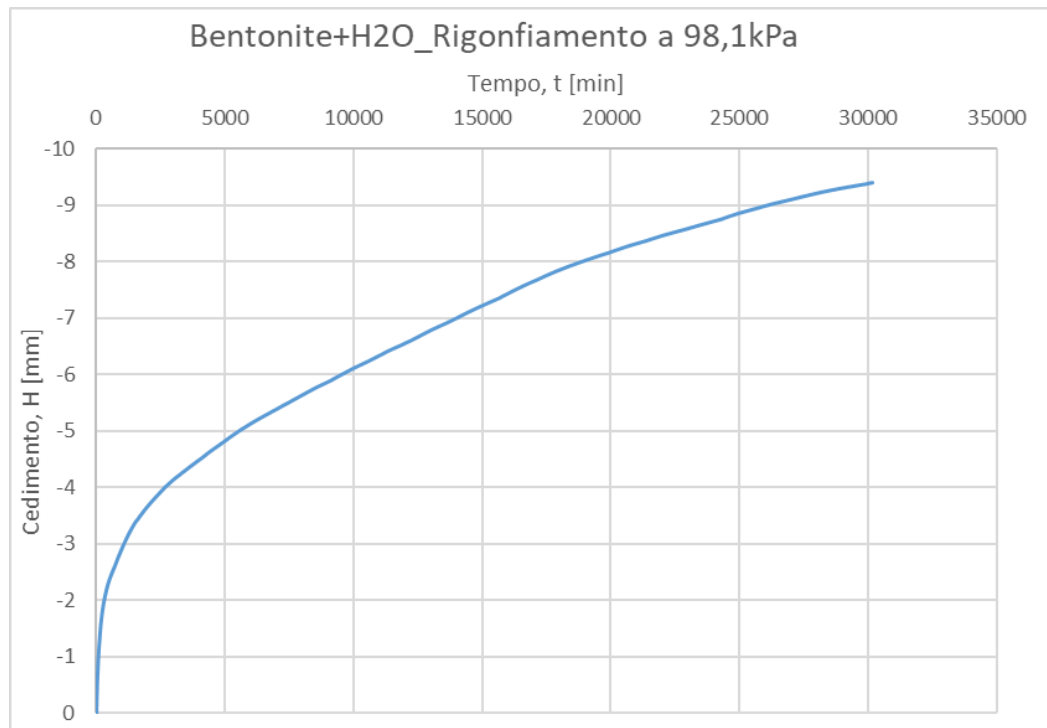


Figura A- 22 Curva di rigonfiamento alla pressione verticale di 98.1kPa del campione compattato di bentonite saturato con acqua distillata

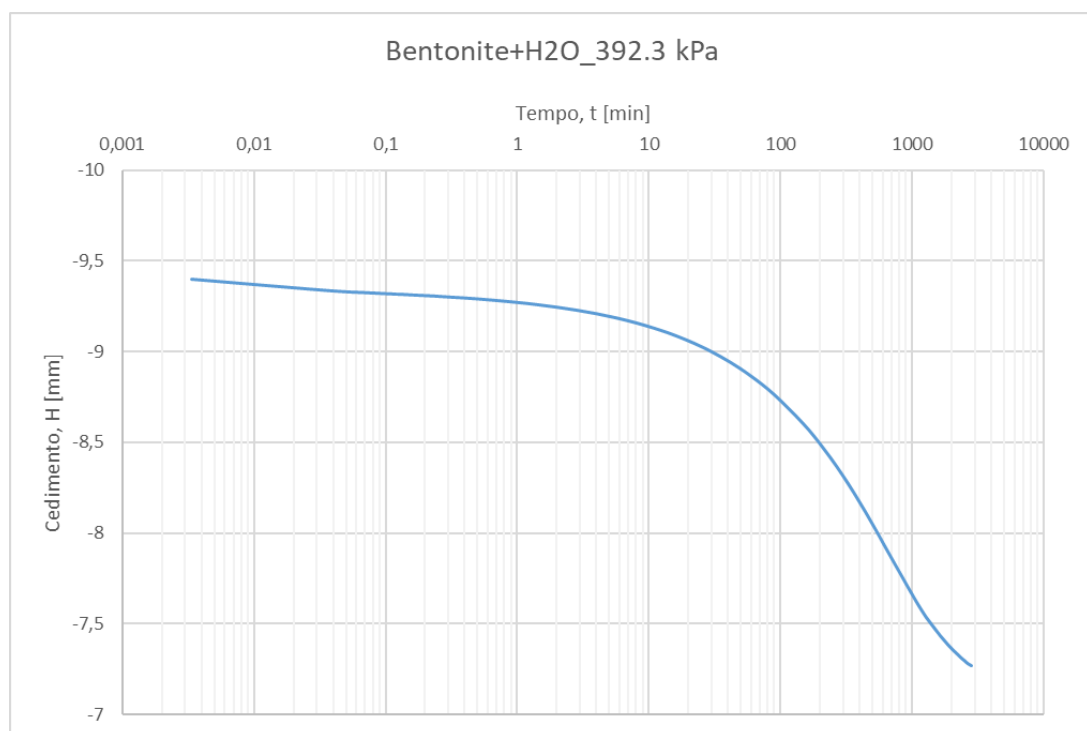


Figura A- 23 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale di 392.3kPa del campione compattato di bentonite saturato con acqua distillata

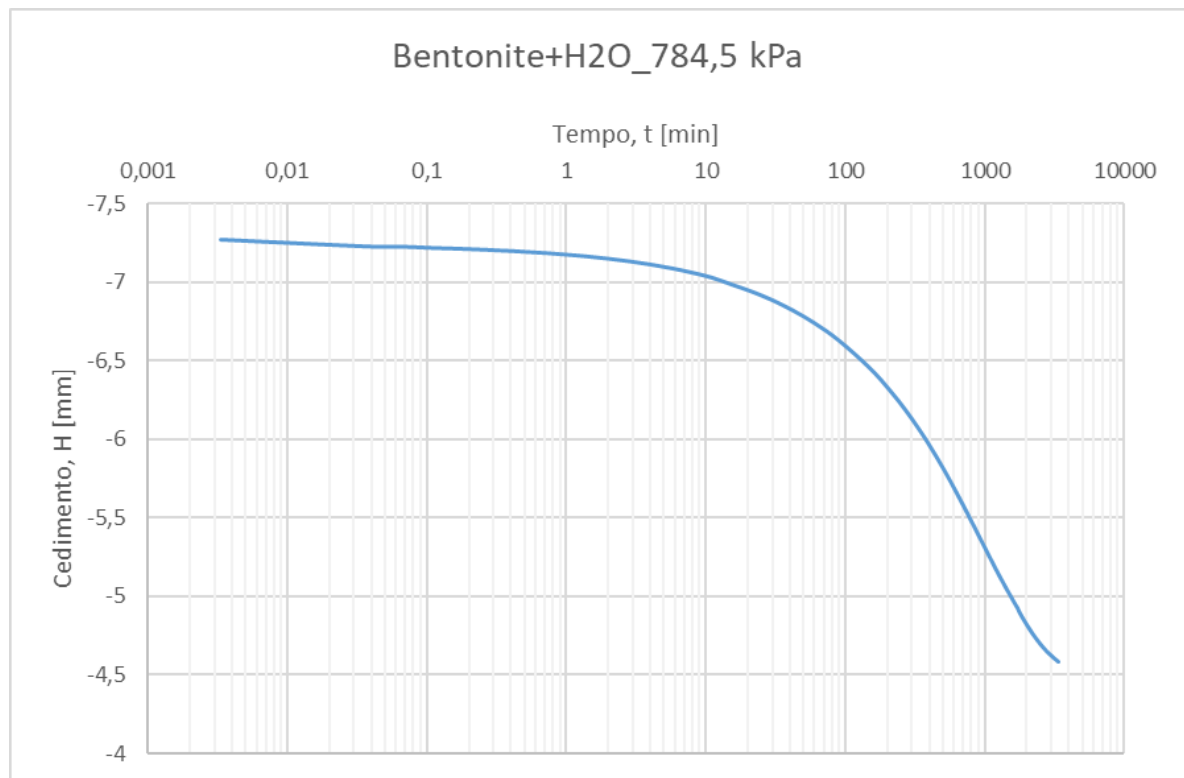


Figura A- 24 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale di 784.5kPa del campione compattato di bentonite saturato con acqua distillata

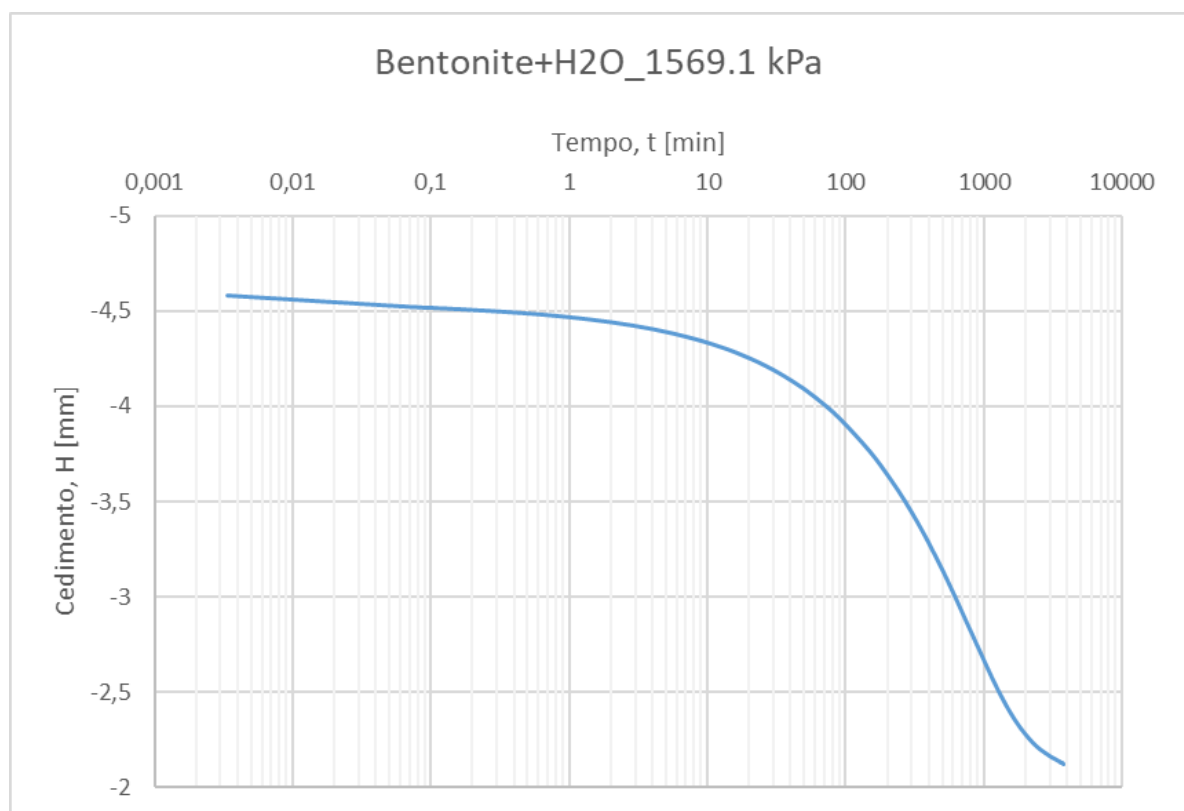


Figura A- 25 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale di 1569.1kPa del campione compattato di bentonite saturato con acqua distillata

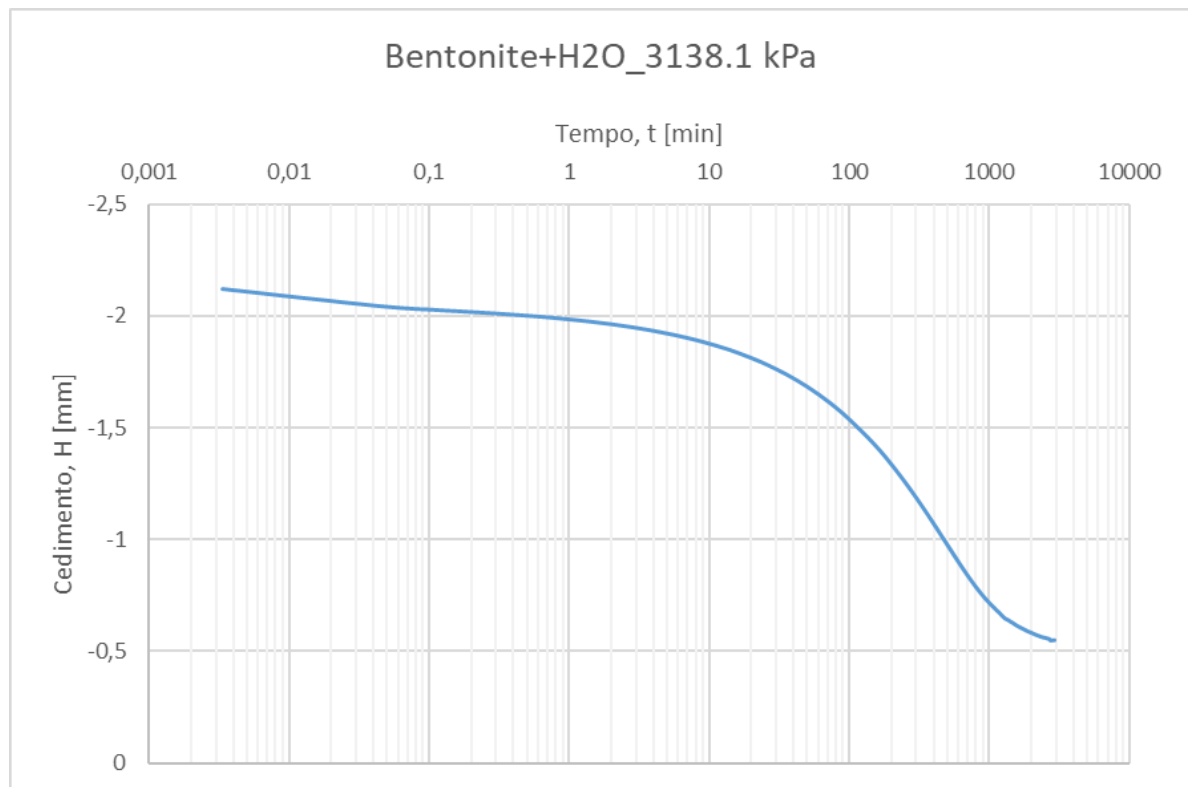


Figura A- 26 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale di 3138.1kPa del campione compattato di bentonite saturato con acqua distillata

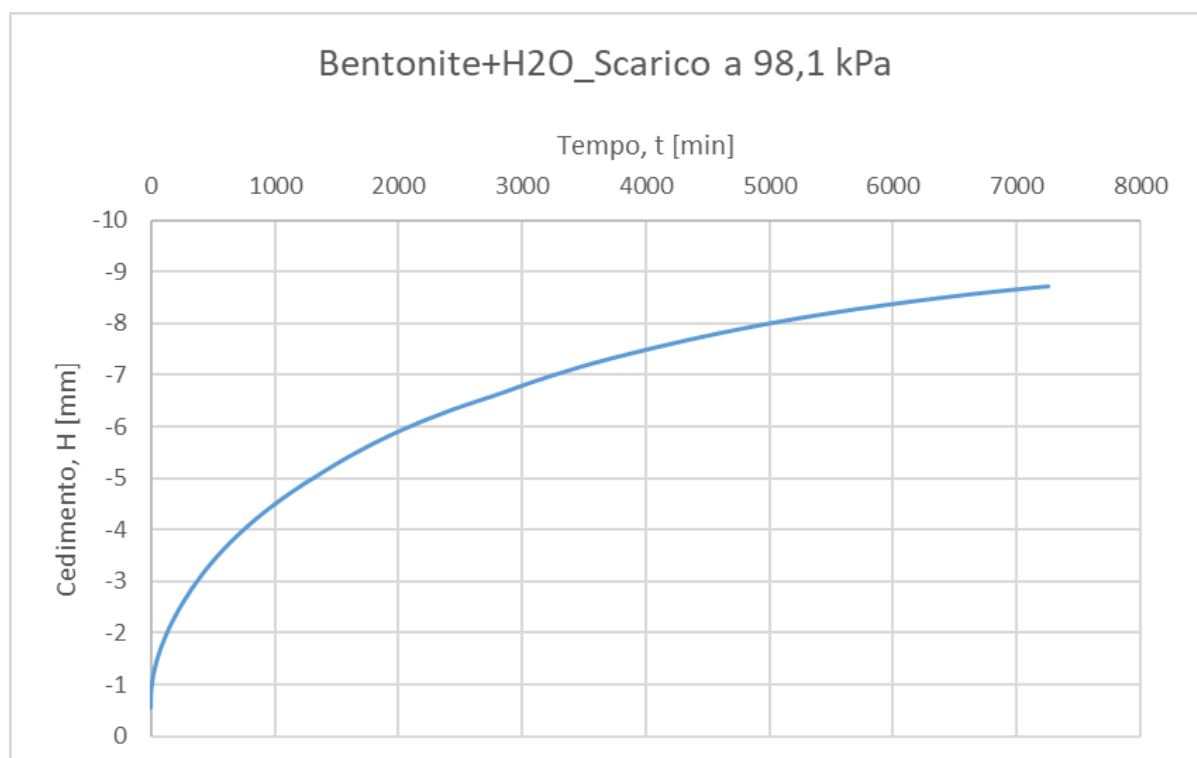


Figura A- 27 Curva di scarico relativa alla pressione verticale di 98.1kPa del campione compattato di bentonite saturato con acqua distillata

A.6. Curve di consolidazione dei campioni compattati di bentonite saturati con olio di paraffina

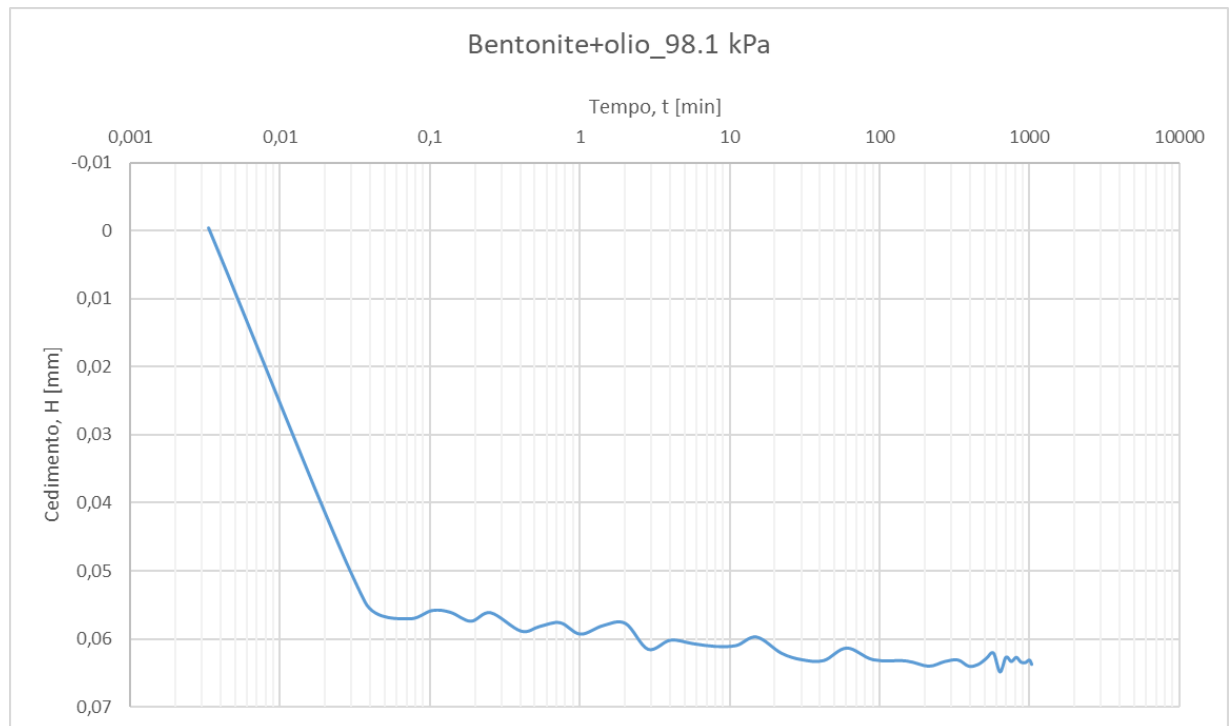


Figura A- 28 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale di 98.1kPa del campione compattato di bentonite saturato con olio di paraffina

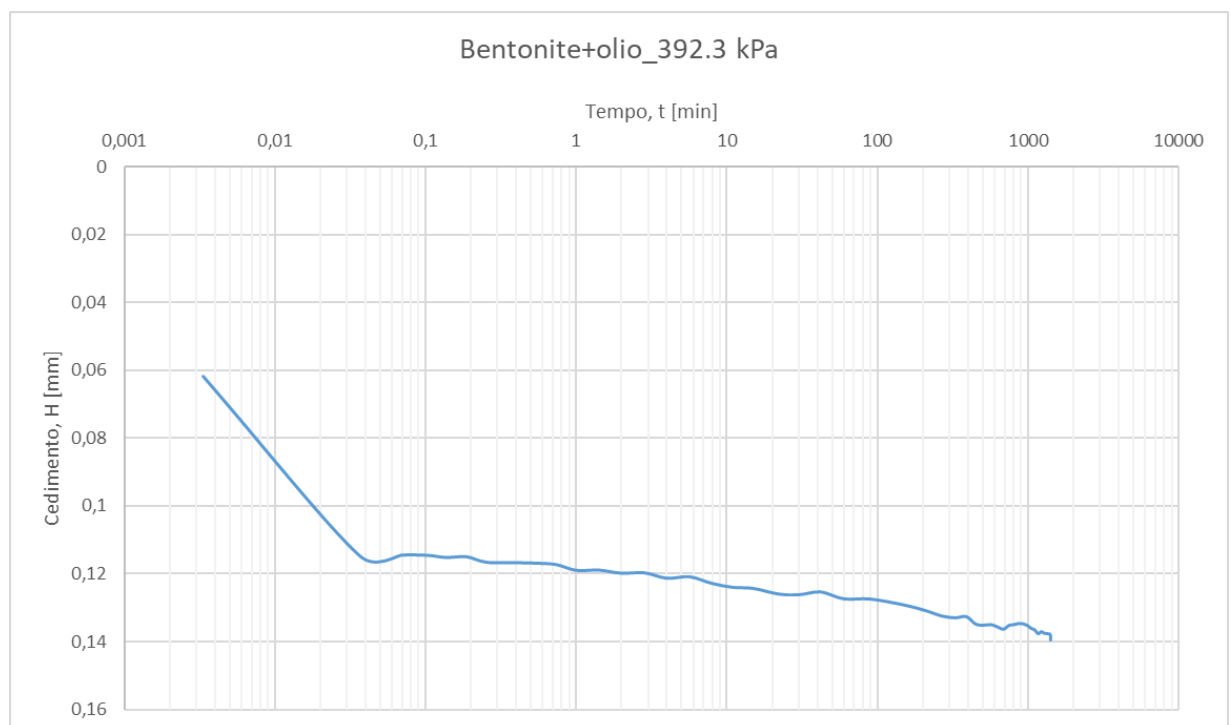


Figura A- 29 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale di 392.3kPa del campione compattato di bentonite saturato con olio di paraffina

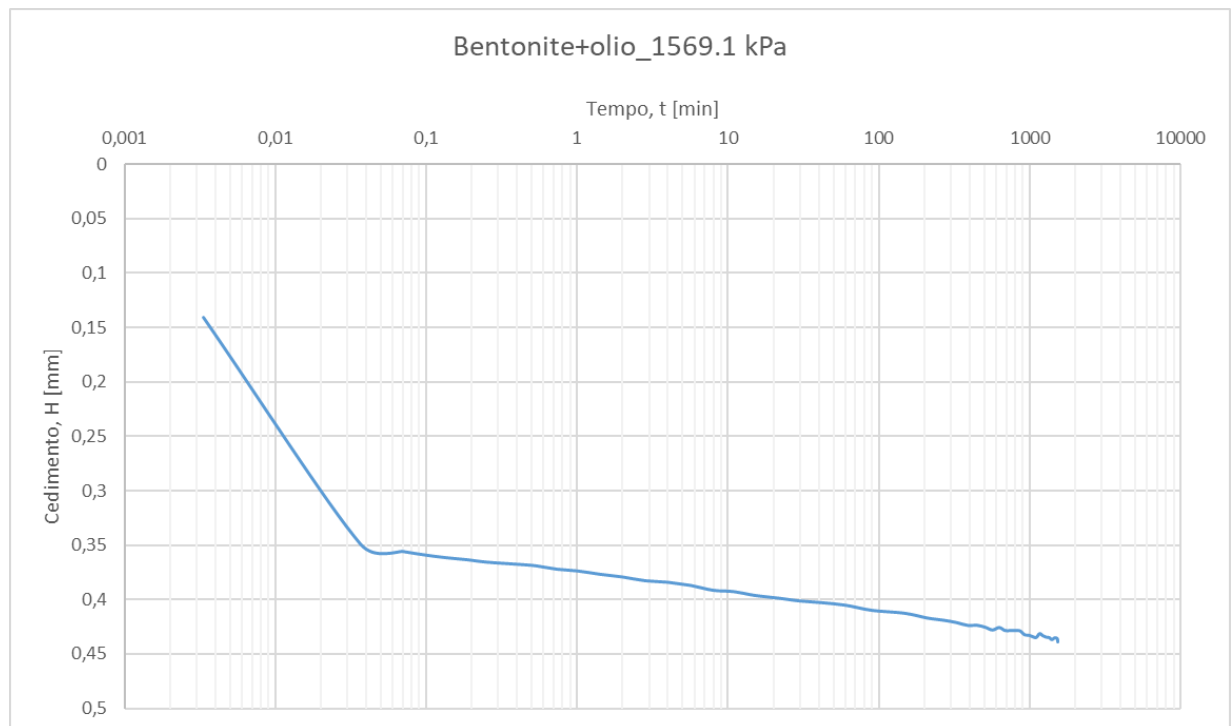


Figura A- 30 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale di 1569.1kPa del campione compattato di bentonite saturato con olio di paraffina

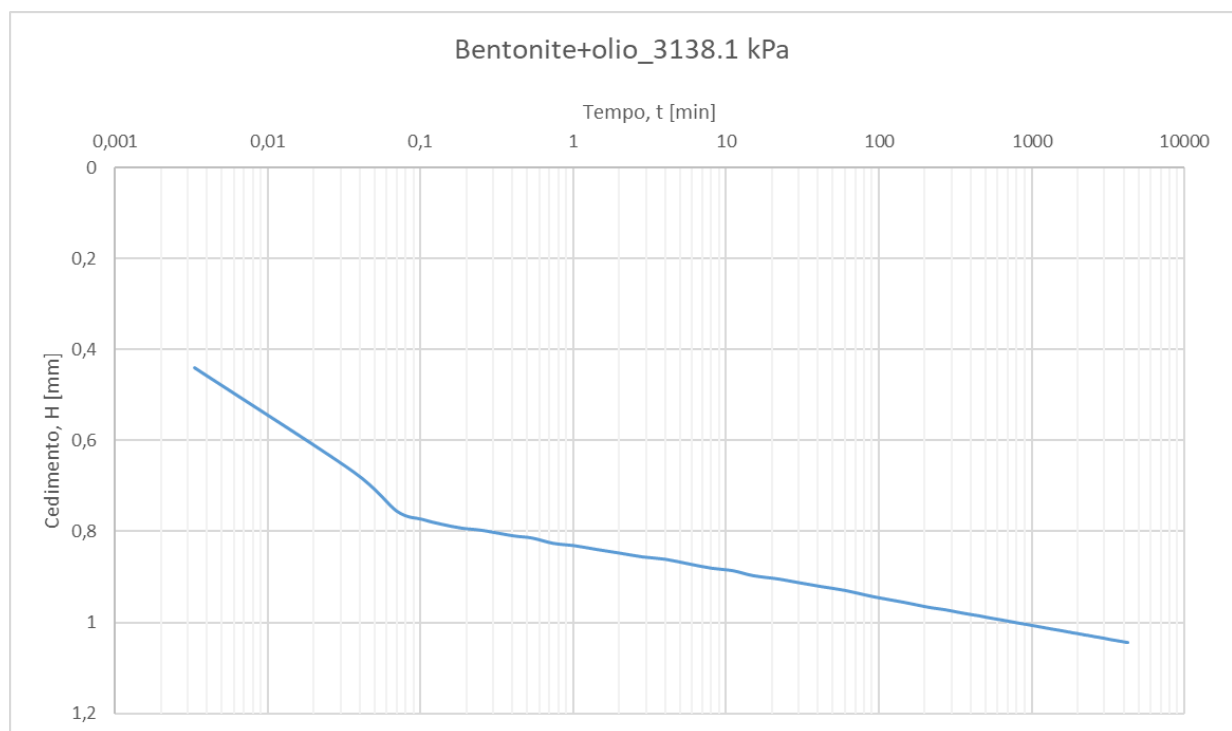


Figura A- 31 Curva di consolidazione relativa alla pressione verticale di 3138.1kPa del campione compattato di bentonite saturato con olio di paraffina

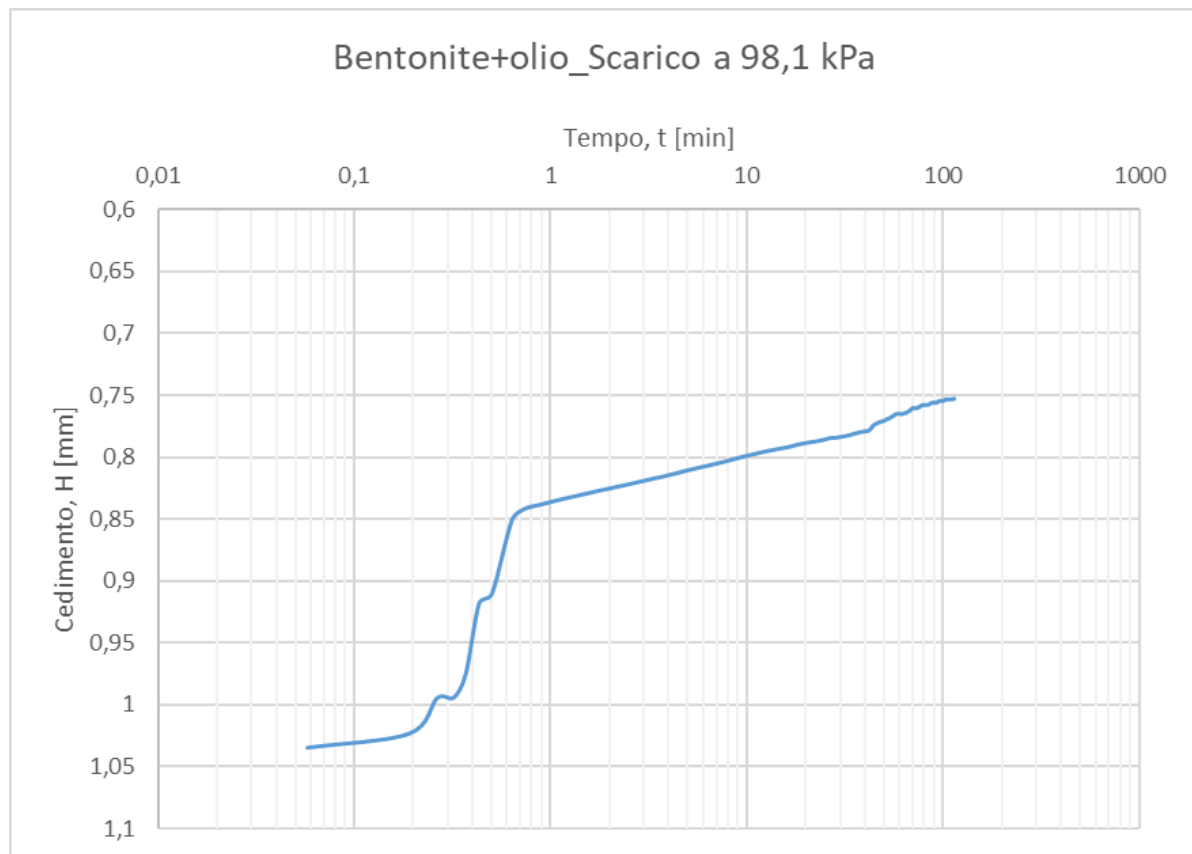


Figura A- 32 Curva di scarico a 98.1kPa del campione compattato di bentonite saturato con olio di paraffina

A.7. Esempio di foglio di calcolo per il modello sovraconsolidato con acqua distillata

A.7.1. Creazione del dominio di particelle

```
#include <Species/Species.h>
#include <fstream>
#include <Species/LinearPlasticViscoelasticFrictionSpecies.h>
#include <Mercury3D.h>
#include <Boundaries/PeriodicBoundary.h>
#include "Boundaries/LeesEdwardsBoundary.h"
#include <InteractionHandler.h>

class Creazione_Dominio : public Mercury3D{
public:
    /*! s1_IniGeneration creates the initial configuration before the
    * isotropic compression process. The particles, with given
    * volume fraction and polydispersity, are placed in a cubic box
    * of dimensions Xmax, Ymax, Zmax and period boundaries are applied
    * in all directions.
    * The particles are elastoplastic (en = 0.804) and frictionless.
    * Due to the overlap, particles bounce in all directions.
    * The relax stage after the generation of this configuration will
    * remove the overlap between the particles to get it homogeneous.
    * In 's2_IsotropicCompression', the last particle positions configuration (restart)
    * will be loaded and then particles will be compressed isotropically.
    * */

    Creazione_Dominio()
    {
        setSystemDimensions(3);
        particleSpecies
speciesHandler.copyAndAddObject(LinearPlasticViscoelasticFrictionSpecies());
    }
    LinearPlasticViscoelasticFrictionSpecies* particleSpecies;
    =
```

```

Mdouble particleDiameter, rhop, en, K1, K2, Kc, Phic, mu_slid, mu_roll,mu_tor,
poly,Ka,Fa;
Mdouble volumeFraction, N, tmax, H;
Mdouble dampingCoefficient = 0.0;
Mdouble stressXX,stressXX_static, stressXX_kinetic, stressYY,stressYY_static,
stressYY_kinetic,stressXZ_static,stressYZ_static;
Mdouble stressZZ,stressZZ_static, stressZZ_kinetic, stressXY,stressXY_static,
stressXY_kinetic,stressXZ,stressYZ;
Mdouble ActualPressure,PressureGoal,Volume,e;
Mdouble RHOP;

void computeExternalForces (BaseParticle * CI) override
{
    DPMBase::computeExternalForces (CI);
    if (!CI->isFixed())
    {
        // Background damping
        CI->addForce(-dampingCoefficient * CI->getVelocity());
    }
}

void setupInitialConditions()
{
    double mass =
rhop*constants::pi*mathsFunc::cubic(2*particleDiameter/(poly+1))/6.0; //mass or
effective mass in Mercury =/frac{2}{1/m1+1/m2}
    double tc = std::sqrt(mass/2.0/K1*( mathsFunc::square(constants::pi) +
mathsFunc::square(log(en) ) )); //contact duration for smallest pair of particles
    double Lm =
std::pow(N*constants::pi*mathsFunc::cubic(particleDiameter)/6.0/volumeFraction,1.0/3.0
)*1.000; //estimated box length
    Mdouble velocity = 0.0;

```

```

        setTimeStep(tc/50);
setTimeMax(tmax);

// particleSpecies
particleSpecies->setDensity(rhop);
particleSpecies->setCollisionTimeAndRestitutionCoefficient(tc,en,mass);
particleSpecies->setPlasticParameters(K1,K2,Kc,Phic);
    if ( mu_slid == 0){
        particleSpecies->setSlidingStiffness(0.0);
    }
    else{
        particleSpecies->setSlidingStiffness(2.0/10.0*particleSpecies-
>getLoadingStiffness());
    }
    if ( mu_roll == 0){
        particleSpecies->setRollingStiffness(0.0);
    }
    else{
        particleSpecies->setRollingStiffness(2.0/10.0*particleSpecies-
>getLoadingStiffness());
    }
    if ( mu_tor == 0){
        particleSpecies->setTorsionStiffness(0.0);
    }
    else{
        particleSpecies->setTorsionStiffness(2.0/10.0*particleSpecies-
>getLoadingStiffness());
    }
    particleSpecies->setSlidingFrictionCoefficient(mu_slid);
    particleSpecies->setSlidingFrictionCoefficientStatic(mu_slid);
    particleSpecies->setRollingFrictionCoefficient(mu_roll);
    particleSpecies->setRollingFrictionCoefficientStatic(mu_roll);
    particleSpecies->setTorsionFrictionCoefficient(mu_tor);
    particleSpecies->setTorsionFrictionCoefficientStatic(mu_tor);

```

```

        particleSpecies->setSlidingDissipation(2.0/10.0*particleSpecies-
>getDissipation());
        particleSpecies->setRollingDissipation(2.0/10.0*particleSpecies-
>getDissipation());
        particleSpecies->setTorsionDissipation(2.0/10.0*particleSpecies-
>getDissipation());

        dampingCoefficient = 0.1*particleSpecies->getDissipation();
        setGravity(Vec3D(0.0,0.0,0.0));

        BaseParticle p0;
        p0.setSpecies(particleSpecies);
        p0.setVelocity(Vec3D(0.0, 0.0, 0.0));
        Mdouble Vp = 0.0;

        for (int i=0; i < N; i++) {

            p0.setRadius(random.getRandomNumber(particleDiameter/(poly+1),particleDiameter
*poly/(poly+1)));
            double posX = random.getRandomNumber(0,Lm);
            double posY = random.getRandomNumber(0,Lm);
            double posZ = random.getRandomNumber(0,Lm);
            p0.setPosition(Vec3D(posX,posY,posZ));
            particleHandler.copyAndAddObject(p0);
            Vp = Vp + p0.getVolume();
        }
        double L = std::pow(Vp/volumeFraction,1.0/3.0);
        setXMax(L);
        setYMax(L);
        setZMax(L);
        setXMin(0.0);
        setYMin(0.0);
        setZMin(0.0);
        // periodic boundary

```

```

        PeriodicBoundary normWall;
        normWall.set(Vec3D(1.0, 0.0, 0.0), getXMin(),getXMax());
        boundaryHandler.copyAndAddObject(normWall);
        normWall.set(Vec3D(0.0, 1.0, 0.0), getYMin(),getYMax());
        boundaryHandler.copyAndAddObject(normWall);
        normWall.set(Vec3D(0.0, 0.0, 1.0), getZMin(),getZMax());
        boundaryHandler.copyAndAddObject(normWall);

        Volume      =      (getXMax()-getXMin())*(getYMax()-getYMin()*(getZMax()-
getZMin()));
        e = (Volume-Vp)/Vp;

    }

    void actionsBeforeTimeStep() override
    {

        stressXX = 0.0; stressYY = 0.0; stressZZ = 0.0; stressXY = 0.0;
        stressXX_static = 0.0; stressYY_static = 0.0; stressZZ_static = 0.0;
        stressXY_static = 0.0;stressXZ_static = 0.0;stressYZ_static = 0.0;
        stressXX_kinetic = 0.0; stressYY_kinetic = 0.0; stressZZ_kinetic = 0.0;
stressXY_kinetic = 0.0;
        RHOP = 0.0;

        for (auto i : interactionHandler) {
            stressXX_static += i->getForce().X * i->getNormal().X * i-
>getDistance();
            stressYY_static += i->getForce().Y * i->getNormal().Y * i-
>getDistance();
            stressZZ_static += i->getForce().Z * i->getNormal().Z * i-
>getDistance();
            stressXY_static += i->getForce().X * i->getNormal().Y * i-
>getDistance();

```

```

        stressXZ_static += i->getForce().X * i->getNormal().Z * i-
>getDistance();
        stressYZ_static += i->getForce().Y * i->getNormal().Z * i-
>getDistance();
    }

    stressXX = stressXX_static;
    stressXX /= Volume;
    stressYY = stressYY_static;
    stressYY /= Volume;
    stressZZ = stressZZ_static;
    stressZZ /= Volume;
    stressXY = stressXY_static;
    stressXY /= Volume;
    stressXZ = stressXZ_static;
    stressXZ /= Volume;
    stressYZ = stressYZ_static;
    stressYZ /= Volume;

    ActualPressure = (stressXX+stressYY+stressZZ)/3;
}

void printTime() const override {
    std::ofstream f;
    f.open("record.txt", std::ios_base::app);
    f << getTime() << " " << ActualPressure << " " << e << " " <<
getKineticEnergy()/getElasticEnergy() << std::endl;
}

};

int main(int argc , char *argv[] )
{

```

```

Creazione_Dominio problem;

    problem.particleDiameter = 0.0011;    //Particelle scalate di 10
problem.rhop = 2700.0;                    //set particle density
problem.en = 0.8;                        //set restitution coefficient
problem.K1 = 9400;                       //set loading stiffness
problem.K2 = 9400;                       //set unloading stiffness
problem.Kc = 0.0;                        //set cohesive stiffness
problem.mu_slid = 0.0;                   //set sliding friction coefficient
problem.mu_roll = 0.0;                   //set rolling friction coefficient
problem.mu_tor = 0.0;                    //set torsional friction coefficient
problem.Phic = 0.5;                      // penetration DepthMax, the
maximum depth of linear plastic-viscoelastic normal force
    problem.N = 125;                      // number of particles
    problem.volumeFraction = 0.5;         // initial volume fraction
    problem.poly = 1.3;                   //polydispersity dmax/dmin
    // -----

// assign problem configuration: volume fraction and name

    problem.setName("Creazione_Dominio");
    problem.tmax = 0.5;
    problem.setSaveCount(5000);
    problem.eneFile.setSaveCount(500);
    problem.dataFile.setFileType(FileType::ONE_FILE);
    problem.restartFile.setFileType(FileType::ONE_FILE);
    problem.fStatFile.setFileType(FileType::ONE_FILE);
    problem.eneFile.setFileType(FileType::ONE_FILE);
    problem.setXBallsAdditionalArguments("-solidf -v0");
    problem.solve(argc,argv);

}

```

A.7.2. Compressione Isotropa

```
#include <Species/Species.h>
#include <fstream>
#include <Species/LinearPlasticViscoelasticFrictionSpecies.h>
#include <Mercury3D.h>
#include <Boundaries/PeriodicBoundary.h>
#include "Boundaries/LeesEdwardsBoundary.h"
#include <InteractionHandler.h>

class Compressione_isotropa: public Mercury3D{
public:
    /*! s2_IsotropicCompression will load the configuration from s1_IniGeneration
    * The particles, with given volume fracion, are
    * placed in a cubic box of dimensions Xmax, Ymax, Zmax
    * and period boundaries are applied in all directions.
    * With a given strain-rate, all 6 period boundaries are moved inwards
    * isotropically to compress the particle gas to target volume fraction.
    * */

    Compressione_isotropa(std::string restartName)
    {
        setName(restartName);
        readRestartFile();
        setRestarted(false);
        particleSpecies =
dynamic_cast<LinearPlasticViscoelasticFrictionSpecies*>(speciesHandler.getObject(0));
        std::cout << "input = " << getName() << std::endl;
    }

    LinearPlasticViscoelasticFrictionSpecies* particleSpecies;
    Mdouble tmax, N, Xp, Yp, Zp, Lx, Ly, Lz, Px, Py, Pz;
```


Mdouble Cx, Cy, Cz, rpx, rpy, rpz; //!Box length in x-y-z, center position of the box and particle position relative to the center of box

Mdouble particleDiameter, rhop, en, K1, K2, Kc, Phic, mu_slid, mu_roll, mu_tor, poly, Ka, Fa;

Mdouble dot_strain_xx, dot_strain_yy, dot_strain_zz;

Mdouble nu_ini, nu_final, dot_strain_iso;

Mdouble dampingCoefficient = 0.0;

Mdouble
ActualPressure, PressureGoal, eGoal, Volume, e, totalForceX, totalForceY, totalForceZ, averageForceX, averageForceY, averageForceZ; //!Stress control constants

Mdouble stressXX, stressXX_static, stressXX_kinetic, stressYY, stressYY_static, stressYY_kinetic, stressXZ_static, stressYZ_static;

Mdouble stressZZ, stressZZ_static, stressZZ_kinetic, stressXY, stressXY_static, stressXY_kinetic, stressXZ, stressYZ; //!stress components calculation variables

Mdouble RHOP, Jx, Jy, Jz, Fx, Fy, Fz, Fxy; //!stress components calculation variables

void computeExternalForces (BaseParticle * CI) override

```
{
    DPMBase::computeExternalForces (CI);
    if (!CI->isFixed())
    {
        // Background damping
        CI->addForce(-dampingCoefficient * CI->getVelocity());
    }
}
```

void setupInitialConditions()

```
{
    double Rmin = particleHandler.getObject(0)->getRadius();
    double Rmax = particleHandler.getObject(0)->getRadius();
    double N = particleHandler.getNumberOfObjects();
    Mdouble Vp = 0;
    // particles properties and initial positions
```

```

    for (int i=1; i < (N-1); i++) {
        Rmin = std::min(Rmin,particleHandler.getObject(i)->getRadius());
        Rmax = std::max(Rmax,particleHandler.getObject(i)->getRadius());
    }

    double particleDiameter = 2.0*Rmin;
    double mass = rhop*constants::pi*mathsFunc::cubic(particleDiameter)/6.0;
    double tc = std::sqrt( mass/2.0/K1*( mathsFunc::square(constants::pi) +
    mathsFunc::square(log(en) ) ));

    setTimeStep(tc/50);
    setTimeMax(tmax);
    setGravity(Vec3D(0.0,0.0,0.0));

    // particleSpecies (d average = 2)
    particleSpecies->setDensity(rhop);
    particleSpecies->setCollisionTimeAndRestitutionCoefficient(tc,en,mass);
    particleSpecies->setPlasticParameters(K1,K2,Kc,Phic);
    if ( mu_slid == 0){
        particleSpecies->setSlidingStiffness(0.0);
    }
    else{
        particleSpecies->setSlidingStiffness(2.0/10.0*particleSpecies-
>getLoadingStiffness());
    }
    if ( mu_roll == 0){
        particleSpecies->setRollingStiffness(0.0);
    }
    else{
        particleSpecies->setRollingStiffness(2.0/10.0*particleSpecies-
>getLoadingStiffness());
    }
    if ( mu_tor == 0){

```

```

        particleSpecies->setTorsionStiffness(0.0);
    }
    else{
        particleSpecies->setTorsionStiffness(2.0/10.0*particleSpecies-
>getLoadingStiffness());
    }
    particleSpecies->setSlidingFrictionCoefficient(mu_slid);
    particleSpecies->setSlidingFrictionCoefficientStatic(mu_slid);
    particleSpecies->setRollingFrictionCoefficient(mu_roll);
    particleSpecies->setRollingFrictionCoefficientStatic(mu_roll);
    particleSpecies->setTorsionFrictionCoefficient(mu_tor);
    particleSpecies->setTorsionFrictionCoefficientStatic(mu_tor);
    particleSpecies->setSlidingDissipation(2.0/10.0*particleSpecies-
>getDissipation());
    particleSpecies->setRollingDissipation(2.0/10.0*particleSpecies-
>getDissipation());
    particleSpecies->setTorsionDissipation(2.0/10.0*particleSpecies-
>getDissipation());
    dampingCoefficient = 0.1*particleSpecies->getDissipation();

    for (int i=0; i < N; i++) {
        //particleHandler.getObject(i)->setVelocity(Vec3D(0.0, 0.0, 0.0));
        particleHandler.getObject(i)->setSpecies(particleSpecies);
        Vp = Vp + particleHandler.getObject(i)->getVolume();
    }

    //dot_strain_iso = std::log(nu_ini/nu_final)/(3*tmax); //calculate the isotropic
strain rate
    dot_strain_iso = -10e-2;
    dot_strain_xx = dot_strain_iso;
    dot_strain_yy = dot_strain_iso;
    dot_strain_zz = dot_strain_iso;
}

```

```

// Strain-rate application before integration
void actionsBeforeTimeStep() override
{
    Lx = (getXMax()-getXMin()); // Box length
    Ly, Lyand Lz in current time step
    Ly = (getYMax()-getYMin());
    Lz = (getZMax()-getZMin());
    Px = (getXMax()+getXMin())/2.0;
    Py = (getYMax()+getYMin())/2.0;
    Pz = (getZMax()+getZMin())/2.0;

    // Change the system size according to next time step
    setXMax(getXMax()+0.5*Lx*dot_strain_xx*getTimeStep());
    setXMin(getXMin()-0.5*Lx*dot_strain_xx*getTimeStep());
    setYMax(getYMax()+0.5*Ly*dot_strain_yy*getTimeStep());
    setYMin(getYMin()-0.5*Ly*dot_strain_yy*getTimeStep());
    setZMax(getZMax()+0.5*Lz*dot_strain_zz*getTimeStep());
    setZMin(getZMin()-0.5*Lz*dot_strain_zz*getTimeStep());

    // Give the strain-rate for all particles and move them to next timestep before
    integration
    N = particleHandler.getNumberOfObjects();
    Mdouble Vp1 = 0;
    for (int i=0; i < N; i++) {
        Xp = particleHandler.getObject(i)-> getPosition().X - Px;
        Yp = particleHandler.getObject(i)-> getPosition().Y - Py;
        Zp = particleHandler.getObject(i)-> getPosition().Z - Pz;
        particleHandler.getObject(i)-
>move(Vec3D(dot_strain_xx*getTimeStep()*Xp,dot_strain_yy*getTimeStep()*Yp,
dot_strain_zz*getTimeStep()*Zp));
        Vp1 = Vp1 + particleHandler.getObject(i)->getVolume();
    }
}

```

```

// Move the boundary in x direction to next time step
PeriodicBoundary* normWall;
normWall = dynamic_cast<PeriodicBoundary*>(boundaryHandler.getObject(0));
normWall->set(Vec3D(1.0, 0.0, 0.0), getXMin(),getXMax());

// Move the boundary in y direction to next time step
normWall = dynamic_cast<PeriodicBoundary*>(boundaryHandler.getObject(1));
normWall->set(Vec3D(0.0, 1.0, 0.0), getYMin(),getYMax());

// Move the boundary in z direction to next time step
normWall = dynamic_cast<PeriodicBoundary*>(boundaryHandler.getObject(2));
normWall->set(Vec3D(0.0, 0.0, 1.0), getZMin(),getZMax());

Lx = (getXMax()-getXMin()); Ly = (getYMax()-getYMin()); Lz =
(getZMax()-getZMin());
Cx = (getXMax()+getXMin())/2.0; Cy = (getYMax()+getYMin())/2.0; Cz =
(getZMax()+getZMin())/2.0;!! Box length Lx, Ly and Lz, and center point C of the box
Volume = (getXMax()-getXMin())*(getYMax()-getYMin())*(getZMax()-
getZMin()); !!Get the volume of the box for later averaging
e=1/(Vp1/Volume)-1;

stressXX = 0.0; stressYY = 0.0; stressZZ = 0.0; stressXY = 0.0;
stressXX_static = 0.0; stressYY_static = 0.0; stressZZ_static = 0.0;
stressXY_static = 0.0;stressXZ_static = 0.0;stressYZ_static = 0.0;
stressXX_kinetic = 0.0; stressYY_kinetic = 0.0; stressZZ_kinetic = 0.0;
stressXY_kinetic = 0.0;
RHOP = 0.0;

int totalNumContacts = 0;

```

```

        //!calculate stress_yy for static part
        for (auto i : interactionHandler) {
            stressXX_static += i->getForce().X * i->getNormal().X * i-
>getDistance();
            stressYY_static += i->getForce().Y * i->getNormal().Y * i-
>getDistance();
            stressZZ_static += i->getForce().Z * i->getNormal().Z * i-
>getDistance();
            stressXY_static += i->getForce().X * i->getNormal().Y * i-
>getDistance();
            stressXZ_static += i->getForce().X * i->getNormal().Z * i-
>getDistance();
            stressYZ_static += i->getForce().Y * i->getNormal().Z * i-
>getDistance();

            totalForceX += i->getForce().X;
            totalForceY += i->getForce().Y;
            totalForceZ += i->getForce().Z;
            totalNumContacts++;
        }

```

```

        //! calculate the stress total and average over the volume

```

```

        stressXX = stressXX_static;
        stressXX /= Volume;
        stressYY = stressYY_static;
        stressYY /= Volume;
        stressZZ = stressZZ_static;
        stressZZ /= Volume;
        stressXY = stressXY_static;
        stressXY /= Volume;
        stressXZ = stressXZ_static;
        stressXZ /= Volume;
        stressYZ = stressYZ_static;

```

```

        stressYZ /= Volume;

        averageForceX = totalForceX/totalNumContacts;
        averageForceY = totalForceY/totalNumContacts;
        averageForceZ = totalForceZ/totalNumContacts;

        ActualPressure = (stressXX+stressYY+stressZZ)/3;

        if (e-eGoal<1e-3){

            dot_strain_iso = 0; //stop the compression process
            dot_strain_xx = dot_strain_iso;
            dot_strain_yy = dot_strain_iso;
            dot_strain_zz = dot_strain_iso;

            }else if (e-eGoal<1e-3 && getKineticEnergy()<1e-
5*getElasticEnergy()){
                setTimeMax(getTime());
            }
        }

        void printTime() const override {
            std::ofstream f;

            f.open("record_2.txt", std::ios_base::app);

            f << getTime() << " " << ActualPressure << " " << e << " " <<
getKineticEnergy()/getElasticEnergy() << " " << averageForceX << " " <<
averageForceY << " " << averageForceZ << std::endl;

        }

};

int main(int argc UNUSED, char *argv[] UNUSED)

```

```

{
    std::string restartName ("Creazione_Dominio"); //the Prefix of your restart file from
stage 1

    Compressione_isotropa problem(restartName);

    // -----

    problem.particleDiameter = 0.0011;           //set particle diameter
    problem.rhop = 2700.0;                       //set particle density
    problem.en = 0.8;                           //set restitution coefficient
    problem.K1 = 9400;                          //set loading stiffness
    problem.K2 = 9400;                          //set unloading stiffness
    problem.Kc = 0.0;                           //set cohesive stiffness

    problem.mu_slid = 0.0;                      //set sliding friction coefficient
    problem.mu_roll = 0.0;                     //set rolling friction coefficient
    problem.mu_tor = 0.0;                      //set torsional friction coefficient
    problem.Phic = 0.5;                        // penetration DepthMax, the
maximum depth of linear plastic-viscoelastic normal force
    problem.poly = 1.3;

    problem.PressureGoal=500;                   //set polydispersity
    problem.eGoal=0.35;

    //  problem.nu_ini = 0.40;                   //set initial volume fraction
    //  problem.nu_final = 0.90;                 //set final volume fraction
    problem.tmax = 3000;                       //set simulation time
    //-----

    problem.setName("Compressione_isotropa");

```



```
problem.setSaveCount(500);
problem.eneFile.setSaveCount(500);
problem.dataFile.setFileType(FileType::ONE_FILE);
problem.restartFile.setFileType(FileType::ONE_FILE);
problem.fStatFile.setFileType(FileType::ONE_FILE);
problem.eneFile.setFileType(FileType::ONE_FILE);
problem.setXBallsAdditionalArguments("-solidf -v0");

problem.solve();
}
```

A.7.3. Compressione edometrica $\sigma'_v = 1000 \text{ kPa}$

```
#include <Species/Species.h>
#include <fstream>
#include <Species/LinearPlasticViscoelasticFrictionSpecies.h>
#include <Mercury3D.h>
#include <Boundaries/PeriodicBoundary.h>
#include "Boundaries/LeesEdwardsBoundary.h"
#include <InteractionHandler.h>

class Compressione_assiale_1000: public Mercury3D{
public:
    /*! s2_IsotropicCompression will load the configuration from s1_IniGeneration
    * The particles, with given volume fracion, are
    * placed in a cubic box of dimensions Xmax, Ymax, Zmax
    * and period boundaries are applied in all directions.
    * With a given strain-rate, all 6 period boundaries are moved inwards
    * isotropically to compress the particle gas to target volume fraction.
    */

    Compressione_assiale_1000(std::string restartName)
    {
        setName(restartName);
        readRestartFile();
        setRestarted(false);
        particleSpecies =
dynamic_cast<LinearPlasticViscoelasticFrictionSpecies*>(speciesHandler.getObject(0));
        std::cout << "input = " << getName() << std::endl;
    }

    LinearPlasticViscoelasticFrictionSpecies* particleSpecies;
    Mdouble tmax, N, Xp, Yp, Zp, Lx, Ly, Lz, Px, Py, Pz;
```

Mdouble Cx, Cy, Cz, rpx, rpy, rpz; //!Box length in x-y-z, center position of the box and particle position relative to the center of box

Mdouble particleDiameter, rhop, en, K1, K2, Kc, Phic, mu_slid, mu_roll, mu_tor, poly, Ka, Fa;

Mdouble dot_strain_xx, dot_strain_yy, dot_strain_zz;

Mdouble nu_ini, nu_final, dot_strain_iso;

Mdouble dampingCoefficient = 0.0;

Mdouble
ActualPressure, PressureGoal, eGoal, Volume, e, totalForceX, totalForceY, totalForceZ, averageForceX, averageForceY, averageForceZ; //!Stress control constants

Mdouble stressXX, stressXX_static, stressXX_kinetic, stressYY, stressYY_static, stressYY_kinetic, stressXZ_static, stressYZ_static;

Mdouble stressZZ, stressZZ_static, stressZZ_kinetic, stressXY, stressXY_static, stressXY_kinetic, stressXZ, stressYZ; //!stress components calculation variables

Mdouble RHOP, Jx, Jy, Jz, Fx, Fy, Fz, Fxy; //!stress components calculation variables

void computeExternalForces (BaseParticle * CI) override

```
{  
    DPMBase::computeExternalForces (CI);  
    if (!CI->isFixed())  
    {  
        // Background damping  
        CI->addForce(-dampingCoefficient * CI->getVelocity());  
    }  
}
```

void setupInitialConditions()

```
{  
    double Rmin = particleHandler.getObject(0)->getRadius();  
    double Rmax = particleHandler.getObject(0)->getRadius();  
    double N = particleHandler.getNumberOfObjects();  
    Mdouble Vp = 0;  
    // particles properties and initial positions
```

```

    for (int i=1; i < (N-1); i++) {
        Rmin = std::min(Rmin,particleHandler.getObject(i)->getRadius());
        Rmax = std::max(Rmax,particleHandler.getObject(i)->getRadius());
    }
    double particleDiameter = 2.0*Rmin;
    double mass = rhop*constants::pi*mathsFunc::cubic(particleDiameter)/6.0;
    double tc = std::sqrt( mass/2.0/K1*( mathsFunc::square(constants::pi) +
    mathsFunc::square(log(en) ) ));

    setTimeStep(tc/50);
        setTimeMax(tmax);
    setGravity(Vec3D(0.0,0.0,0.0));

    // particleSpecies (d average = 2)
    particleSpecies->setDensity(rhop);
    particleSpecies->setCollisionTimeAndRestitutionCoefficient(tc,en,mass);
    particleSpecies->setPlasticParameters(K1,K2,Kc,Phic);
        if ( mu_slid == 0){
            particleSpecies->setSlidingStiffness(0.0);
        }
        else{
            particleSpecies->setSlidingStiffness(2.0/10.0*particleSpecies-
>getLoadingStiffness());
        }
        if ( mu_roll == 0){
            particleSpecies->setRollingStiffness(0.0);
        }
        else{

```

```

        particleSpecies->setRollingStiffness(2.0/10.0*particleSpecies-
>getLoadingStiffness());
    }
    if ( mu_tor == 0){
        particleSpecies->setTorsionStiffness(0.0);
    }
    else{
        particleSpecies->setTorsionStiffness(2.0/10.0*particleSpecies-
>getLoadingStiffness());
    }
    particleSpecies->setSlidingFrictionCoefficient(mu_slid);
    particleSpecies->setSlidingFrictionCoefficientStatic(mu_slid);
    particleSpecies->setRollingFrictionCoefficient(mu_roll);
    particleSpecies->setRollingFrictionCoefficientStatic(mu_roll);
    particleSpecies->setTorsionFrictionCoefficient(mu_tor);
    particleSpecies->setTorsionFrictionCoefficientStatic(mu_tor);
    particleSpecies->setSlidingDissipation(2.0/10.0*particleSpecies-
>getDissipation());
    particleSpecies->setRollingDissipation(2.0/10.0*particleSpecies-
>getDissipation());
    particleSpecies->setTorsionDissipation(2.0/10.0*particleSpecies-
>getDissipation());
    dampingCoefficient = 0.1*particleSpecies->getDissipation();

    for (int i=0; i < N; i++) {
        //particleHandler.getObject(i)->setVelocity(Vec3D(0.0, 0.0, 0.0));
        particleHandler.getObject(i)->setSpecies(particleSpecies);
        Vp = Vp + particleHandler.getObject(i)->getVolume();
    }

    //dot_strain_iso = std::log(nu_ini/nu_final)/(3*tmax); //calculate the isotropic
strain rate

```

```

        dot_strain_iso = -10e-2;
        dot_strain_xx = 0;
        dot_strain_yy = 0;
        dot_strain_zz = dot_strain_iso;

    }

    // Strain-rate application before integration
    void actionsBeforeTimeStep() override
    {
        Lx = (getXMax()-getXMin()); // Box length
        // Lx, Ly and Lz in current time step
        Ly = (getYMax()-getYMin());
        Lz = (getZMax()-getZMin());
        Px = (getXMax()+getXMin())/2.0;
        Py = (getYMax()+getYMin())/2.0;
        Pz = (getZMax()+getZMin())/2.0;

        // Change the system size according to next time step
        setXMax(getXMax()+0.5*Lx*dot_strain_xx*getTimeStep());
        setXMin(getXMin()-0.5*Lx*dot_strain_xx*getTimeStep());
        setYMax(getYMax()+0.5*Ly*dot_strain_yy*getTimeStep());
        setYMin(getYMin()-0.5*Ly*dot_strain_yy*getTimeStep());
        setZMax(getZMax()+0.5*Lz*dot_strain_zz*getTimeStep());
        setZMin(getZMin()-0.5*Lz*dot_strain_zz*getTimeStep());

        // Give the strain-rate for all particles and move them to next timestep before
        integration
        N = particleHandler.getNumberOfObjects();
        Mdouble Vp1 = 0;

```

```

for (int i=0; i < N; i++) {
    Xp = particleHandler.getObject(i)-> getPosition().X - Px;
    Yp = particleHandler.getObject(i)-> getPosition().Y - Py;
    Zp = particleHandler.getObject(i)-> getPosition().Z - Pz;
    particleHandler.getObject(i)-
>move(Vec3D(dot_strain_xx*getTimeStep()*Xp,dot_strain_yy*getTimeStep()*Yp,
dot_strain_zz*getTimeStep()*Zp));
    Vp1 = Vp1 + particleHandler.getObject(i)->getVolume();
}

// Move the boundary in x direction to next time step
PeriodicBoundary* normWall;
normWall = dynamic_cast<PeriodicBoundary*>(boundaryHandler.getObject(0));
normWall->set(Vec3D(1.0, 0.0, 0.0), getXMin(),getXMax());

// Move the boundary in y direction to next time step
normWall = dynamic_cast<PeriodicBoundary*>(boundaryHandler.getObject(1));
normWall->set(Vec3D(0.0, 1.0, 0.0), getYMin(),getYMax());

// Move the boundary in z direction to next time step
normWall = dynamic_cast<PeriodicBoundary*>(boundaryHandler.getObject(2));
normWall->set(Vec3D(0.0, 0.0, 1.0), getZMin(),getZMax());

Lx = (getXMax()-getXMin()); Ly = (getYMax()-getYMin()); Lz =
(getZMax()-getZMin());
Cx = (getXMax()+getXMin())/2.0; Cy = (getYMax()+getYMin())/2.0; Cz =
(getZMax()+getZMin())/2.0;!! Box length Lx, Lyand Lz, and center point C of the box
Volume = (getXMax()-getXMin())*(getYMax()-getYMin())*(getZMax()-
getZMin()); !!Get the volume of the box for later averaging
e=1/(Vp1/Volume)-1;

stressXX = 0.0; stressYY = 0.0; stressZZ = 0.0; stressXY = 0.0;

```

```

stressXX_static = 0.0; stressYY_static = 0.0; stressZZ_static = 0.0;
stressXY_static = 0.0; stressXZ_static = 0.0; stressYZ_static = 0.0;
stressXX_kinetic = 0.0; stressYY_kinetic = 0.0; stressZZ_kinetic = 0.0;
stressXY_kinetic = 0.0;
RHOP = 0.0;

int totalNumContacts = 0;

    //!calculate stress_yy for static part
    for (auto i : interactionHandler) {
        stressXX_static += i->getForce().X * i->getNormal().X * i-
>getDistance();
        stressYY_static += i->getForce().Y * i->getNormal().Y * i-
>getDistance();
        stressZZ_static += i->getForce().Z * i->getNormal().Z * i-
>getDistance();
        stressXY_static += i->getForce().X * i->getNormal().Y * i-
>getDistance();
        stressXZ_static += i->getForce().X * i->getNormal().Z * i-
>getDistance();
        stressYZ_static += i->getForce().Y * i->getNormal().Z * i-
>getDistance();

        totalForceX += i->getForce().X;
        totalForceY += i->getForce().Y;
        totalForceZ += i->getForce().Z;
        totalNumContacts++;
    }

    //! calculate the stress total and average over the volume
    stressXX = stressXX_static;
    stressXX /= Volume;
    stressYY = stressYY_static;

```



```

stressYY /= Volume;
stressZZ = stressZZ_static;
stressZZ /= Volume;
stressXY = stressXY_static;
stressXY /= Volume;
stressXZ = stressXZ_static;
stressXZ /= Volume;
stressYZ = stressYZ_static;
stressYZ /= Volume;

```

```

        averageForceX = totalForceX/totalNumContacts;
averageForceY = totalForceY/totalNumContacts;
averageForceZ = totalForceZ/totalNumContacts;

```

```

ActualPressure = stressZZ;

```

```

if (e-eGoal<1e-3){

```

```

    dot_strain_iso = 0; //stop the compression process
    dot_strain_xx = dot_strain_iso;
    dot_strain_yy = dot_strain_iso;
    dot_strain_zz = dot_strain_iso;

```

```

        }else if (e-eGoal<1e-3 && getKineticEnergy()<1e-
5*getElasticEnergy()){
            setTimeMax(getTime());
        }

```

```

}

```

```

void printTime() const override {
    std::ofstream f;

    f.open("record_3.txt", std::ios_base::app);

    f << getTime() << " " << ActualPressure << " " << e << " " <<
    getKineticEnergy()/getElasticEnergy() << " " << averageForceX << " " <<
    averageForceY << " " << averageForceZ << std::endl;

}

};

int main(int argc UNUSED, char *argv[] UNUSED)
{
    std::string restartName ("Compressione_isotropa"); //the Prefix of your restart file
    from stage 1

    Compressione_assiale_1000 problem(restartName);

    // -----

    problem.particleDiameter = 0.0011;           //set particle diameter
    problem.rhop = 2700.0;                        //set particle density
    problem.en = 0.8;                            //set restitution coefficient
    problem.K1 = 9400;                           //set loading stiffness
    problem.K2 = 9400;                           //set unloading stiffness
    problem.Kc = 0.0;                            //set cohesive stiffness

    problem.mu_slid = 0.14;                      //set sliding friction coefficient
    problem.mu_roll = 0.0;                      //set rolling friction coefficient
    problem.mu_tor = 0.0;                       //set torsional friction coefficient
    problem.Phic = 0.5;                         // penetration DepthMax, the
    maximum depth of linear plastic-viscoelastic normal force

```

```

problem.poly = 1.3;
problem.PressureGoal=1000;
problem.eGoal=0.33;           //set polydispersity
problem.tmax = 3000;           //set simulation time
//-----

problem.setName("Compressione_assiale_1000");


problem.setSaveCount(500);
problem.eneFile.setSaveCount(500);
problem.dataFile.setFileType(FileType::ONE_FILE);
problem.restartFile.setFileType(FileType::ONE_FILE);
problem.fStatFile.setFileType(FileType::ONE_FILE);
problem.eneFile.setFileType(FileType::ONE_FILE);


problem.setXBallsAdditionalArguments("-solidf -v0");


problem.solve();
}

```

A.7.4. Compressione edometrica $\sigma'_v = 2000 \text{ kPa}$

```
#include <Species/Species.h>
#include <fstream>
#include <Species/LinearPlasticViscoelasticFrictionSpecies.h>
#include <Mercury3D.h>
#include <Boundaries/PeriodicBoundary.h>
#include "Boundaries/LeesEdwardsBoundary.h"
#include <InteractionHandler.h>

class Compressione_assiale_2000: public Mercury3D{
public:
    /*! s2_IsotropicCompression will load the configuration from s1_IniGeneration
    * The particles, with given volume fracion, are
    * placed in a cubic box of dimensions Xmax, Ymax, Zmax
    * and period boundaries are applied in all directions.
    * With a given strain-rate, all 6 period boundaries are moved inwards
    * isotropically to compress the particle gas to target volume fraction.
    */

    Compressione_assiale_2000(std::string restartName)
    {
        setName(restartName);
        readRestartFile();
        setRestarted(false);
        particleSpecies =
dynamic_cast<LinearPlasticViscoelasticFrictionSpecies*>(speciesHandler.getObject(0));
        std::cout << "input = " << getName() << std::endl;
    }

    LinearPlasticViscoelasticFrictionSpecies* particleSpecies;
    Mdouble tmax, N, Xp, Yp, Zp, Lx, Ly, Lz, Px, Py, Pz;
```

Mdouble Cx, Cy, Cz, rpx, rpy, rpz; //!Box length in x-y-z, center position of the box and particle position relative to the center of box

Mdouble particleDiameter, rhop, en, K1, K2, Kc, Phic, mu_slid, mu_roll, mu_tor, poly, Ka, Fa;

Mdouble dot_strain_xx, dot_strain_yy, dot_strain_zz;

Mdouble nu_ini, nu_final, dot_strain_iso;

Mdouble dampingCoefficient = 0.0;

Mdouble ActualPressure, PressureGoal, eGoal, Volume, e, totalForceX, totalForceY, totalForceZ, averageForceX, averageForceY, averageForceZ; //!Stress control constants

Mdouble stressXX, stressXX_static, stressXX_kinetic, stressYY, stressYY_static, stressYY_kinetic, stressXZ_static, stressYZ_static;

Mdouble stressZZ, stressZZ_static, stressZZ_kinetic, stressXY, stressXY_static, stressXY_kinetic, stressXZ, stressYZ; //!stress components calculation variables

Mdouble RHOP, Jx, Jy, Jz, Fx, Fy, Fz, Fxy; //!stress components calculation variables

void computeExternalForces (BaseParticle * CI) override

```
{
    DPMBase::computeExternalForces (CI);
    if (!CI->isFixed())
    {
        // Background damping
        CI->addForce(-dampingCoefficient * CI->getVelocity());
    }
}
```

void setupInitialConditions()

```
{
    double Rmin = particleHandler.getObject(0)->getRadius();
    double Rmax = particleHandler.getObject(0)->getRadius();
    double N = particleHandler.getNumberOfObjects();
    Mdouble Vp = 0;
    // particles properties and initial positions
```

```

    for (int i=1; i < (N-1); i++) {
        Rmin = std::min(Rmin,particleHandler.getObject(i)->getRadius());
        Rmax = std::max(Rmax,particleHandler.getObject(i)->getRadius());
    }

    double particleDiameter = 2.0*Rmin;

    double mass = rhop*constants::pi*mathsFunc::cubic(particleDiameter)/6.0;

    double tc = std::sqrt( mass/2.0/K1*( mathsFunc::square(constants::pi) +
    mathsFunc::square(log(en) ) ));

    setTimeStep(tc/50);

    setTimeMax(tmax);

    setGravity(Vec3D(0.0,0.0,0.0));

    // particleSpecies (d average = 2)
    particleSpecies->setDensity(rhop);
    particleSpecies->setCollisionTimeAndRestitutionCoefficient(tc,en,mass);
    particleSpecies->setPlasticParameters(K1,K2,Kc,Phic);

    if ( mu_slid == 0){
        particleSpecies->setSlidingStiffness(0.0);
    }
    else{
        particleSpecies->setSlidingStiffness(2.0/10.0*particleSpecies-
>getLoadingStiffness());
    }

    if ( mu_roll == 0){
        particleSpecies->setRollingStiffness(0.0);
    }
    else{
        particleSpecies->setRollingStiffness(2.0/10.0*particleSpecies-
>getLoadingStiffness());
    }

```

```

    if ( mu_tor == 0 ){
        particleSpecies->setTorsionStiffness(0.0);
    }
    else{
        particleSpecies->setTorsionStiffness(2.0/10.0*particleSpecies-
>getLoadingStiffness());
    }

    particleSpecies->setSlidingFrictionCoefficient(mu_slid);
    particleSpecies->setSlidingFrictionCoefficientStatic(mu_slid);
    particleSpecies->setRollingFrictionCoefficient(mu_roll);
    particleSpecies->setRollingFrictionCoefficientStatic(mu_roll);
    particleSpecies->setTorsionFrictionCoefficient(mu_tor);
    particleSpecies->setTorsionFrictionCoefficientStatic(mu_tor);
    particleSpecies->setSlidingDissipation(2.0/10.0*particleSpecies-
>getDissipation());
    particleSpecies->setRollingDissipation(2.0/10.0*particleSpecies-
>getDissipation());
    particleSpecies->setTorsionDissipation(2.0/10.0*particleSpecies-
>getDissipation());

    dampingCoefficient = 0.1*particleSpecies->getDissipation();

    for (int i=0; i < N; i++) {
        //particleHandler.getObject(i)->setVelocity(Vec3D(0.0, 0.0, 0.0));
        particleHandler.getObject(i)->setSpecies(particleSpecies);
        Vp = Vp + particleHandler.getObject(i)->getVolume();
    }

    //dot_strain_iso = std::log(nu_ini/nu_final)/(3*tmax); //calculate the isotropic
strain rate
    dot_strain_iso = -10e-2;
    dot_strain_xx = 0;
    dot_strain_yy = 0;

```

```

        dot_strain_zz = dot_strain_iso;

    }

    // Strain-rate application before integration
    void actionsBeforeTimeStep() override
    {
        Lx = (getXMax()-getXMin()); // Box length
        // Lx, Ly and Lz in current time step
        Ly = (getYMax()-getYMin());
        Lz = (getZMax()-getZMin());
        Px = (getXMax()+getXMin())/2.0;
        Py = (getYMax()+getYMin())/2.0;
        Pz = (getZMax()+getZMin())/2.0;

        // Change the system size according to next time step
        setXMax(getXMax()+0.5*Lx*dot_strain_xx*getTimeStep());
        setXMin(getXMin()-0.5*Lx*dot_strain_xx*getTimeStep());
        setYMax(getYMax()+0.5*Ly*dot_strain_yy*getTimeStep());
        setYMin(getYMin()-0.5*Ly*dot_strain_yy*getTimeStep());
        setZMax(getZMax()+0.5*Lz*dot_strain_zz*getTimeStep());
        setZMin(getZMin()-0.5*Lz*dot_strain_zz*getTimeStep());

        // Give the strain-rate for all particles and move them to next timestep before
        integration
        N = particleHandler.getNumberOfObjects();
        Mdouble Vp1 = 0;
        for (int i=0; i < N; i++) {
            Xp = particleHandler.getObject(i)-> getPosition().X - Px;
            Yp = particleHandler.getObject(i)-> getPosition().Y - Py;
            Zp = particleHandler.getObject(i)-> getPosition().Z - Pz;

```



```

        particleHandler.getObject(i)-
>move(Vec3D(dot_strain_xx*getTimeStep()*Xp,dot_strain_yy*getTimeStep()*Yp,
dot_strain_zz*getTimeStep()*Zp));

        Vp1 = Vp1 + particleHandler.getObject(i)->getVolume();

    }

    // Move the boundary in x direction to next time step
    PeriodicBoundary* normWall;

    normWall = dynamic_cast<PeriodicBoundary*>(boundaryHandler.getObject(0));
    normWall->set(Vec3D(1.0, 0.0, 0.0), getXMin(),getXMax());

    // Move the boundary in y direction to next time step
    normWall = dynamic_cast<PeriodicBoundary*>(boundaryHandler.getObject(1));
    normWall->set(Vec3D(0.0, 1.0, 0.0), getYMin(),getYMax());

    // Move the boundary in z direction to next time step
    normWall = dynamic_cast<PeriodicBoundary*>(boundaryHandler.getObject(2));
    normWall->set(Vec3D(0.0, 0.0, 1.0), getZMin(),getZMax());

    Lx = (getXMax()-getXMin()); Ly = (getYMax()-getYMin()); Lz =
(getZMax()-getZMin());

    Cx = (getXMax()+getXMin())/2.0; Cy = (getYMax()+getYMin())/2.0; Cz =
(getZMax()+getZMin())/2.0; //! Box length Lx, Lyand Lz, and center point C of the box

    Volume = (getXMax()-getXMin())*(getYMax()-getYMin())*(getZMax()-
getZMin()); //!Get the volume of the box for later averaging

    e=1/(Vp1/Volume)-1;

    stressXX = 0.0; stressYY = 0.0; stressZZ = 0.0; stressXY = 0.0;

    stressXX_static = 0.0; stressYY_static = 0.0; stressZZ_static = 0.0;

    stressXY_static = 0.0;stressXZ_static = 0.0;stressYZ_static = 0.0;

    stressXX_kinetic = 0.0; stressYY_kinetic = 0.0; stressZZ_kinetic = 0.0;
    stressXY_kinetic = 0.0;

    RHOP = 0.0;

```

```

int totalNumContacts = 0;

    //!calculate stress_yy for static part
    for (auto i : interactionHandler) {
        stressXX_static += i->getForce().X * i->getNormal().X * i-
>getDistance();
        stressYY_static += i->getForce().Y * i->getNormal().Y * i-
>getDistance();
        stressZZ_static += i->getForce().Z * i->getNormal().Z * i-
>getDistance();
        stressXY_static += i->getForce().X * i->getNormal().Y * i-
>getDistance();
        stressXZ_static += i->getForce().X * i->getNormal().Z * i-
>getDistance();
        stressYZ_static += i->getForce().Y * i->getNormal().Z * i-
>getDistance();

        totalForceX += i->getForce().X;
        totalForceY += i->getForce().Y;
        totalForceZ += i->getForce().Z;
        totalNumContacts++;
    }

    //! calculate the stress total and average over the volume
    stressXX = stressXX_static;
    stressXX /= Volume;
    stressYY = stressYY_static;
    stressYY /= Volume;
    stressZZ = stressZZ_static;
    stressZZ /= Volume;
    stressXY = stressXY_static;
    stressXY /= Volume;
    stressXZ = stressXZ_static;
    stressXZ /= Volume;
    stressYZ = stressYZ_static;
    stressYZ /= Volume;

```

```

        averageForceX = totalForceX/totalNumContacts;
averageForceY = totalForceY/totalNumContacts;
averageForceZ = totalForceZ/totalNumContacts;
    ActualPressure = stressZZ;

    if (e-eGoal<1e-3){

        dot_strain_iso = 0; //stop the compression process
        dot_strain_xx = dot_strain_iso;
        dot_strain_yy = dot_strain_iso;
        dot_strain_zz = dot_strain_iso;

        }else if (e-eGoal<1e-3 && getKineticEnergy()<1e-
5*getElasticEnergy()){
            setTimeMax(getTime());
        }
    }

void printTime() const override {
    std::ofstream f;

    f.open("record_4.txt", std::ios_base::app);

    f << getTime() << " " << ActualPressure << " " << e << " " <<
getKineticEnergy()/getElasticEnergy() << " " << averageForceX << " " <<
averageForceY << " " << averageForceZ << std::endl;
}

};

int main(int argc UNUSED, char *argv[] UNUSED)
{
    std::string restartName ("Compressione_assiale_1000"); //the Prefix of your restart file
from stage 1

```

```

Compressione_assiale_2000 problem(restartName);

// -----
problem.particleDiameter = 0.0011;          //set particle diameter
problem.rhop = 2700.0;                      //set particle density
problem.en = 0.8;                          //set restitution coefficient
problem.K1 = 9400;                          //set loading stiffness
problem.K2 = 9400;                          //set unloading stiffness
problem.Kc = 0.0;                          //set cohesive stiffness

problem.mu_slid = 0.14;                    //set sliding friction coefficient
problem.mu_roll = 0.0;                    //set rolling friction coefficient
problem.mu_tor = 0.0;                    //set torsional friction coefficient
problem.Phic = 0.5;                      // penetration DepthMax, the
maximum depth of linear plastic-viscoelastic normal force
problem.poly = 1.3;
problem.PressureGoal=2000;
problem.eGoal=0.28;                      //set polydispersity
problem.tmax = 3000;                      //set simulation time
//-----
problem.setName("Compressione_assiale_2000");
problem.setSaveCount(500);
problem.eneFile.setSaveCount(500);
problem.dataFile.setFileType(FileType::ONE_FILE);
problem.restartFile.setFileType(FileType::ONE_FILE);
problem.fStatFile.setFileType(FileType::ONE_FILE);
problem.eneFile.setFileType(FileType::ONE_FILE);
problem.setXBallsAdditionalArguments("-solidf -v0");
problem.solve();
}

```