

POLITECNICO DI TORINO



Collegio di Ingegneria Civile

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile Geotecnica

LM-23 (DM270)

Tesi di Laurea Magistrale

Ritenzione idraulica di una bentonite sodica

Relatori:

Prof. Guido Musso

Prof. Renato Maria Cosentini

Ing. Paolo Trischitta

Candidato:

Salvatore Orlando

Luglio 2020

L'onestà il loro ideale,
il lavoro la loro passione.
Ai miei nonni, Stefano e Salvatore.

Abstract

The aim of this study is to determine and analyze the hydraulic retention of sodium bentonite, one of the main materials used for the construction of diaphragms walls.

The diaphragms walls, usually composed of bentonite cement or bentonite soil, are used to confine certain areas of the subsoil to counteract the contamination of groundwater by sources of surface pollution.

The hydraulic retention of a material is the relationship between the suction and a measure of the quantity of water present in the porous medium, as degree of saturation or water content.

Furthermore, suction is the pressure expression of the energy potential of water. This is expressed in matrix or total form. The total suction is the sum of the matrix and osmotic contributions.

During the laboratory activity, three different mixtures of sodium bentonite are developed, composed of three different aqueous solutions: distilled water, 0,12 molar NaCl solution and 0,12 molar NaOH solution.

In order to obtain the data of the hydraulic behavior, the specimens produced from the three mixtures are subjected to different laboratory techniques.

Over the years in the laboratory, techniques have been developed, that adopt the suction control and measuring the quantity of water, such as vapour equilibrium and the axis translation technique.

Other techniques, instead, measure suction by controlling the water quantity: filter paper technique and pycnometer WP4C.

The experimental data are fitted with a curve through Van Genuchten's analytic relation. This equation defines the hydraulic retention curve, which depend by three geotechnical parameters. Drying and wetting paths can be traced for each curve.

The curves obtained for each bentonite mixture are compared with each other and their differences are also analyzed. In particular, it can be shown that the curves of mixtures with lower ion concentration have higher matrix suction levels, with the same degree of saturation.

Sommario

Introduzione.....	1
1 Modelli di flusso insaturi.....	3
1.1 Capillarità.....	5
1.2 Curva di ritenzione idraulica.....	9
1.2.1 Suzione matriciale.....	9
1.2.2 Suzione totale e osmotica.....	12
1.2.3 Potenziale di matrice e altri potenziali.....	16
1.2.4 Il fenomeno d'isteresi.....	21
1.2.5 Modelli analitici di curve di ritenzione.....	24
2 Tecniche di laboratorio.....	27
2.1 Equilibrio di vapore.....	28
2.2 Traslazione degli assi.....	32
2.3 Carta da filtro.....	34
2.4 Psicrometro WP4C.....	38
3 Apparecchiature.....	40
3.1 Edometro a suzione controllata.....	40
3.1.1 Determinazione dei parametri caratteristici della pietra porosa.....	43
3.2 Psicrometro WP4C.....	45
3.3 Edometro per consolidazione.....	47
4 Materiali e preparazione provini.....	51
4.1 Bentonite.....	51
4.1.1 Limiti di Atterberg.....	53
4.2 Preparazione dei provini.....	54
4.2.1 Prova edometrica.....	56
5 Elaborazione dei dati.....	58
5.1 Curve di compressione.....	59
5.2 Equilibrio di vapore.....	63
5.3 Psicrometro a condensazione WP4C.....	71
5.4 Carta filtro.....	77
6 Interpretazione dei dati.....	86
6.1 Curve di compressione.....	87
6.2 Sviluppo dell'indice dei vuoti.....	88
6.3 Ritenzione idraulica.....	90
7 Conclusioni.....	102
<i>Bibliografia</i>	105

Indice delle figure

Figura 1 Sezione di una barriera in miscela bentonitica (diaframma)	2
Figura 2 Distribuzioni aria acqua a varie saturazioni: (a) saturazione pendolare; (b) anello pendolare tra due particelle; (c) saturazione funicolare; (d) saturazione insulare (Bear & Cheng, 2010)	4
Figura 3 Tensioni d'interfaccia (Bear-Cheng,2010)	5
Figura 4.....	6
Figura 5 Risalita capillare con $\theta \neq 0^\circ$ (Bear-Cheng,2010)	7
Figura 6 Curve di pressione capillare (Bear-Cheng, 2010)	8
Figura 7 Drenaggio e ribagnatura graduali (Bear-Cheng,2010)	11
Figura 8 Assemblamento tubi capillari.....	12
Figura 9 Componenti della suzione totale (Terreni insaturi, Dispense di Geotecnica – Università di Firenze,2011).....	13
Figura 10 Dimensione del diametro dei pori interstiziali (bentonite FEBEX; Musso et al.,2013)	15
Figura 11 Curva del potenziale di matrice con grado di saturazione (Bear-Cheng,2010).....	19
Figura 12 Cause dell'isteresi nella curva di ritenzione: effetto bottiglia di inchiostro ed effetto goccia di pioggia (Bear-Cheng,2010).....	22
Figura 13 Isteresi nelle curve di pressione capillare (Bear-Cheng,2010)	23
Figura 14 Modello di curva di ritenzione (Tuller e Or,2005)	26
Figura 15 Schema di provini all'interno di contenitori per tecnica equilibrio di vapore	29
Figura 16 Relazione tra suzione totale e concentrazione di NaCl in soluzione acquosa (Romero, 2001)	30
Figura 17 Valori teorici (Romero, 2001)	31
Figura 18 Apparecchiatura traslazione assi (Tarantino et al., 2008).....	34
Figura 19 Schema della tecnica della carta filtro (Bulut e Leong, 2008).....	35
Figura 20 Calibrazione carta da filtro	36
Figura 21 Curva della calibrazione carta da filtro (Musso et al., 2019).....	37
Figura 22 Psicrometro WP4C	38
Figura 23 Componenti dell'edometro a suzione controllata	41
Figura 24 Permeabilità della pietra porosa	44
Figura 25 Psicrometro WP4C	46
Figura 26 Componenti cella edometrica di carico Tecnotest (a sinistra), Wikeham-Farrance (a destra)	47
Figura 27 Telaio edometri Tecnotest	48
Figura 28 Telaio edometri Wikeham-Farrance	48
Figura 29 Valori standard dei carichi.....	49
Figura 30 Programma associato agli edometri	50
Figura 31 Strutture tetraedrica e ottaedrica della bentonite	51
Figura 32 Bentonite sodica.....	53
Figura 33 Miscelatore meccanico.....	55
Figura 34 Bentonite idratata	55
Figura 35 Prova edometrica	56
Figura 36 Curva di compressione del primo slurry della miscela con acqua distillata.....	60
Figura 37 Curva di compressione del secondo slurry della miscela con acqua distillata.....	60
Figura 38 Curva di compressione del primo slurry della miscela con soluzione di NaCl	61
Figura 39 Curva di compressione del secondo slurry della miscela con soluzione di NaCl	61
Figura 40 Curva di compressione del primo slurry della miscela con soluzione di NaOH	62
Figura 41 Valori teorici di differenti soluzioni (Romero,2011).....	63

Figura 42 Contenitori con tecnica di equilibrio di vapore	64
Figura 43 Andamento delle masse dei campioni di miscela con acqua distillata	65
Figura 44 Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela con acqua distillata	67
Figura 45 Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela con acqua distillata	67
Figura 46 Andamento delle masse dei campioni di miscela con soluzione NaCl.....	68
Figura 47 Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela con soluzione di NaCl	69
Figura 48 Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela con soluzione di NaCl	69
Figura 49 Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela con soluzione di NaOH	70
Figura 50 Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela con soluzione di NaOH	70
Figura 51 Dati ottenuti con WP4C per la miscela con acqua distillata	72
Figura 52 Dati ottenuti con WP4C per la miscela con acqua distillata	72
Figura 53 Dati ottenuti con WP4C per la miscela con soluzione di NaCl	73
Figura 54 Dati ottenuti con WP4C per la miscela con soluzione di NaCl	73
Figura 55 Dati ottenuti con WP4C per la miscela con acqua distillata	74
Figura 56 Dati ottenuti con WP4C per la miscela con acqua distillata	75
Figura 57 Dati ottenuti con WP4C per la miscela con soluzione di NaCl	75
Figura 58 Dati ottenuti con WP4C per la miscela con soluzione di NaCl	76
Figura 59 Due campioni di bentonite sodica.....	77
Figura 60 Due campioni assemblati per tecnica carta filtro	78
Figura 61 Contenitore con tecnica della carta filtro prima della chiusura.....	78
Figura 62 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con acqua distillata.....	80
Figura 63 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con acqua distillata.....	80
Figura 64 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con soluzione di NaCl	81
Figura 65 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con soluzione di NaCl	81
Figura 66 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con soluzione di NaOH	82
Figura 67 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con soluzione di NaOH	82
Figura 68 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con acqua distillata.....	83
Figura 69 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con acqua distillata.....	83
Figura 70 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con soluzione di NaCl	84
Figura 71 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con soluzione di NaCl	84
Figura 72 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con soluzione di NaOH	85
Figura 73 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con soluzione di NaOH	85
Figura 74 Confronto delle curve di compressione delle due miscele	87
Figura 75 Andamento dell'indice dei vuoti durante le tecniche per la miscela con acqua distillata	88
Figura 76 Andamento dell'indice dei vuoti durante le tecniche per la miscela con soluzione di NaCl	89
Figura 77 Confronto degli andamenti dell'indice dei vuoti durante le tecniche	89
Figura 78 Ritenzione idraulica della miscela con acqua distillata	90
Figura 79 Ritenzione idraulica della miscela con acqua distillata	90
Figura 80 Ritenzione idraulica della miscela con soluzione di NaCl.....	91
Figura 81 Ritenzione idraulica della miscela con soluzione di NaCl.....	91
Figura 82 Ritenzione idraulica della miscela con soluzione di NaOH.....	92
Figura 83 Ritenzione idraulica della miscela con soluzione di NaOH.....	92
Figura 84 Ritenzione idraulica della miscela con acqua distillata	93

Figura 85 Ritensione idraulica della miscela con acqua distillata	93
Figura 86 Ritensione idraulica della miscela con soluzione di NaCl.....	94
Figura 87 Ritensione idraulica della miscela con soluzione di NaCl.....	94
Figura 88 Ritensione idraulica della miscela con soluzione di NaOH.....	95
Figura 89 Ritensione idraulica della miscela con soluzione di NaOH.....	95
Figura 90 Fitting curve del grafico s-w per la miscela con acqua distillata	96
Figura 91 Fitting curve del grafico s-w per la miscela con soluzione di NaCl.....	96
Figura 92 Fitting curve del grafico s-w per la miscela con soluzione di NaOH.....	97
Figura 93 Fitting curve mediante van Genuchten della miscela con acqua distillata	98
Figura 94 Fitting curve mediante van Genuchten della miscela con acqua distillata	98
Figura 95 Fitting curve mediante van Genuchten della miscela con soluzione di NaCl.....	99
Figura 96 Fitting curve mediante van Genuchten della miscela con soluzione di NaCl.....	99
Figura 97 Fitting curve mediante van Genuchten della miscela con soluzione di NaOH.....	100
Figura 98 Fitting curve mediante van Genuchten della miscela con soluzione di NaOH.....	100
Figura 99 Confronto tra le curve $s-S_{eff}$	103
Figura 100 Confronto tra le curve s-w.....	103

Introduzione

Un evento comune è proprio la contaminazione delle acque sotterranee da fonti sulla superficie del suolo: i contaminanti disciolti provenienti dalla superficie si dissolvono in acqua e vengono trasportati in basso verso la falda freatica attraverso l'infiltrazione del flusso.

Inoltre, durante la diffusione di contaminanti si verificano vari fenomeni, ad esempio dispersione ed assorbimento. Questi influenzano la concentrazione di inquinanti nell'acqua, che alla fine raggiungeranno la falda acquifera. Nel seguente studio si analizza la modellazione del flusso in condizioni insature. In particolare, sarà fatta un'analisi e attente valutazioni sul movimento dell'acqua per poi approfondire il discorso sul movimento di sostanze contaminanti trasportate dall'acqua stessa poichè è importante prevedere il movimento e l'accumulo di contaminanti nella zona insatura e determinare la velocità con cui raggiungeranno la falda acquifera. Pertanto, si studia il flusso d'acqua e tutti i suoi fenomeni.

Per contrastare la contaminazione, è solito effettuare il confinamento di alcune zone con barriere composte da miscele cemento bentonite o terreno bentonite.

La costruzione delle barriere di confinamento si è sviluppata in Europa e negli Stati Uniti intorno alla metà dello scorso secolo. Tuttavia, i muri cemento bentonitici sono comunemente utilizzati in Europa e Regno Unito, mentre negli Stati Uniti si preferiscono i muri terreno-bentonite.

Tipicamente i muri hanno larghezza compresa tra 0,4 e 1,6 m e possono raggiungere profondità di 170 m; inoltre, possono essere aggiunti degli additivi come ceneri di carburante polverizzato (PFA) o scorie d'alto forno granulare macinate (GGBS) per ottenere alcune proprietà come incremento della durabilità o riduzione della permeabilità e dei costi. Normalmente le barriere cemento bentonite sono costituite dal 5% di bentonite e 95% di acqua. Poi il cemento è aggiunto al 20% al fango, il cemento Portland utilizzato viene miscelato al 75%-80% di scorie d'alto forno granulari macinate, in generale la quantità di

additivi aggiunti alla miscela dipende dai requisiti specifici che si vuole raggiungere. Lo scopo dei muri fangosi è quello di creare una barriera a bassa permeabilità per isolare i flussi d'acqua e le emissioni contaminanti. I muri sono costruiti scavando una trincea stretta e pompando dentro il fango bentonitico, mantenendo il livello al piano del terreno. Questi elementi devono presentare una bassa conducibilità idraulica e una forte resistenza agli attacchi chimici, infatti queste barriere subiscono un attacco chimico continuo per tutto l'arco della vita dell'opera. Dal punto di vista meccanico, il materiale utilizzato deve avere un comportamento plastico, in quanto si vuole evitare che a causa di spostamenti o rotture del terreno circostante le barriere vadano a rottura o si fessurino. La fessurazione di un solo elemento può comportare una via preferenziale per la migrazione dell'agente contaminante al di fuori della struttura, che quindi, perderebbe di efficacia (Brunetti, 2019).

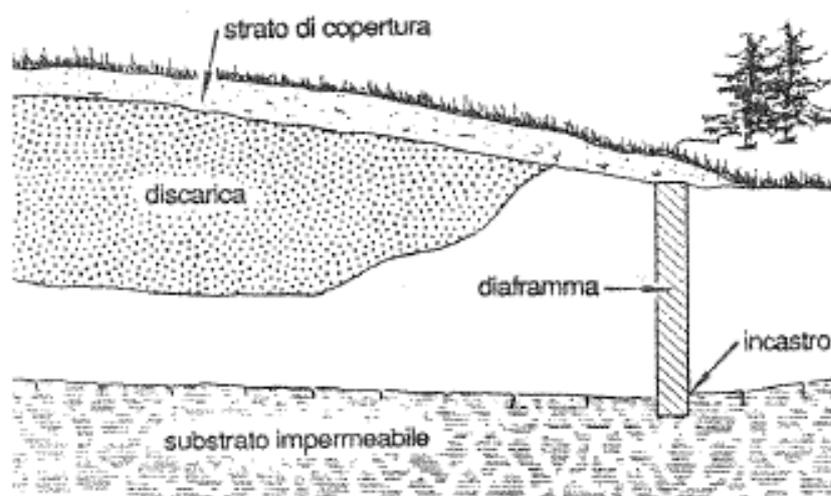


Figura 1 Sezione di una barriera in miscela bentonitica (diaframma)

In particolare, ci si propone di studiare la ritenzione idraulica di campioni di bentonite sodica in presenza di acqua interstiziale con differenti composizioni chimiche. Il comportamento idraulico delle miscele cemento bentonite è stato invece studiato in precedenza in un'altra tesi di laurea (Brunetti 2019).

1 Modelli di flusso insaturi

Un corpo insaturo è un mezzo particellare costituito da una fase solida, ossia particelle minerali che possono presentare diverse dimensioni granulometriche, da una fase liquida, generalmente acqua ma può verificarsi anche la presenza di altri liquidi e da una fase gassosa, come l'aria ed il vapor d'acqua o talvolta, altri gas.

Lo spazio vuoto all'interno del corpo insaturo è parzialmente riempito dall'aria ed in parte dall'acqua. In particolare, le molecole d'acqua possono muoversi sottoforma di acqua interstiziale, nei vuoti interparticellari, oppure come acqua adsorbita, aderenti alle superfici delle particelle solide attraverso legami elettrochimici.

Possono essere utilizzate due variabili per definire la quantità relativa di acqua in un determinato momento in prossimità di un punto di un dominio medio poroso:

- Frazione volumetrica di una fase α :

$$\theta_\alpha = \frac{V_\alpha}{V_T} \quad \text{con } \alpha = a, w \quad 0 < \theta_\alpha < \Phi$$

V_α è il volume di una fase fluida

V_T è il volume totale

Φ è la porosità

- Grado di saturazione:

$$S_r = \frac{V_w}{V_V} \quad 0 < S_r < 1$$

V_w è il volume di una fase fluida (acqua)

V_T è il volume dei vuoti

Come definito in precedenza, le distribuzioni delle due fasi, aria e acqua, possono presentarsi in diverse forme all'interno dello spazio vuoto in base al livello di saturazione.

Per bassi livelli di saturazione, grazie al fenomeno di tensione superficiale, l'acqua si presenta a forma di anelli attorno ai punti di contatto delle particelle solide. In questo stato, chiamato *anelli pendolari*, l'acqua crea un ponte tra i grani adiacenti ma non a contatto.

Gli anelli pendolari non sono in grado di generare una fase acquosa continua poiché si presentano isolati; per questo livello di saturazione infatti, l'acqua è adsorbita sulle superfici solide sotto forma di un film sottile.

Con l'incremento della saturazione acquosa, gli anelli pendolari si espandono e si uniscono. Superato un certo livello di saturazione critica, si raggiunge un nuovo livello di saturazione, chiamato *funicolare*, nel quale si generano dallo stato precedente fasi continue di acqua e aria.

Passando ad un livello superiore di saturazione acquosa, l'aria non si presenta più in una fase continua ma sotto forma di bolle site nei pori più grandi; in tal caso si dice quindi che l'aria è in uno stato di saturazione *insulare*: una particella d'aria può muoversi solo se viene applicata una differenza di pressione dall'acqua circostante, sufficiente per spremere la attraverso la costrizione.

Infine, si ottiene una saturazione completa d'acqua quando non ci sono più particelle d'aria nei vuoti del mezzo.

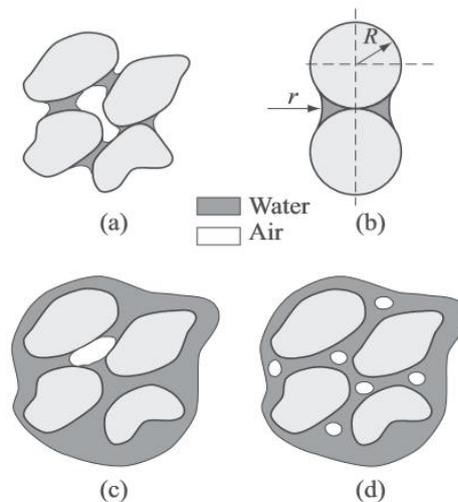


Figura 2 Distribuzioni aria acqua a varie saturazioni: (a) saturazione pendolare; (b) anello pendolare tra due particelle; (c) saturazione funicolare; (d) saturazione insulare (Bear & Cheng, 2010)

1.1 Capillarità

Un liquido che riempie parzialmente un contenitore forma una superficie con qualsiasi altro immiscibile fluido, un liquido o un gas, presente nello stesso contenitore.

Questa superficie è in realtà una zona di transizione molto sottile tra le due fasi ed intorno ad essa, le proprietà del fluido differiscono significativamente da quelle all'interno del corpo di entrambi i fluidi, entro una distanza di alcune molecole su entrambi i lati della zona di transizione.

All'interno di questa superficie di transizione, l'energia libera interfacciale si manifesta come una tensione interfacciale, misurata come energia per unità di area. Per due fasi fluide, α e β , la tensione interfacciale, $\gamma_{\alpha\beta}$, è definita come la quantità di lavoro che deve essere eseguito per separare un'area unitaria della fase α dalla fase β , o equivalentemente, per aumentare la loro interfaccia.

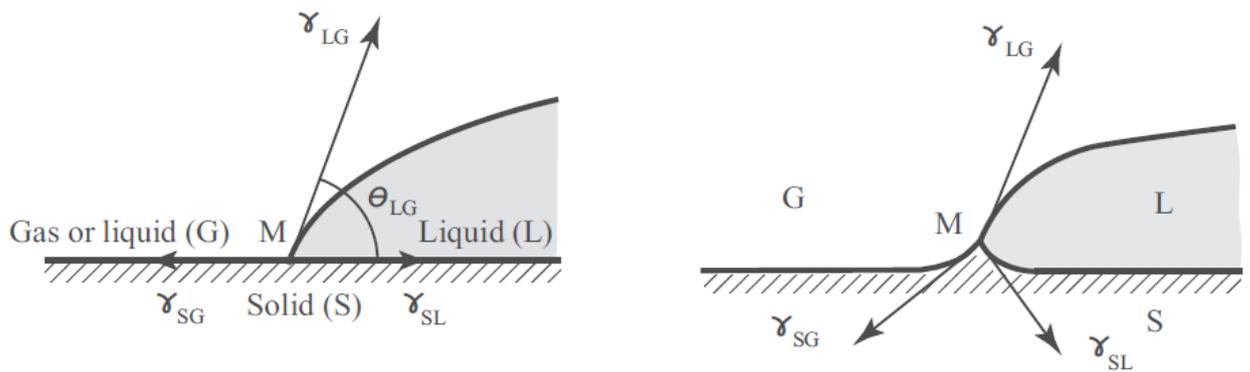


Figura 3 Tensioni d'interfaccia (Bear-Cheng,2010)

La prima figura mostra due fluidi immiscibili a contatto con una superficie piana di un solido.

M è il punto in cui si incontrano le tre fasi e γ_{SG} , γ_{SL} , γ_{LG} sono le tre tensioni interfaciali di ogni interfaccia.

L'angolo θ_{LG} , chiamato angolo di contatto o angolo di bagnatura, indica l'angolo tra la superficie solida e l'interfaccia fluido-fluido. Dipende dalle proprietà dei due fluidi ed esprime l'affinità dei fluidi per il solido.

All'equilibrio,

$$\gamma_{LG} \cos \theta_{LG} + \gamma_{SL} = \gamma_{SG} \text{ o } \cos \theta_{LG} = \frac{\gamma_{SG} - \gamma_{SL}}{\gamma_{LG}}$$

Il fluido per cui $\theta_{LG} < 90^\circ$ si dice che bagna il solido ed è perciò chiamato fluido bagnante; quando invece $\theta_{LG} > 90^\circ$, il fluido è chiamato fluido non bagnante. Di solito accade che nella zona insatura del suolo, l'acqua è il fluido bagnante, mentre l'aria è quella non bagnante. Due fluidi immiscibili sono separati da un'interfaccia curva che genera una discontinuità tensionale.

Il salto nello stress normale, o pressione, è una conseguenza della tensione interfacciale che esiste in ogni punto di tale interfaccia. La differenza tra la pressione nel fluido che occupa il lato concavo di un'interfaccia, $p_{concave}$, e la pressione del fluido che occupa il lato convesso, p_{convex} , si chiama pressione capillare p_c .

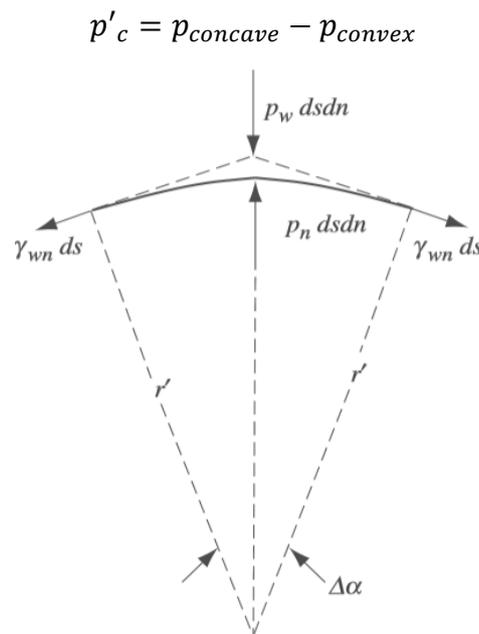


Figura 4

Figura 4: Forze d'equilibrio su un'interfaccia curva (Bear-Cheng,2010)

Assumendo la tensione d'interfaccia tra i due fluidi, γ_{wn} , costante:

$$p'_c = p_n - p_w = \gamma_{wn} \left(\frac{1}{r'} + \frac{1}{r''} \right) = \frac{2}{r^*} \gamma_{wn}$$

- r' e r'' raggi di curvatura principali della superficie
- r^* raggio di curvatura medio

Quando due fasi fluide occupano lo spazio vuoto, una verrà identificata come il fluido bagnante e l'altro come non bagnante. La pressione capillare sarà definita come la differenza di pressione tra il non bagnante ed il bagnante.

Così nel caso generale, di un fluido bagnante $\theta_{LG} \neq 0$, in un tubo circolare di diametro piccolo, la differenza di pressione può essere scritta in termini del raggio del tubo R , nella forma:

considerando

$$r^* = \frac{R}{\cos \theta_{LG}}$$

$$p'_c = \frac{2\gamma_{wn} \cos \theta_{LG}}{R} \quad (1.1)$$

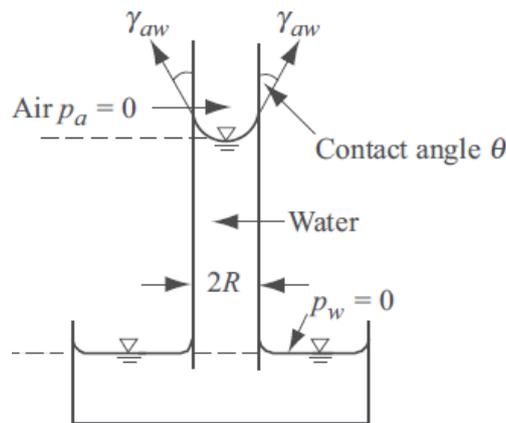


Figura 5 Risalita capillare con $\vartheta \neq 0^\circ$ (Bear-Cheng, 2010)

In un mezzo poroso, si può visualizzare lo stretto passaggio tra i grani come un tubo capillare, rappresentando tale passaggio con un raggio equivalente R . Nella zona insatura, si assume che la pressione dell'aria è pari alla pressione atmosferica costante.

$$\text{se } p_n = u_a = 0$$

$$p'_c = -p_w = -u_w$$

Poiché $p'_c > 0$, la pressione u_w dell'acqua presente nello spazio vuoto del terreno insaturo, con gas alla pressione atmosferica, è sempre negativa.

$$u_w = -h_r \gamma_w$$

- h_r : altezza piezometrica;
- γ_w : densità dell'acqua;

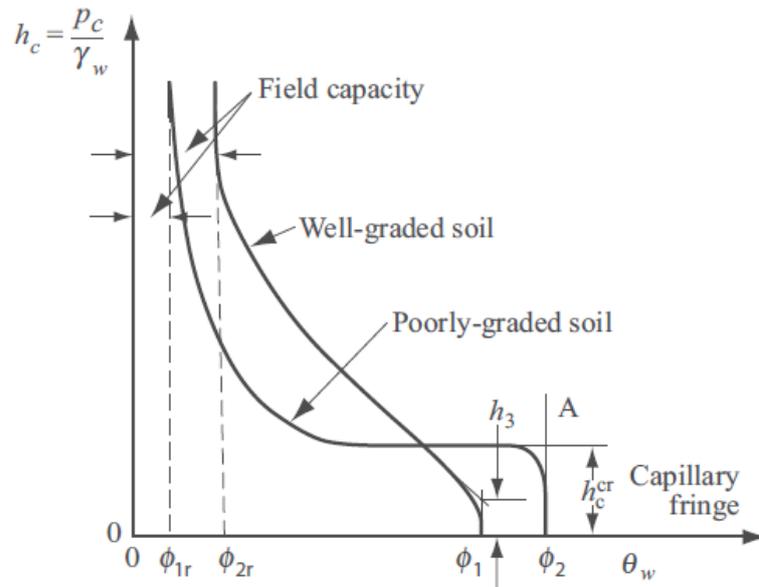


Figura 6 Curve di pressione capillare (Bear-Cheng, 2010)

Nella figura 6 si può notare una rappresentazione di due curve che mettono in relazione la pressione capillare media (sottoforma di *pressure head* h_c) con il diametro dei tubi capillari Φ .

Partendo da un campione completamente saturo d'acqua, si può ottenere una pressione critica p_c^{cr} (h_c^{cr}) drenando una quantità molto piccola di acqua. Quindi, le prime particelle di aria entrano nel campione quando viene raggiunta la pressione capillare critica, chiamata anche *pressione d'ingresso dell'aria*. All'aumentare della pressione capillare si osserva una riduzione iniziale del diametro, associata alla ritirata del menisco nei pori sulla superficie esterna del campione; pertanto, corrispondenza della soglia critica, l'aria entra nei pori più grandi ed iniziano a drenare.

1.2 Curva di ritenzione idraulica

Osservando la formulazione (1.1) è chiaro dedurre che la pressione capillare, oltre ad essere la differenza tra la pressione dell'aria e dell'acqua, dipende dal raggio che rappresenta il menisco.

L'obiettivo è di presentare la relazione tra queste componenti di due fasi fluide che occupano lo spazio vuoto di una zona insatura attraverso la ritenzione idraulica. In particolare, la curva di ritenzione idraulica è la relazione tra la suzione e una misura della quantità d'acqua presente nel mezzo poroso.

Si possono fare diverse analisi e considerazioni sulla curva di ritenzione attraverso varie tecniche di laboratorio, del tipo WP4, tecnica carta da filtro, tecnica equilibrio di vapore e la tecnica della traslazione degli assi, meglio approfondite successivamente.

Di seguito, si descrive ogni aspetto riguardante la curva di ritenzione idraulica ed i modelli analitici utilizzati nel corso degli anni.

1.2.1 Suzione matriciale

In un terreno parzialmente saturo, a causa della tensione superficiale, la pressione dell'acqua nei pori (u_w) risulta sempre inferiore alla pressione dell'aria nei pori (u_a). La differenza tra la pressione dell'aria, che in condizioni naturali è pari alla pressione atmosferica, e la pressione dell'acqua nei pori è detta *suzione di matrice*. Quindi, la suzione di matrice è una analogia della pressione capillare.

$$s = p'_c = u_a - u_w$$

Considerando un campione di mezzo poroso inizialmente saturo sottoposto a drenaggio verso il basso con aria introdotta nella parte superiore, si possono valutare i cambiamenti nella saturazione d'acqua. In questo processo si possono sviluppare fasi di drenaggio e di bagnatura attraverso la formazione di menischi. Nei menischi si generano salti di pressione poiché il raggio di curvatura in ogni punto di un menisco è legato alla pressione

capillare. Se il raggio diventa man mano più piccolo, la pressione capillare o suzione matriciale diventerà più grande. In ogni fase, la più grande pressione capillare che può essere mantenuta da un'interfaccia locale corrisponde al raggio di curvatura più piccolo che ci può essere in un poro, o canale, attraverso il quale si trova l'interfaccia.

In generale, i pori hanno dimensioni e forme diverse; pertanto, non si svuotano tutti alla stessa pressione capillare: in particolare, i grandi pori (o quelli con canali o gola d'entrata più grandi) si svuotano a bassi livelli di suzione, mentre quelli con stretti canali di ingresso, supportano interfacce con raggio di curvatura minore e si svuotano a livelli di suzione matriciale più elevate. Man mano che il drenaggio dell'acqua avanza, l'interfaccia acqua-aria si ritira nei canali che supportano un raggio di curvatura ancora minore. Il fluido bagnante continuerà a ritirarsi fino a quando le interfacce locali non avranno preso posizioni di equilibrio nei canali sufficientemente stretti da supportare interfacce con raggio di curvatura minore. Se tutti i canali sono uguali e grandi, a una data suzione, nessun equilibrio può essere mantenuto e all'improvviso avverrà un drenaggio dell'acqua quasi completo per l'intero campione di mezzo poroso. L'eliminazione delle particelle di acqua (o qualsiasi liquido) non è mai del tutto completa perché una piccola quantità residua rimane sempre sottoforma di anelli pendolari isolati e sottoforma di film assorbito dalla matrice solida, per cui il grado di saturazione non è mai pari a zero ma presenta un valore minimo residuo.

La pressione capillare (suzione di matrice) aumenta al diminuire della saturazione dell'acqua, che corrisponde a una diminuzione della superficie interfacciale. Se si inverte il processo e si inizia a riempire lo spazio dei pori con acqua, i raggi di curvatura delle interfacce diventano progressivamente più grandi.

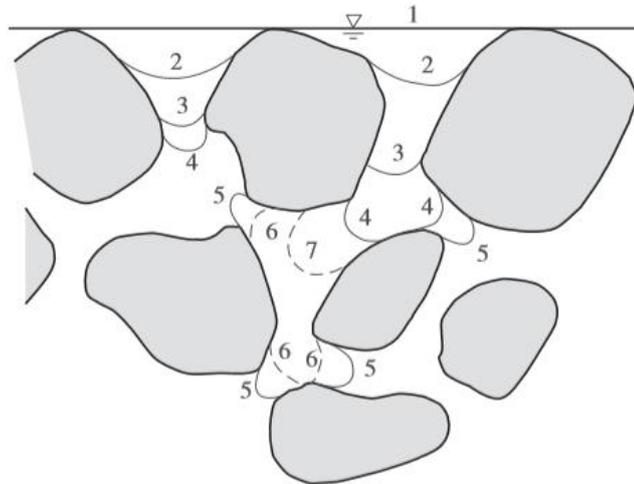


Figura 7 Drenaggio e ribagnatura graduali (Bear-Cheng,2010)

Concludendo, si può esprimere la forte relazione tra la suzione e la saturazione d'acqua attraverso un modello semplificato, ossia considerando un dominio medio poroso come un assemblaggio casuale di tubi di vari raggi.

Come si evince dalla su esposta figura 6, la risalita capillare h è tanto più grande quanto più piccolo risulta il diametro di ogni singolo tubo, ad un livello minimo di suzione, una minima risalita capillare è presente in tutti i tubi, ciò significa che a tale livello l'assemblaggio ha un grado di saturazione pari a 1 poiché è ricoperto interamente di acqua. Osservando livelli di suzione sempre più grande e quindi risalite capillari maggiori, risultano pieni d'acqua solo tubi sempre più piccoli. I tubi si svuotano gradualmente partendo da quelli con diametro più grande fino a quelli più stretti. Per un valore massimo di suzione, il grado di saturazione dell'insieme risulta prossimo allo zero poiché quasi nessun tubo è ricoperto d'acqua con una risalita capillare massima.

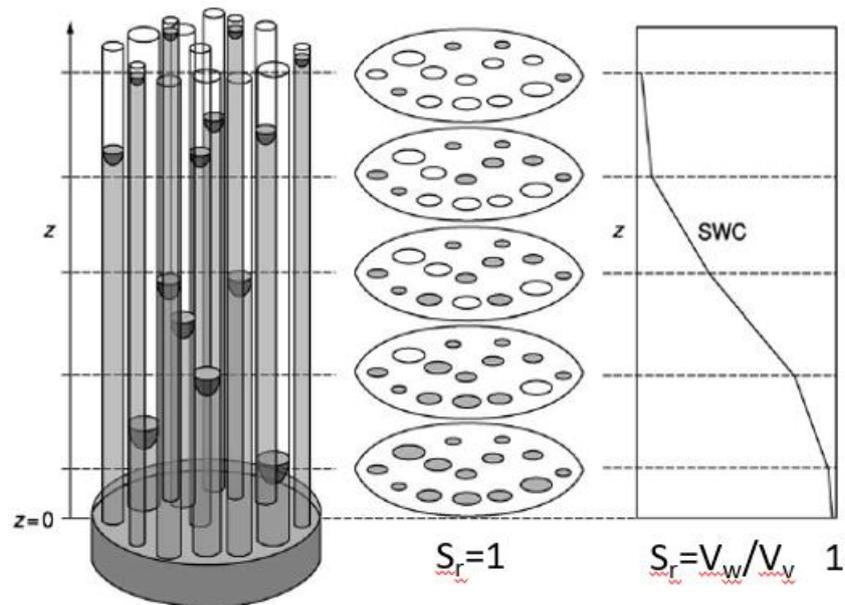


Figura 8 Assemblamento tubi capillari

1.2.2 Suzione totale e osmotica

La suzione matriciale, appena trattata, è solo una componente della *suzione totale*.

La suzione del suolo è il risultato dell'azione capillare, delle proprietà dell'energia di superficie delle particelle di suolo e della concentrazione ionica di acqua nei pori. Mentre la suzione totale comprende tutti i meccanismi, la suzione matriciale, invece, entra in gioco solo quando sono attive l'azione capillare e le proprietà energetiche superficiali. Un terreno insaturo posto a contatto con acqua libera e pura a pressione atmosferica tende a richiamare acqua per effetto della suzione totale, ψ .

È importante definire anche un'altra componente della suzione totale: la *suzione osmotica* (π).

Il liquido interstiziale, indicato dagli scienziati come "soluzione del suolo", di solito contiene sali disciolti. La concentrazione di quest'ultimo influenza sia la tensione superficiale e le forze che attraggono molecole d'acqua su superfici solide. Colpisce anche le relazioni energetiche che determinano l'equilibrio tra le fasi e componenti.

In definitiva, come espresso nel capitolo “Terreni insaturi, *Dispense di Geotecnica – Università di Firenze, 2011*”:

- *la suzione totale, ψ* , è la pressione negativa (ovvero inferiore alla pressione atmosferica) cui deve essere soggetta l’acqua pura in modo da essere in equilibrio, attraverso una membrana semipermeabile (permeabile cioè alle sole molecole d’acqua ma non ai sali) con l’acqua interstiziale;
- *la suzione di matrice, s* , è la pressione negativa cui deve essere soggetta una soluzione acquosa identica in composizione all’acqua interstiziale, in modo da essere in equilibrio, attraverso una membrana permeabile con l’acqua interstiziale;
- *la suzione osmotica, π* , è la pressione negativa cui deve essere soggetta l’acqua pura in modo da essere in equilibrio, attraverso una membrana semipermeabile con una soluzione acquosa identica in composizione all’acqua interstiziale.

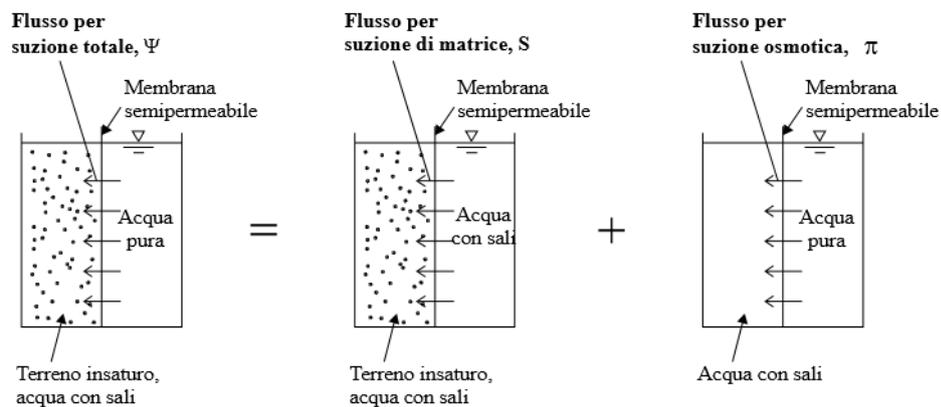


Figura 9 Componenti della suzione totale (*Terreni insaturi, Dispense di Geotecnica – Università di Firenze, 2011*)

Data la suzione totale come somma dei due principali contributi:

$$\psi = s + \pi$$

La suzione osmotica può essere definita come:

$$\pi \approx i RTc$$

- R: costante dei gas;
- T: temperatura [K];

- c: concentrazione;
 - i: numero di costituenti di sale;
- (per es. $\text{NaCl} \rightleftharpoons \text{Na}^+ + \text{Cl}^-$ ha $i=2$; $\text{CaCl}_2 \rightleftharpoons \text{Ca}^{2+} + 2\text{Cl}^-$ ha $i=3$)

Come si può notare dalla formulazione la suzione osmotica è legata alla distribuzione di ioni (concentrazione salina) il cui fattore può influenzare significativamente l'andamento della curva di ritenzione.

Per capire la dipendenza della curva di ritenzione dalla concentrazione salina e quindi dalla suzione osmotica bisogna entrare più nel dettaglio e fare un discorso nel campo microscopico. Si considera un mezzo poroso con all'interno un insieme di aggregati di dimensioni pari a circa 40 - 100 μm separati da pori interstiziali. Sulla superficie di ogni aggregato si trovano infinite particelle di lunghezza minore ai 2 μm elettronegative che attraggono ioni positivi (Na^+ , Ca^+) presenti nel fluido interstiziale. Nell'interspazio tra due particelle si può notare la formazione di tre strati: i due più esterni e vicini alle due particelle sono elettropositivi poiché c'è un'altissima concentrazione di ioni positivi attratti dall'elettronegatività; lo strato centrale, invece, risulta neutro poiché l'elettroneutralità si ristabilizza lontano dalle particelle ($\sum z^+c^+ + \sum z^-c^- = 0$). La profondità di questi strati dipende sicuramente dalla concentrazione nell'ambiente e quindi dalla quantità di ioni positivi nell'interspazio. Con una grande quantità di ioni positivi (alta concentrazione salina), la zona neutra centrale nell'interspazio fa fatica ad espandersi, pertanto l'interspazio rimane elettricamente omogeneo da non allargarsi e le dimensioni dell'aggregato non aumentano. Al contrario, a basse percentuali di concentrazione salina, la zona neutra si espande facilmente, il doppio strato che si genera nell'interspazio cresce e quindi le dimensioni dell'aggregato aumentano.

Di conseguenza, la variazione delle dimensioni dell'aggregato influenza il diametro dei pori tra gli aggregati. Un incremento del diametro degli aggregati genera una riduzione del diametro dei pori interstiziali.

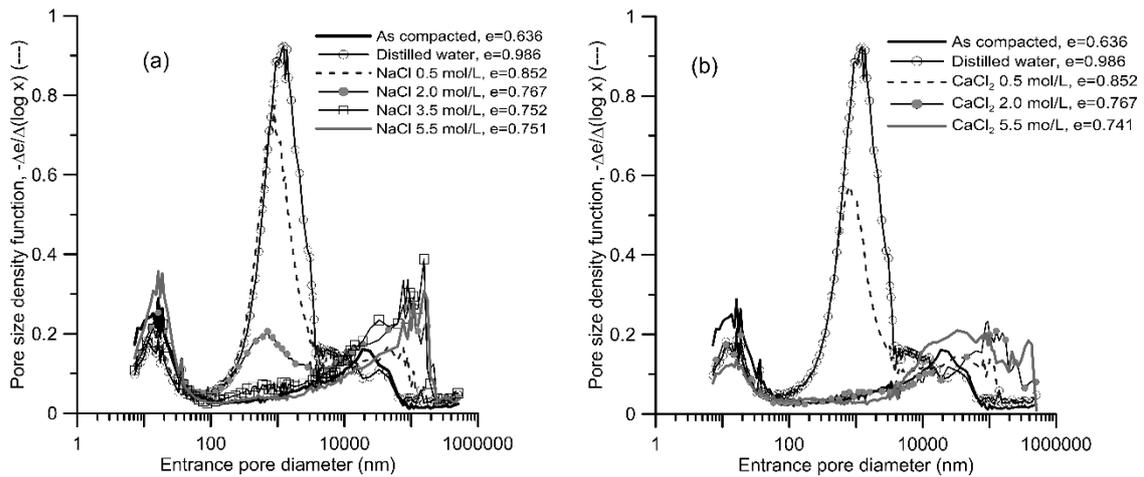


Figura 10 Dimensione del diametro dei pori interstiziali (bentonite FEBEX; Musso et al.,2013)

I grafici in figura 10 dimostrano che le dimensioni dei pori interstiziali variano in funzione della concentrazione salina presente nel fluido interstiziale. Con acqua distillata presente nel mezzo, quindi suzione osmotica prossima allo zero, emerge una famiglia di pori con dimensioni di circa 1 μm . Con la presenza di acqua salata, corrispondente ad una suzione osmotica elevata, le dimensioni dei pori risultano decisamente maggiori (circa 100 μm) poiché, come espresso in precedenza, alte concentrazioni saline non producono un aumento delle dimensioni degli aggregati.

Da questo aspetto si può dedurre che differenti suzioni osmotiche possono variare l'andamento della curva di ritenzione poiché la suzione di matrice, insieme alla pressione capillare, è fortemente influenzata dalla dimensione dei pori all'interno di un mezzo insaturo.

A parità di grado di saturazione d'acqua, per una suzione osmotica prossima allo zero, come nei mezzi con acqua distillata, si può arrivare a livelli di suzione di matrice più alti rispetto a quando si ha una suzione osmotica elevata.

Questo studio ha tra gli obiettivi analizzare la diversità delle curve di ritenzione con il grado di salinità dell'acqua utilizzata nelle miscele composte.

1.2.3 Potenziale di matrice e altri potenziali

In precedenza, la curva di ritenzione è stata presentata come una relazione a livello macroscopico tra pressione capillare e quantità d'acqua all'interno del mezzo, nonostante è stato spiegato che la pressione capillare è associata al fenomeno della tensione superficiale all'interfaccia fluida a livello microscopico. Sebbene abbiamo ripetutamente menzionato l'interazione tra il fluido e il solido alla loro interfaccia comune attraverso la presenza di film sottili o fluido adsorbito, non abbiamo mostrato come questi fenomeni influenzino la curva della pressione capillare. Il concetto di suzione, considerato finora, è l'espressione in termini di pressione del potenziale energetico dell'acqua. Da questo aspetto si può definire il concetto di potenziale e tutte le sue tipologie come quello matriciale. Il potenziale è un concetto ben consolidato in termodinamica, dove viene discusso "a livello microscopico". Nitao and Bear (1996) hanno presentato una discussione rigorosa sui potenziali a livello macroscopico. Come nella teoria della termodinamica, i potenziali sono definiti a livello microscopico e quindi le loro controparti macroscopiche sono ottenute mediante la media.

Qualsiasi soluzione chimica in una fase liquida all'interno dello spazio vuoto, compresa l'acqua stessa, subisce varie forze. In particolare, le molecole d'acqua sono influenzate da forze gravitazionali, e da forze generate dall'interazione con altre molecole d'acqua, dall'interazione con molecole di altre particelle chimiche presenti nell'acqua e dall'interazione con molecole della matrice solida. Il potenziale esprime il lavoro reversibile che deve essere impiegato per trasformare un determinato sistema da uno stato di riferimento specifico a quello attuale. Inoltre, il lavoro deve essere speso per cambiare lo stato di un sistema considerato in una direzione opposta alla risultante delle forze sopra menzionate (che di per sé possono agire in direzioni diverse). La quantità di lavoro equivale all'aumento dell'energia del sistema. Poiché le forze sopracitate presentano una diversità nella loro natura, alcune delle quali non meccaniche, è opportuno definire ciascuna di essa con il tipo di potenziale corrispondente. Il potenziale è espresso come una quantità intensiva, per unità di volume, per unità di massa o per unità di peso del sistema considerato, come acqua all'interno dello spazio vuoto della matrice.

Secondo il comitato terminologico della *Commissione I dell'International Soil Science Society (1976)*, il *potenziale totale* di una soluzione chimica, in un punto del suolo, è definito come la quantità di lavoro che deve essere esercitata, per unità di massa di acqua pura, per trasferire a quel punto una quantità infinitesima di acqua pura proveniente da un serbatoio che contiene acqua pura, in modo reversibile e isotermico all'acqua del suolo. Il serbatoio si trova ad un'elevazione specifica e con la stessa temperatura e pressione del gas esterno rispetto al punto considerato.

Il *potenziale totale* di una fase fluida è composto dalle seguenti parti:

- *Potenziale matriciale*, associato all'adsorbimento dell'acqua sulle superfici del suolo;
- *Potenziale soluto (o potenziale osmotico)*, associato alla concentrazione di ioni in soluzione;
- *Potenziale di gravità*, che esprime la variazione dell'energia potenziale associata all'elevazione del punto considerato sopra un serbatoio di riferimento;
- *Potenziale termico*, che esprime la variazione dell'energia libera associata alla temperatura del punto considerato al di sopra di quella prevalente nel serbatoio di riferimento.

La somma dei potenziali matriciale e osmotico è chiamata *potenziale idrico* del suolo.

Il *potenziale matriciale* in un punto all'interno di una fase fluida che occupa parte dello spazio vuoto nel suolo è definito, secondo la *Commissione I (1976)*, come la quantità di lavoro che deve essere effettuata, per massa unitaria di acqua pura, per trasferire, in modo reversibile ed isotermico all'acqua del suolo in un punto considerato, una quantità infinita di acqua pura da un serbatoio di riferimento. Quest'ultimo è alla stessa elevazione, temperatura e pressione del gas esterno nel punto considerato e contiene acqua (= soluzione del suolo) identica nella composizione a quella presente nel suolo nel punto considerato.

Questo potenziale, come definito sopra, si riferisce ad una soluzione chimica in un punto, cioè a livello microscopico. Può essere definito per una fase nel suo insieme: la somma del lavoro che deve essere speso per spostare ciascuno dei singoli componenti che compongono la fase.

Il potenziale matriciale è una conseguenza di due fenomeni: le forze non in equilibrio tra le interfacce acqua-aria (menischi), manifestate come tensione superficiale, e l'attrazione di molecole nella fase sulla superficie solida; quest'ultimo effetto è significativo solo in prossimità della superficie solida e si manifesta come un film sottile che ricopre il solido.

Il potenziale matriciale per unità di volume d'acqua può essere considerato uguale alla pressione capillare per un certo range di saturazione, tale per cui da esser messo in relazione con il raggio di curvatura dei menischi. Quando la saturazione d'acqua raggiunge livelli molto bassi, si presentano anelli pendolari e film sottili di rivestimento sulla parte solida, per cui il potenziale matriciale non è più associabile al potenziale capillare, ma incorpora gli effetti delle forze attive relative ai film di rivestimento. Infatti, quando il solido è drenato e si presenta un valore irriducibile del grado di saturazione, gli effetti relativi all'acqua adsorbita diventano molto significativi per il potenziale matriciale poiché il comportamento è dominato non dalla tensione superficiale aria acqua del menisco, ma dall'interazione tra le molecole solide.

Se espresso per unità di volume d'acqua, il potenziale matriciale a saturazione sufficientemente elevata è uguale alla pressione dell'acqua (come fase liquida), $p_w - p_o$, rispetto ad una pressione di riferimento, p_o , nel serbatoio; è invece positivo (cioè sopra la pressione atmosferica di riferimento) nella zona satura e negativo (cioè sotto la pressione atmosferica di riferimento) nella zona insatura sopra di essa. Quando la fase gassosa nello spazio vuoto (principalmente aria) è alla pressione $p_g = p_o$, il potenziale matriciale per unità di volume di acqua è espresso dalla differenza di $p_w - p_g$, o da $-p_c$. Il potenziale matriciale per unità di peso dell'acqua è, quindi, espresso da

$$\frac{(p_w - p_g)}{\rho_w g}$$

Per un dato terreno, la relazione tra il potenziale matriciale e la saturazione deve essere derivata sperimentalmente, perché dipende dalla distribuzione delle dimensioni dei pori e dalla complessa geometria dello spazio dei pori.

Per suoli sufficientemente grossolani, a differenza dei terreni argillosi, alla saturazione dell'acqua irriducibile, la curva relativa al potenziale matriciale (espresso per unità di volume d'acqua) in funzione del grado di saturazione è essenzialmente quella per la pressione capillare. A piena saturazione, il potenziale matriciale diventa zero.

Il potenziale matriciale è la quantità termodinamica più appropriata da utilizzare per descrivere i fenomeni nella zona insatura rispetto alla pressione capillare, poiché incorpora sia l'effetto della capillarità, sia quello dell'interazione fluida tra le particelle. Quest'ultimo è significativo soprattutto a saturazioni molto basse, dove l'acqua è principalmente sotto forma di film o adsorbita. Per ottenere la relazione tra il potenziale matriciale e la saturazione, si effettua un esperimento in cui l'acqua viene rimossa da un campione, non con drenaggio per gravità, ma per evaporazione. In questo esperimento, condotto con acqua pura nel campione, il vapore contenuto nella fase gassosa e l'acqua liquida nello spazio interstiziale vengono portati in equilibrio a diversi livelli di saturazione dell'acqua. Otteniamo la tipica curva del potenziale matriciale mostrata in figura 11.

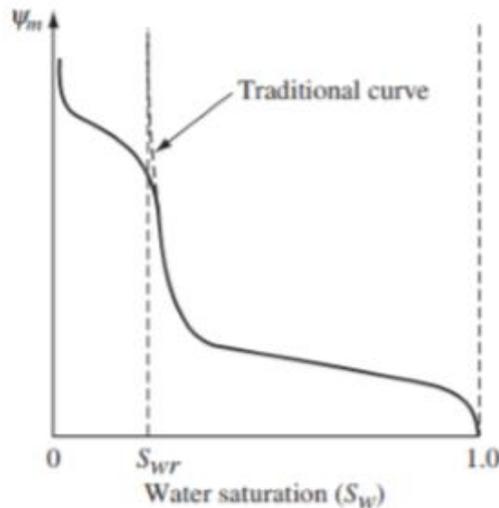


Figura 11 Curva del potenziale di matrice con grado di saturazione (Bear-Cheng, 2010)

Si può constatare che per valori inferiori al grado di saturazione irriducibile (S_{wr}), l'acqua può essere ulteriormente rimossa dal campione mediante evaporazione e con il deflusso dei film di superficie (sebbene, a un ritmo molto più basso rispetto al flusso di liquido "sfuso"). Pertanto, si può considerare questo termine come limite di saturazione dal quale l'acqua liquida continua diventa discontinua.

Gli esperimenti dimostrano che il valore della saturazione irriducibile viene avvicinato sintatticamente quando l'acqua viene drenata (per gravità) da un campione. Tuttavia, se si consente all'evaporazione e al flusso di continuare a rimuovere l'acqua dal campione, la saturazione può essere ulteriormente ridotta, fino a quando non è

praticamente zero. Il metodo di assorbimento di vapore è una tecnica di essiccazione che permette di valutare il decremento graduale della saturazione d'acqua, mediante equilibrio tra le pressioni per ogni step. L'incremento graduale del potenziale matriciale nell'acqua quando il terreno si asciuga, può essere calcolato con la legge di Kelvin

$$p'_c = -\frac{\rho_w RT}{M_w} \ln \frac{p^v}{p^{v0}} \quad \text{oppure} \quad \psi = \frac{RT}{gM_w} \ln RH$$

Di cui:

- R costante di gas universale;
- T temperatura [K];
- M_w peso molecolare dell'acqua;
- $p^v / p^{v0} \leq 1$ rapporto tra la pressione parziale dell'acqua nella fase gassosa e la pressione parziale dell'acqua in assenza di effetti d'interfaccia;
- RH umidità relativa;

In tal modo, la curva di ritenzione può essere estesa ad una saturazione pari a zero.

Il *potenziale del soluto* è anche indicato come *potenziale osmotico*. Il liquido nel suolo è una soluzione che di solito contiene materia disciolta. La concentrazione di quest'ultima influisce sia sulla tensione superficiale che sulle forze che attraggono le molecole d'acqua sulle superfici solide. Inoltre, influisce sulle relazioni energetiche che determinano l'equilibrio tra fasi e componenti.

Dato che questi potenziali dipendono dalla saturazione del liquido, il potenziale totale non è altro che il potenziale chimico dell'acqua, come componente nel suolo, per unità di volume della fase acquosa.

1.2.4 Il fenomeno d'isteresi

Un aspetto da tenere presente durante lo sviluppo delle curve di ritenzione è che quest'ultime variano in base al fenomeno che subisce il mezzo poroso. Poco fa sono state fatte diverse considerazioni riguardo la suzione matriciale e la saturazione di un corpo soggetto ad una fase di drenaggio. Stesse considerazioni sono attribuibili ad una fase inversa di imbibizione: ad un incremento del grado di saturazione corrisponde un allargamento dei menischi e una riduzione graduale della pressione capillare.

In realtà, la curva principale riferita al percorso di imbibizione di un mezzo poroso presenta differenze rispetto a quella di drenaggio. Questo fenomeno è chiamato isteresi ed è attribuito ad una serie di cause.

La prima causa, chiamata effetto bottiglia di inchiostro, deriva dalla forma dello spazio dei pori, con interscambio stretto (gola) e ampi passaggi. Durante il drenaggio e il rewetting, i menischi con lo stesso raggio di curvatura si verificano a quote diverse, sviluppando così diverse saturazioni d'acqua per lo stesso valore di suzione ($\psi = 2\gamma_w a/r$). Mentre l'acqua viene drenata, il raggio di curvatura del menisco aria-acqua diminuisce. Nella parte più stretta della gola, la curvatura del menisco non può continuare ad aumentare gradualmente; invece, il menisco si ritira bruscamente a una gola vicina. Nel complesso, la curva di asciugatura dipende dalle gole strette (piccoli raggi di curvatura del menisco), mentre la bagnatura dipende dal diametro massimo dei pori di grandi dimensioni. Il poro si svuota bruscamente quando la suzione supera $\psi = 2\gamma_w a/r_1$. Per lo stesso poro per riempirsi bruscamente, la suzione deve scendere al di sotto di $\psi = 2\gamma_w a/r_2$, con $r_2 > r_1$. L'effetto isteresi è più significativo nel terreno a grana grossolana, dove i pori possono svuotarsi con una suzione notevolmente maggiore di quello in cui si riempiono.

Un secondo effetto, chiamato effetto goccia di pioggia, è dovuto al fatto che l'angolo di contatto è più grande nella traccia di avanzamento di un'interfaccia acqua-aria su un solido rispetto a quello sfuggente, a causa delle impurità e della possibile variabilità nei minerali che compongono la superficie, a causa della rugosità del solido, e per gravità. Inoltre, quando un fluido è polare, come lo è l'acqua, l'angolo di contatto dipende dal fatto che la superficie solida sia stata precedentemente bagnata dal fluido o no.

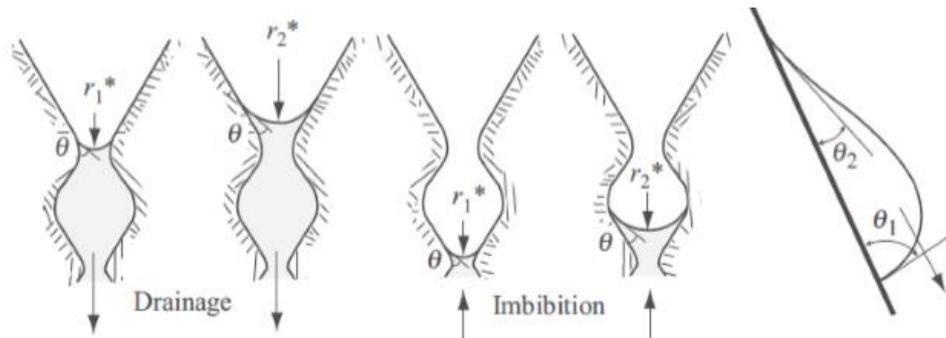


Figura 12 Cause dell'isteresi nella curva di ritenzione: effetto bottiglia di inchiostro ed effetto goccia di pioggia (Bear-Cheng,2010)

Una terza causa di isteresi è l'intrappolamento dell'aria, inizialmente il campione saturo viene drenato e quindi nuovamente bagnato. Il consolidamento, gonfiore e restringimento della matrice solida possono anche contribuire all'isteresi della curva di ritenzione. La relazione tra pressione capillare (suzione) e saturazione espressa dalla curva dipende, quindi, anche dalla storia di bagnatura- asciugatura del campione in esame.

Per una data suzione, quando un campione viene drenato si ottiene una maggiore saturazione rispetto a quando viene imbibito. Quando un campione viene imbibito fino ad un valore di suzione pari a zero, nel campione rimarrà una percentuale di saturazione di aria residua; aspetto questo che dipende dalla storia di drenaggio-imbibizione. Ad esempio, quando un campione saturo viene drenato e successivamente imbibito fino ad un livello di suzione minimo, la quantità di aria intrappolata è inferiore a quando l'assorbimento inizia da uno stato più secco. La curva di drenaggio principale inizia al 100 % di saturazione dell'acqua e procede fino a saturazione residua dell'acqua per un livello elevato di suzione. La curva principale di imbibizione inizia a saturazione residua dell'acqua e procede verso il basso fino a suzione pari a zero e saturazione massima ($S_r = 1$). Le due curve definiscono l'involuppo di isteresi che comprende un numero infinito di possibili curve di scansione.

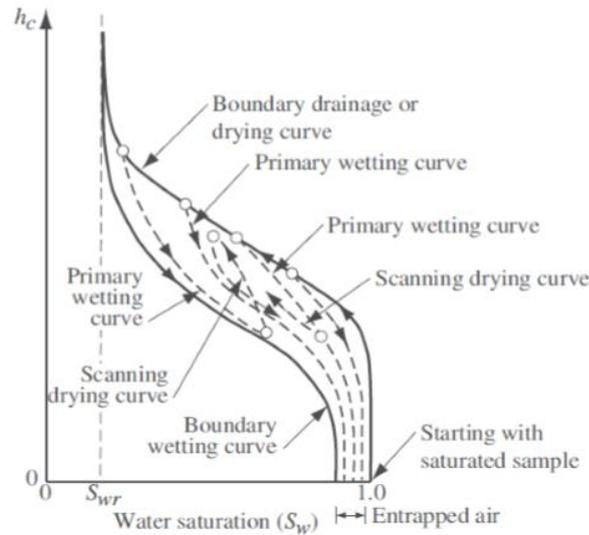


Figura 13 Isteresi nelle curve di pressione capillare (Bear-Cheng,2010)

Mentre il drenaggio avanza, raggiunto un livello molto elevato di pressione capillare, si definisce il grado di saturazione dell'acqua irriducibile o residuo, S_r^{irr} , corrispondente alla quantità d'acqua che rimane nei vuoti sottoforma di anelli pendolari isolati e film sottili intorno alle particelle solide. Al contrario, quando l'aria è presente solo sottoforma di bolle isolate per via di un'imbibizione, si definisce la saturazione dell'aria residua S_{ar} .

Per tener conto degli effetti dell'aria intrappolata durante l'imbibizione d'acqua, definiamo il grado di saturazione apparente, \hat{S}_w , come:

$$\hat{S}_w = S_{eff} + \hat{S}_{at}$$

Dove S_{eff} è la saturazione d'acqua efficace definita da:

$$S_{eff} = \frac{S_r - S_r^{irr} - S_{at}}{1 - S_r^{irr}}$$

e \hat{S}_{at} è l'effettiva saturazione d'aria intrappolata definita da:

$$\hat{S}_{at} = \frac{S_{at}}{1 - S_r^{irr}}$$

In cui S_{at} è l'attuale saturazione di aria intrappolata.

Per la curva principale di drenaggio, la saturazione apparente e quella efficace coincidono, poiché non c'è aria intrappolata lungo questo percorso e quindi \hat{S}_{at} vale zero.

1.2.5 Modelli analitici di curve di ritenzione

Sono utilizzati una varietà di metodi per determinare la relazione che genera la curva di ritenzione idraulica. Un approccio diretto consiste nell'ottenere dati sulla saturazione statica e pressione capillare, attraverso misurazioni simultanee di laboratorio del contenuto d'acqua e del potenziale matriciale di provini di terreno.

La determinazione delle proprietà del terreno avviene comparando i dati misurati con i valori predetti risolvendo un modello matematico per il corrispondente problema al contorno. Il processo di determinazione è definito come problema inverso, problema di stima dei parametri o problema di calibrazione.

I metodi inversi hanno il vantaggio di produrre parametri effettivi che sono direttamente rilevanti per le condizioni sperimentali dinamiche. Pertanto, possono richiedere meno tempo o sforzo sperimentale rispetto ai metodi convenzionali di laboratorio o in sito. Il loro principale svantaggio è che le soluzioni ai problemi inversi non sono sempre univoche, vale a dire che valori diversi di un parametro idraulico possono fornire previsioni del modello simili.

Inoltre, sono stati sviluppati anche metodi per stimare le proprietà idrauliche del attraverso la distribuzione granulometrica. Tali metodi possono risultare più semplici, poiché i dati sulla distribuzione granulometrica si ottengono più facilmente dei dati idraulici statici o dinamici; mentre altri metodi utilizzati per stimare i parametri che compaiono nei modelli della curva di ritenzione si basano su analisi statistiche di dati tabulati.

Vari autori hanno proposto espressioni analitiche per lo sviluppo delle curve di ritenzione idrauliche. Queste espressioni contengono coefficienti che si possono determinare risolvendo il problema inverso, cioè adattando l'espressione analitica a dati sperimentali misurati.

Di seguito sono riportate alcune espressioni. S_{eff} è definito come:

$$S_{eff} = \frac{S_r - S_r^{irr}}{1 - S_r^{irr}}$$

rappresenta il grado di saturazione d'acqua effettivo. Il parametro S_r^{irr} indica invece il grado di saturazione d'acqua residuo.

Brooks & Corey proposero nel 1966 un modello che lega la saturazione effettiva, S_{eff} , alla suzione di matrice s :

$$S_{eff} = \begin{cases} \left(\frac{s_b}{s}\right)^\lambda & \text{per } s \geq s_b \\ 1 & \text{per } s < s_b \end{cases}$$

Dove λ è chiamato indice di distribuzione della dimensione dei pori e s_b è la pressione di ingresso dell'aria. Il parametro s_b può essere inteso dal punto di vista fisico come misura della risalita capillare in un terreno e quindi come spessore della frangia capillare al di sopra del piano di falda. Esso fornisce inoltre una misura della dimensione dei macropori che sono i primi a svuotarsi in seguito all'applicazione di una suzione. Il parametro λ è legato alla distribuzione della dimensione dei pori nel terreno: in particolare si osserva come un terreno con un grande valore di λ può perdere il suo contenuto d'acqua velocemente anche per piccole variazioni della suzione imposta, mentre un terreno con λ basso necessita di suzioni elevate per rilasciare il liquido e il fenomeno avviene molto più gradualmente.

Il modello di van Genuchten è un modello relativamente semplice poiché permette di ricavare soluzioni analitiche in forma chiusa attraverso un numero molto basso di parametri. Il grado di saturazione effettivo è in funzione della suzione di matrice (s) attraverso la relazione:

$$S_{eff} = \frac{S_r - S_r^{irr}}{1 - S_{ar} - S_r^{irr}} = \begin{cases} \left(\frac{1}{1 + (\alpha s)^n}\right)^m & \text{per } s \geq 0 \\ 1 & \text{per } s < 0 \end{cases}$$

Dove α , n e $m (=1-1/n)$ sono coefficienti positivi della curva, mentre s è la suzione di matrice. Questo modello è uno dei più utilizzati poiché è in grado di fornire una curva continua con la funzione del dominio $s \geq 0$.

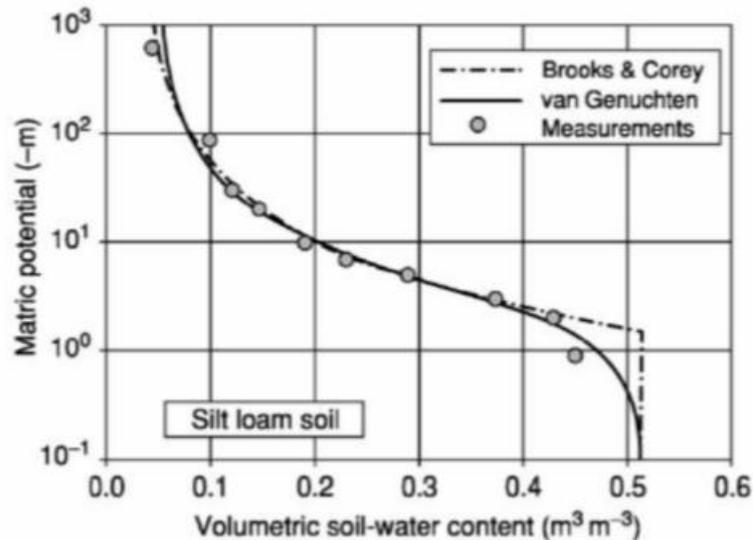


Figura 14 Modello di curva di ritenzione (Tuller e Or,2005)

Successivamente, Gallipoli et al. (2003) hanno modificato la relazione di van Genuchten proponendo la seguente espressione per il parametro α :

$$\alpha = \varphi(v - 1)^\beta$$

in cui φ e β sono costanti caratteristiche di un terreno. L'equazione di van Genuchten risulta quindi migliorata come segue

$$S_{eff} = \left\{ \frac{1}{1 + [\varphi(v - 1)^\beta s]^n} \right\}^m$$

Questa relazione, verificata attraverso prove di laboratorio, presenta una relazione migliorata tra la variazione del grado di saturazione e la suzione.

Infatti, gli autori con essa vogliono dimostrare la non unicità della relazione tra grado di saturazione e suzione a causa del fenomeno di isteresi descritto in precedenza e a causa delle variazioni dell'indice dei vuoti e della dimensione dei pori in un terreno deformabile.

2 Tecniche di laboratorio

Si possono utilizzare varie tecniche sperimentali applicate con dei provini di bentonite prodotti in laboratorio. Esse sono utili per estrapolare dati che possono comporre le curve di ritenzione idraulica, sia per il percorso di essiccamento, sia per quello di bagnatura; e permettono di mettere in relazione in modo diretto i livelli di suzione che può presentare un provino con il corrispondente quantitativo d'acqua, che come espresso in precedenza, può essere il grado di saturazione o il contenuto d'acqua.

Queste tecniche presentano diversi approcci e permettono di fare valutazioni o sulla suzione matriciale o su quella totale. Come si vedrà nel corso del capitolo, solo la tecnica della carta da filtro permette di ottenere misure dirette di entrambe le suzioni.

Data la diversità di svolgimento e delle dimensioni dei provini utilizzati per ogni tecnica, possono verificarsi risultati della curva poco congruenti tra le varie tecniche o, a volte, del tutto differenti.

Le tecniche si possono distinguere in due approcci principali: alcune controllano la suzione e misurano il quantitativo d'acqua per ogni livello, mentre altre, al contrario, data una certa quantità d'acqua all'interno del provino, valutano il valore di suzione corrente.

Di seguito i nomi delle varie tecniche analizzate:

Controllo di suzione e misurazione del contenuto d'acqua:

- Equilibrio di vapore
- Traslazione degli assi

Controllo del contenuto d'acqua e misurazione della suzione:

- Carta da filtro
- WP4C

2.1 Equilibrio di vapore

Due principali metodi sono indicati di seguito per questa tecnica:

- Tecniche di equilibrio/trasferimento del vapore che sono associate con il controllo dell'umidità relativa o suzione totale;
- Tecniche con fase liquida predominante trasferita attraverso un'interfaccia permeabile per dissolvenza di sale e controllo della suzione.

La prima tecnica consiste nel controllare l'umidità relativa in un sistema chiuso, a massa costante, rispetto al vapore. Nell'ambiente chiuso, di conseguenza, si genera una suzione totale costante correlata direttamente all'umidità relativa attraverso la relazione psicrometrica già vista in precedenza:

$$\psi = \frac{RT}{gM_w} \ln RH$$

Il controllo di queste caratteristiche avviene utilizzando il potenziale osmotico delle soluzioni chimiche.

La tecnica viene ripetuta su più livelli di suzione totale utilizzando dei contenitori ermetici con differenti soluzioni acquose, sia non volatili (sali e soluzioni basiche) sia volatili (soluzioni acide). Ad ogni soluzione con un determinato potenziale chimico corrisponde un'umidità relativa e quindi un valore di suzione totale. In alternativa, si può determinare valori differenti di umidità relativa facendo variare la quantità di soluto di un solo tipo di soluzione acquosa.

In ogni contenitore, che funziona da essiccatore, i campioni di terreno sono chiusi nel vapore ambiente al di sopra delle soluzioni chimiche. Attraverso il potenziale idrico del terreno si verifica una migrazione di molecole d'acqua del terreno fino a quando non viene raggiunto un equilibrio tra la fase liquida all'interno del campione e la fase gassosa dell'ambiente circostante. La pressione di vapore dell'ambiente nell'essiccatore è direttamente una funzione della concentrazione della soluzione. Una volta raggiunto l'equilibrio, dopo circa 20-30 giorni, la matrice del provino sottoposto ad essiccazione si trova nelle condizioni di suzione imposte con un contenuto d'acqua variato rispetto a quello

iniziale grazie al processo di equilibrio subìto. Il decremento di grado di saturazione e contenuto d'acqua si valuta attraverso la misurazione delle dimensioni e la differenza di peso umido.



Figura 15 Schema di provini all'interno di contenitori per tecnica equilibrio di vapore

La Figura 16 mostra la relazione tra la suzione totale ψ e la concentrazione di NaCl in soluzione acquosa.

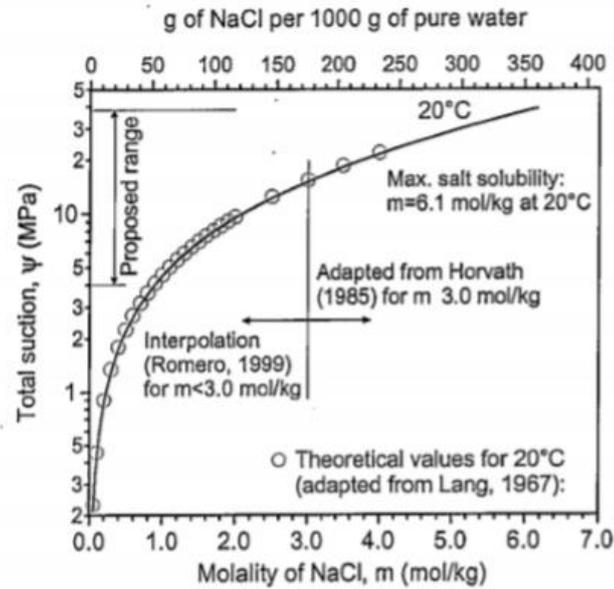


Figura 16 Relazione tra suzione totale e concentrazione di NaCl in soluzione acquosa (Romero, 2001)

Secondo Romero et. al (2001) la relazione tra l'umidità relativa u_v/u_w e la molalità m del soluto a 20°C è data dall'espressione empirica:

$$\frac{u_v}{u_{v0}} = 1 - 0,035m - \chi m(m - 3)$$

$$\chi = 1,739 * 10^{-3} \text{ per } m \geq 3 \frac{\text{mol}}{\text{kg}}$$

$$\chi = 1,142 * 10^{-3} \text{ per } m < 3 \frac{\text{mol}}{\text{kg}}$$

Il limite superiore è controllato dalla solubilità del sale che restringe u_v/u_w ad un minimo di 0,75 a 20°C dall'altra parte, un valore di $\psi=4$ MPa è raccomandato per il limite inferiore, dovuto alla difficoltà di controllare con accuratezza l'alto valore di umidità relativa dato da una piccola quantità di soluto. Piccole variazioni di temperatura tra il sistema di riferimento e il terreno, possono far variare il valore di suzione totale fissato, nell'ordine di Mpa, a causa dell'effetto della temperatura sulla pressione di vapore e la prossimità al punto di rugiada.

$$\frac{\delta\psi}{\delta T} \approx \frac{B\rho_w RT}{M_w} \approx 8,858 \frac{\text{MPa}}{^\circ\text{C}}$$

Come si evince dall'equazione sopracitata la variazione di suzione totale è in funzione di un cambiamento di temperatura. Nell'equazione R è la costante di gas molare, T la temperatura assoluta del sistema di riferimento, M_w la massa molecolare dell'acqua, ρ_w la densità dell'acqua alla temperatura di riferimento e B il valore della pressione di vapore. In questo modo, la temperatura varia di $\pm 0,2^\circ\text{C}$ alla pressione di vapore costante può indurre un cambiamento di suzione totale di $\pm 1,8$ MPa, dovuto agli effetti della temperatura sulla pressione di vapore.

L'uso di soluzioni saline presenta limitazioni poiché il controllo della suzione è limitato per ciascun tipo specifico di sale in base alle proprietà e alla purezza del componente chimico specifico. Le soluzioni saline (di potassio o sodio) sono generalmente limitate a un intervallo inferiore di valori di suzione. Con le soluzioni acide possono essere imposti livelli di suzione molto più elevati ed il set di punti di suzione può essere stabilito molto più facilmente con un attento controllo della concentrazione della soluzione.

Compound	T (°C)	A (%)	B (K)	$w_w/w_w(\%)$ a 25 °C	ψ (MPa) a 25 °C	Solubility (g/100 g H ₂ O) 30 °C
NaOH·H ₂ O	15-60	5.48	27	6	386	113
LiBr·2H ₂ O	10-30	0.23	996	6	386	193
ZnBr ₂ ·2H ₂ O	5-30	1.69	455	8	347	529
KOH·2H ₂ O	5-30	0.014	1924	9	330	128
LiCl·H ₂ O	20-65	14.53	-75	11	303	86
CaBr ₂ ·6H ₂ O	11-22	0.17	1360	16	251	170*
LiI·3H ₂ O	15-65	0.15	1424	18	235	170
CaCl ₂ ·6H ₂ O	15-25	0.11	1653	29	170	97*
MgCl ₂ ·6H ₂ O	5-45	29.26	34	33	152	57*
NaI·2H ₂ O	5-45	3.62	702	38	133	192
K ₂ CO ₃ ·2H ₂ O	20			44	112	113
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	10-30	1.89	981	51	92	156
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	5-35	25.28	220	53	87	74*
NaBr·2H ₂ O	0-35	20.49	308	58	75	98
NaNO ₂	20			66	57	88
KI	5-30	29.35	254	69	51	153
SrCl ₂ ·6H ₂ O	5-30	31.58	241	71	47	57*
NaNO ₃	10-40	26.94	302	74	41	95
NaCl	10-40	69.20	25	75	39	36
NH ₄ Cl	10-40	35.67	235	79	32	41
KBr	5-25	40.98	203	81	29	71
(NH ₄) ₂ SO ₄	10-40	62.06	79	81	29	78
KCl	5-25	49.38	159	84	24	37
Sr(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	5-25	28.34	328	85	22	89
BaCl ₂ ·2H ₂ O	5-25	69.99	75	90	14	38
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	20			91	13	62*
CaI	5-25	70.77	75	91	13	95
KNO ₃	0-50	43.22	225	92	11	46
CuSO ₄ ·5H ₂ O	20			97	4	24*
K ₂ SO ₄	10-50	86.75	34	97	4	13

* solubility values possibly affected by solid phase changes, usually from one hydrated phase to another or from a hydrate to the anhydrous solid

Figura 17 Valori teorici (Romero, 2001)

La Figura 17 rappresenta i valori teorici di umidità relativa, suzione totale e solubilità di differenti soluzioni basiche/sali non volatili.

2.2 Traslazione degli assi

La tecnica di traslazione degli assi viene utilizzata nell'intervallo di suzioni da 0 a 500 kPa o superiore. Questa tecnica è particolarmente utile per testare campioni con valori di suzione superiori a 100 kPa evitando problemi associati alla cavitazione. La suzione matriciale in un campione di terreno insaturo è definita come la differenza tra la pressione dell'aria, u_a , e la pressione dell'acqua, u_w , nei pori.

In genere, in un terreno insaturo, la pressione nei pori dell'aria è atmosferica (ad es. $u_a = 0$) e la pressione dell'acqua dei pori è negativa rispetto alla pressione atmosferica. Questa tecnica trasla l'origine di riferimento per la pressione dell'acqua interstiziale dalle condizioni atmosferiche standard alla pressione dell'aria finale nella camera. Viene così effettuato un incremento artificiale della pressione atmosferica e conseguentemente la pressione negativa dell'acqua incrementa di uguale quantità se le particelle del terreno e l'acqua si assumono incomprimibili.

Per la procedura di questo metodo si può applicare una sovrappressione dell'aria o una sottopressione dell'acqua. La prima trasla la pressione dell'acqua nel campo positivo, ma regola la suzione sotto una pressione d'aria costante e pressione dell'acqua variabile. La seconda procedura invece mantiene la pressione d'acqua costante. Questa tecnica consente di misurare la pressione interstiziale, u_w , in un terreno insaturo, usando un disco ceramico con pori fini. Questi dischi sono usati convenzionalmente nei test per terreni insaturi mentre dischi porosi in test per terreni saturi.

Il disco ceramico, chiamato *high air-entry*, funziona da interfaccia tra le fasi dell'aria e dell'acqua. È possibile ottenere la separazione delle fasi dell'acqua e dell'aria solo fino all'*air entry value* del disco. Quest'ultimo si riferisce alla suzione matriciale massima a cui il disco high air entry può essere sottoposto prima che l'aria libera passa attraverso il disco. La massima differenza sostenibile tra la pressione dell'aria e la pressione dell'acqua è una funzione della tensione superficiale e la dimensione massima dei pori effettivi del disco ceramico.

Il campione è posto in una camera di pressione in acciaio inossidabile sopra il disco, che è precedentemente saturo. Non appena il campione viene posizionato sul disco, l'acqua nel tubo va in tensione, misurata mediante un manometro. La tendenza dell'acqua ad andare in tensione è resistita aumentando la pressione dell'aria nella camera. Questa è una tecnica a suzione controllata poiché una volta imposte le due pressioni, viene imposto il livello di suzione.

Il tempo di equilibrio dipende dal tipo di terreno, dimensione del campione e valore di entrata dell'aria del disco. In molti casi, l'equilibrio avviene in 3-6 h in provini compattati di spessore 20 mm. In alcuni casi, i test di estrazione dell'acqua dei pori possono essere condotti utilizzando questo apparato aumentando la pressione dell'aria e consentire il drenaggio dal campione attraverso i pori del disco di ceramica. Il drenaggio continua fino al raggiungimento del contenuto d'acqua del campione in condizioni di equilibrio con la suzione matriciale applicata, che viene registrata come differenza tra la pressione dell'acqua su un lato del disco e la pressione dell'aria dei pori sull'altro lato del disco. Questa tecnica è utile per la determinazione delle proprietà meccaniche dei terreni insaturi come la resistenza al taglio, il cambiamento di volume e il coefficiente di permeabilità.

Nella tecnica di traslazione degli assi, la pressione dell'aria, u_a , è superiore alla pressione atmosferica e la pressione dell'acqua è positiva. Tali pressioni non sono rappresentative delle condizioni di tensione per terreni insaturi. A causa della pressione dell'aria applicata nella tecnica, l'aria potrebbe filtrare o diffondersi attraverso la pietra ceramica nel sistema di drenaggio. La pressione dell'aria applicata avrà un effetto significativo sulle misurazioni degli scambi d'acqua dall'interno e dall'esterno del campione di terreno. Per questo motivo, il tasso di diffusione dell'aria sotto il disco ceramico dovrebbe essere misurato.

Per tenere traccia delle variazioni del contenuto d'acqua del campione durante la prova, deve essere misurato il volume di aria diffusa e deve essere fatta la correzione della variazione di volume dell'acqua dei pori. Poiché la pressione dell'aria è vettorialmente omogenea nello spazio, nella parte soprastante viene contrastata ed equilibrata da un'ulteriore pressione assiale per mantenere stabile lo strumento e tutto il sistema.

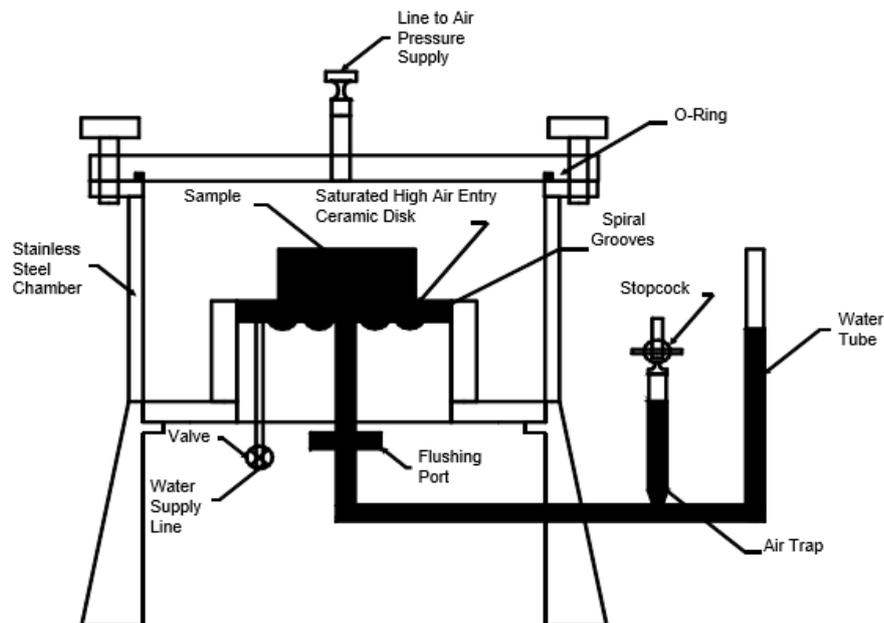


Figura 18 Apparecchiatura traslazione assi (Tarantino et al., 2008)

2.3 Carta da filtro

Tra tutti i metodi di misurazione della suzione noti, la tecnica della carta da filtro è l'unico metodo dal quale si può dedurre sia la suzione totale che quella di matrice.

Quando il terreno umido si trova in un sistema chiuso con un materiale poroso con capacità di assorbire acqua, l'acqua passerà dal terreno al materiale poroso fino al raggiungimento dell'equilibrio.

Il funzionamento del metodo della carta da filtro si basa su questo principio: consiste nel rinchiudere provini di terreno e la carta da filtro in un ambiente chiuso a temperatura costante fino a quando non si raggiunge l'equilibrio di umidità tra le componenti.

In generale, tutte le tecniche di misurazione della suzione richiedono uno scambio di acqua tra il terreno e il sistema di misurazione. Un sistema può assorbire l'acqua dal terreno o perdere acqua nel terreno.

In particolare, per questa tecnica, la carta filtro assorbe acqua dal terreno grazie al suo stato iniziale e alle sue caratteristiche. L'assorbimento di acqua dalla carta da filtro può avvenire in due modi: a flusso di vapore o flusso di liquido (Marinho e Oliveira, 2006).

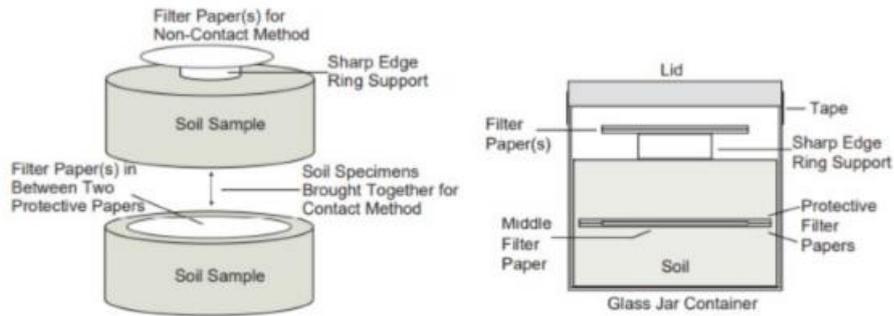


Figura 19 Schema della tecnica della carta filtro (Bulut e Leong, 2008)

Per ricavare la suzione matriciale all'equilibrio, i provini e la carta filtro sono assemblati con contatto diretto, mentre per la suzione totale vengono rinchiusi senza contatto tra loro, separate da un sostegno forato. Il contatto diretto tra le componenti consente all'acqua nella fase liquida ed i soluti, presenti nella matrice solida, di scambiarsi liberamente e migrare nel tessuto poroso della carta, che inizialmente si presenta allo stato secco. Mentre, se la carta e il terreno sono separati da una barriera di vapore, lo scambio d'acqua è limitato solo nella fase di vapore e il movimento di soluti non è permesso.

Nella situazione di assorbimento con flusso liquido, la fase acquosa non rompe la sua continuità poiché il flusso avviene in uno spazio continuo tra particelle di terreno e fibre di carta filtro. Il flusso capillare implica un'interazione tra la carta da filtro e i pori d'acqua del terreno con sali.

Durante il flusso di vapore, invece, per evaporare dal terreno le molecole d'acqua devono superare il potenziale matriciale nel terreno e anche l'eventuale potenziale osmotico dovuta alla presenza di sali disciolti. Lo spazio aereo lasciato tra l'acqua del terreno e la carta da filtro fornisce una barriera ai sali, permettendo solo al vapore acqueo di fluire.

Quindi se il flusso si verifica solo per trasferimento di vapore, dalla carta filtro si rileva il valore di suzione totale, poiché incorpora i componenti matriciale e osmotico che contengono le molecole d'acqua. Quando si verifica il flusso per capillarità, è la suzione matriciale che viene misurata. In questo caso, la componente osmotica non agisce come una forza di trattenimento aggiuntiva per l'acqua nel suo trasferimento alla carta da filtro.

La misura di suzione matriciale è simile alla misurazione della suzione totale eccetto il contatto che deve essere garantito tra carte e terreno. Dopo che viene stabilito l'equilibrio tra carta filtro e campione, si ottiene il livello di suzione (matriciale o totale) corrente del provino di terreno attraverso la misurazione del contenuto d'acqua della carta filtro poiché la suzione è la medesima nonostante il contenuto d'acqua delle componenti non è uguale.

La relazione che lega ogni valore di suzione ad un determinato contenuto d'acqua di carta filtro si ricava attraverso la curva di calibrazione appropriata della carta filtro.

Le curve di calibrazione sono generalmente ottenute dai processi di bagnatura e asciugatura delle carte da filtro attraverso il trasferimento di vapore (soluzioni saline) e l'essiccazione e l'imbibizione delle carte da filtro attraverso il trasferimento di fluido.



Figura 20 Calibrazione carta da filtro

La carta da filtro deve essere usata direttamente dalla scatola. Lo standard ASTM per il metodo di carta da filtro D 5298-92 suggerisce che la carta da filtro deve essere asciugata nel forno per almeno 16 ore prima dell'uso in modo tale che il suo contenuto d'acqua risulti pari a zero. Questa procedura può influire sul processo di assorbimento della carta. Inoltre, il tempo d'equilibrio è molto importante per ottenere una misurazione corretta.

L'affidabilità di qualsiasi metodo per misurare la suzione dipende dalla sua calibrazione.

La calibrazione richiede la generazione di suzione. La curva di calibrazione per la carta da filtro è la curva di ritenzione idrica del terreno per quel materiale poroso. Poiché la carta

da filtro è un materiale industriale, realizzato sotto rigoroso controllo di qualità, la curva di ritenzione non dovrebbe cambiare da un lotto all'altro.

Le equazioni di calibrazione devono essere sviluppate per la carta da filtro specifica utilizzata. Le carte filtro utilizzate per questo studio sono Schleicher & Schuell No. 589.

Di seguito si riporta, dal paper “Preliminary investigation on the water retention behaviour of cement bentonite mixtures” (Musso et al., 2019), l’andamento della calibrazione e la relazione che lega la suzione al contenuto d’acqua per questa tipologia di carta filtro. La relazione è utilizzata per individuare sia la suzione totale che quella matriciale in kPa.

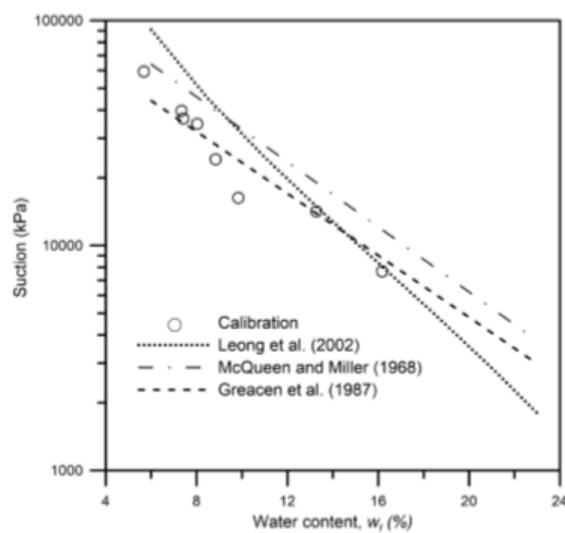


Figura 21 Curva della calibrazione carta da filtro (Musso et al., 2019)

$$\psi [kPa] = 145150 * e^{(-0,185w_f)}$$

Dove il contenuto d’acqua della carta w_f è riportato in percentuale.

2.4 Psicrometro WP4C

Lo psicrometro WP4 è stato sviluppato per rilevare la misurazione dell'umidità relativa in breve tempo. La tecnica utilizzata con WP4 è quella del *chilled mirror dew point* e permette di misurare la suzione totale del terreno. La temperatura del punto di rugiada (dew point) è la temperatura alla quale la pressione costante di vapore inizia a condensare (R.H. $\approx 100\%$). Quindi, lo strumento misura la temperatura alla quale si verifica la prima condensazione sullo specchio.

L'umidità relativa si calcola dalla differenza tra la temperatura del punto di rugiada e la temperatura del campione di terreno, che è misurata con il termometro ad infrarossi. La tecnica è sviluppata in condizioni isoterme inserendo il provino in una camera sigillata all'interno del WP4C.



Figura 22 Psicrometro WP4C

Se il campione risulta troppo caldo lo strumento non è in grado di iniziare la lettura, pertanto, la differenza delle temperature deve essere al di sotto dello zero per attivare il sigillo della camera e quindi l'inizio della lettura.

Essendo una prova a controllo di contenuto d'acqua, la misurazione della suzione totale per ogni provino si ripete più volte facendo diminuire il suo contenuto d'acqua con un processo di essiccazione a temperatura ambiente.

Successivamente al processo di essiccazione, è importante omogeneizzare ed equilibrare l'umidità interna con quella esterna del provino attraverso un processo di conservazione di circa 20 ore, prima di riutilizzarlo all'interno della camera dello psicrometro, per rilevare nuovi risultati ottimali. Per la conservazione per l'equilibrio di umidità relativa, i provini vengono avvolti ed isolati con pellicola trasparente e posizionati in un essiccatore contenente acqua distillata nella parte sottostante.

3 Apparecchiature

Questo capitolo descrive le apparecchiature utili per lo svolgimento delle varie procedure dello studio. L'*edometro a suzione controllata* e lo *psicrometro WP4C* sono due strumenti utilizzati per sviluppare le tecniche di ritenzione idraulica.

In particolare, il primo utilizza la tecnica della traslazione degli assi (cap.2).

Inoltre, si descrivono le caratteristiche dell'*edometro per consolidazione*, utile per lo sviluppo delle prove edometriche nella fase di preparazione dei provini.

3.1 Edometro a suzione controllata

L'edometro a suzione controllata adotta la tecnica della traslazione degli assi descritta nel capitolo 2, ma può essere implementata anche la tecnica di equilibrio di vapore. Oltre a ricavare i parametri idraulici, tipo la ritenzione idraulica, può essere utilizzato per definire le caratteristiche meccaniche di un provino di terreno. Purtroppo per questo caso studio, non risultano ottenuti dati con questo strumento e con la tecnica associata ad esso utili per sviluppo della curva di ritenzione idraulica.

In corrispondenza della base inferiore del pistone di carico è posizionata una pietra porosa in bronzo sinterizzato caratterizzata da una elevata permeabilità e da un diametro dei pori pari a 85 μm , che poggia direttamente sul provino durante la prova.

Lo strumento è suddiviso in due zone da una membrana impermeabile, di spessore 1mm: la zona inferiore è la camera dove è sito il provino, nella quale si genera la suzione imposta dalla applicazione della pressione dell'aria; la seconda zona, al di sopra della membrana, è la cella di carico dove viene sviluppato il carico verticale che equilibria il sistema. La pressione dell'aria ed il carico verticale sono imposte e controllate indipendentemente: la prima attraverso un software legato allo strumento, mentre la seconda manualmente.

La tensione verticale netta cui è sottoposto il campione, ossia la differenza tra il carico assiale applicato σ_v e la pressione dell'aria u_a , può essere determinata analiticamente, facendo riferimento ad un equilibrio verticale, mediante la seguente espressione:

$$(\sigma_v - u_a) = \frac{(A_p - A_r)\sigma_v - (A_p - A_a)u_a}{A}$$

dove A_p è l'area della testa di carico, dove appoggia la membrana impermeabile, A_r è l'area del pistone di carico, A_a è l'area del condotto per l'imposizione della pressione dell'aria e A è l'area della pietra porosa.

Al centro della parte bassa dell'edometro, dove subentra il flusso dell'acqua, è presente un disco di pietra ceramica ad alto valore d'ingresso dell'aria (HAEV) con diametro di 50 mm ed un'altezza di 7.15 mm. L'alto valore d'ingresso (HAEV) è una caratteristica della pietra ceramica, in funzione della sua porosità, descritta precedentemente nel capitolo 2. Indica il livello di suzione massimo che permette l'entrata delle bolle d'aria nella matrice della pietra. Il provino di terreno è trattenuto lateralmente da un anello di acciaio e viene collocato sul disco di ceramica, che consente il controllo della pressione dell'acqua interstiziale presente nel terreno.



Figura 23 Componenti dell'edometro a suzione controllata

Facendo riferimento alla Figura 23, un edometro a suzione controllata è composto dalle seguenti parti:

- Trasduttore LVDT (linear variable differential transformer) montato esternamente sopra il coperchio della strumentazione ha la funzione di misurare la deformazione assiale;
- Coperchio dell'edometro;
- Una membrana che si appoggia, per mezzo di una pietra porosa a grana grossa, sul provino. Il carico assiale viene imposto immettendo aria compressa nella camera al di sopra della membrana. Essendo la membrana deformabile, essa si gonfia all'aumentare della pressione trasmettendo così il carico al provino.
- Pietra porosa a grana grossa. In virtù della sua granulometria, essa si desatura per bassi valori della pressione dell'aria se, ipoteticamente, i suoi pori interstiziali fossero pieni di acqua.
- Provino racchiuso all'interno di un anello edometrico. Le sue dimensioni sono 50 mm di diametro e 20 mm di altezza: esse minimizzano gli effetti dovuti all'attrito laterale e il tempo di equalizzazione (quello per cui, a suzione imposta, il campione non scambia più acqua) e fornisce una precisione sufficiente per la misura della deformazione assiale.
- Pietra porosa a grana fine, generalmente in materiale ceramico. Essa è caratterizzata da un alto valore di ingresso dell'aria, high air entry value (HAEV). Ciò significa che, a causa della dimensione dei vuoti interstiziali, è necessaria una pressione dell'aria elevata affinché inizi a drenare acqua.
- Punto di arrivo del circuito dell'acqua dove viene applicata la pressione dell'acqua. Attraverso la combinazione delle pressioni aria e acqua è possibile controllare la suzione matriciale $u_a - u_w$.
- Un software installato su un computer che ha la funzione di comunicare con i trasduttori dell'aria e dell'acqua ed è in grado di impostare le pressioni e di conseguenza la suzione. Al contrario, il sistema per il controllo del carico assiale non viene gestito dal software, che si limita soltanto a rilevarlo, in quanto il sistema che fornisce aria compressa è autonomo. Il software permette, inoltre, il salvataggio dei dati registrati che sono la pressione assiale,

quella dell'aria, quella dell'acqua, lo spostamento assiale e lo scambio di acqua del volumometro.

- Circuito dell'acqua che passa attraverso un ulteriore piccolo contenitore. Si tratta di una misura di sicurezza per essere certi che non sia presente aria: infatti, se dovesse essercene, essa risale in testa al contenitore sotto forma di bolle d'aria.

- Circuito dell'aria che passa attraverso un contenitore in cui è presente dell'acqua.

Questo serve per evitare che l'aria che viene immessa all'interno del provino non sia eccessivamente secca in modo che non presenti un'umidità troppo differente da quella già presente nel campione al fine di evitare che esso si asciughi in maniera anomala.

- Volumometro è un serbatoio che immagazzina o rilascia l'acqua. Tramite il suo trasduttore, si possono monitorare gli scambi d'acqua del provino. Pertanto, esso registra una quantità d'acqua positiva in modo crescente quando immagazzina l'acqua e quindi il provino rilascia acqua (si sta muovendo lungo la curva di essiccazione). Viceversa, quando si sta studiando un'imbibizione del provino, esso si svuota e, quindi, registra quantità d'acqua sempre più negative.

- Tre regolatori di pressione, due dei quali controllati da un PC e uno manualmente, per l'impostazione delle pressioni assiale, dell'aria e dell'acqua le quali vengono applicate tramite una linea ad aria compressa a 10 bar.

- Tre trasduttori di pressione collegati alle tre pressioni (assiale, dell'aria e dell'acqua) imposte al campione.

3.1.1 Determinazione dei parametri caratteristici della pietra porosa

È possibile impostare le pressioni e controllare il volume d'acqua scambiato tra la pietra porosa e il volumometro. Questo permette di sviluppare i valori della pietra porosa e confrontarli con quelli forniti dal costruttore poiché la pietra potrebbe presentare nel corso del tempo delle variazioni nelle sue caratteristiche di permeabilità e valore d'ingresso dell'aria a seguito di prove precedenti. Si prevede un ingresso di fluidi e la saturazione della pietra con un fluido diretto dall'alto verso il basso.

La misura della permeabilità del disco in ceramica è un parametro che permette di verificare il valore fornito dal costruttore, se la pietra è stata danneggiata a seguito di prove

precedenti è possibile che il valore di permeabilità e del valore d'ingresso dell'aria sia variato nel tempo pertanto si procede mandando acqua dal volumometro verso la cella lasciando aperti due drenaggi con un moto di filtrazione diretto dall'alto verso il basso. Per innescare il flusso è necessario imporre un carico costante al volumometro e la pressione atmosferica in cella. La permeabilità è misurata monitorando i volumi d'acqua scambiati, in un intervallo di tempo mantenuto costante, con una procedura automatizzata sfruttando il software Labview. In seguito, sotto l'ipotesi di carico costante, viene valutata la permeabilità del filtro con la seguente formula:

$$K_d = \frac{\Delta V_w * t_c * \gamma_w}{\Delta t * A * \Delta P}$$

dove ΔV_w è la variazione di volume d'acqua (calcolata come differenza tra il volume d'acqua permeato all'istante t meno il volume d'acqua permeato all'istante $t - 1$), t_c è lo spessore del disco di ceramica, γ_w è il peso di volume dell'acqua, Δt è l'intervallo di tempo di riferimento, A è l'area del disco di ceramica e ΔP è la differenza di carico imposta.

Di seguito si riportano i valori di permeabilità della pietra porosa applicando una pressione dell'acqua pari a 500 KPa.

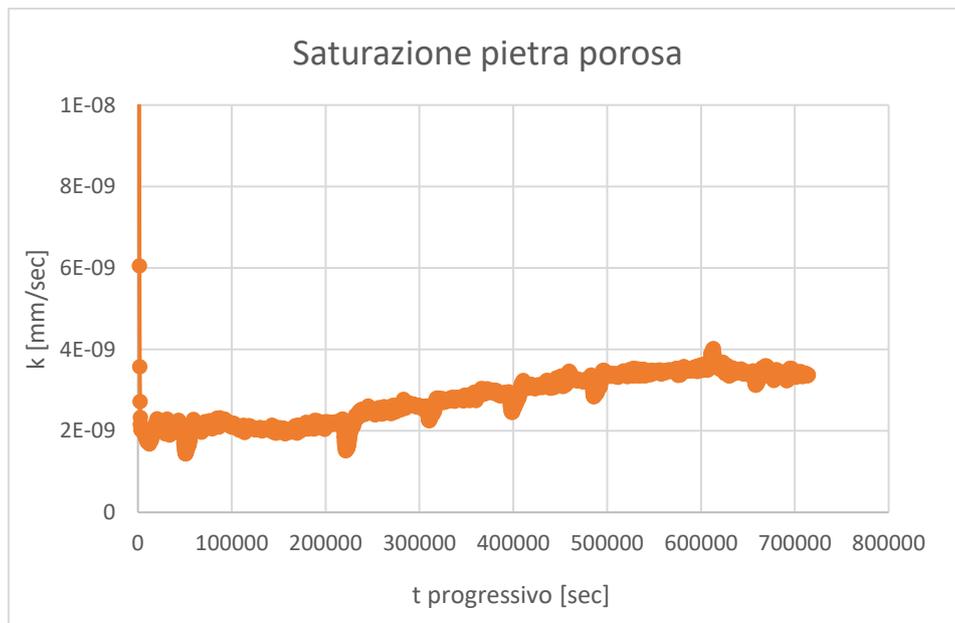


Figura 24 Permeabilità della pietra porosa

Si evidenzia come il valore medio di permeabilità ottenuto, che risulta pari a $3,06 \cdot 10^{-9}$ cm/s, è di due ordini di grandezza inferiore rispetto al dato di targa riportato dal produttore che risulta pari a $1,21 \cdot 10^{-7}$ cm/s per una pietra porosa 5 bar Standard Flow. Questa notevole differenza può essere imputata al fatto che la stessa pietra porosa era stata utilizzata per l'esecuzione di prove a suzione controllata precedenti che avevano visto l'impiego di un contaminante, che può avere alterato le prestazioni della pietra (Brunetti, 2019).

Dopo aver saturato il disco di ceramica si procede con la valutazione del valore di ingresso dell'aria, operazione non più effettuata per questo studio. Nella cella edometrica viene applicata una pressione dell'aria crescente che innesca un moto di filtrazione d'aria fino al valore HAEV.

3.2 Psicrometro WP4C

Il WP4C è uno psicrometro alimentato con corrente elettrica, utilizzato per la prova WP4C a controllo di contenuto d'acqua del provino. Il WP4C misura il potenziale totale dato dalla somma del potenziale osmotico e matriciale in un campione. Spesso uno di questi due potenziali è un fattore dominante nella determinazione del potenziale totale.

Il potenziale d'acqua di un solido o un liquido può essere trovato mettendolo in relazione con il rapporto tra la pressione di vapore dell'aria in equilibrio con il provino e la pressione di saturazione alla temperatura del campione. Di seguito la relazione del potenziale d'acqua del campione (ψ) è:

$$\psi = \frac{RT}{M_w} \ln \frac{p}{p_0}$$

Dove p è la pressione di vapore dell'aria, p_0 è la pressione di saturazione del vapore alla temperatura del campione, R è la costante dei gas (8,31 J/molK), T è la temperatura in Kelvin del campione e M_w è la massa molecolare dell'acqua. La pressione di vapore dell'acqua può essere misurata usando uno specchio freddo e p_0 è ricavato dalla temperatura del campione.

Il WP4C misura il potenziale d'acqua equilibrando la fase liquida dell'acqua con la fase di vapore dell'acqua del campione nello spazio di una camera chiusa, poi misurando la pressione di vapore dello spazio. Nel WP4C, un campione è disposto in una camera avente un sensore del punto di rugiada, un sensore di temperatura, e un termometro ad infrarossi. Il sensore del punto di rugiada misura la temperatura del punto di rugiada dell'aria mentre in termometro ad infrarossi misura la temperatura del campione.

Quando il WP4C computa la pressione di vapore dell'aria nello spazio come la pressione di saturazione del vapore alla temperatura del punto di rugiada, si può rilevare il potenziale con la misura della pressione di vapore dello spazio e la temperatura del campione dalla quale si ottiene la pressione di saturazione del vapore del campione. Lo strumento non inizia la lettura se il campione è troppo caldo: la differenza di temperatura ($T_s - T_b$) deve risultare sotto lo zero per avviare il meccanismo.



Figura 25 Psicrometro WP4C

3.3 Edometro per consolidazione

Questo strumento, come si può osservare nel prossimo capitolo sulla preparazione dei provini, è utilizzato per svolgere prove edometriche utili per la compattazione dei provini di slurry.

In una camera con umidità controllata in modo da minimizzare fenomeni di evaporazione, il provino è disposto in un anello rigido metallico, di dimensioni standard, che a sua volta è posizionato su una pietra porosa dentro una cella di carico edometrica. Sulla superficie superiore del provino invece viene posata una testa di carico, avente anch'essa una pietra porosa simile a quella nella base.

Nel provino confinato lateralmente, si generano deformazioni e un flusso d'acqua in direzione verticale con l'applicazione dei carichi, pertanto, le due pietre porose a contatto con il provino, inferiormente e superiormente, risultano essenziali per lo sviluppo del drenaggio dell'acqua durante la consolidazione. Le pietre presentano una porosità elevata poiché devono sempre garantire un libero deflusso d'acqua nel corso della prova ed inoltre, devono essere costituite da materiali non attaccabili chimicamente dai fluidi interstiziali del terreno e comunque non reagenti con altre parti dell'attrezzatura. Nel punto di contatto tra le pietre porose ed il provino sono introdotte carta da filtro di protezione con conducibilità idraulica idonea per evitare il contatto diretto tra le parti.



Figura 26 Componenti cella edometrica di carico Tecnotest (a sinistra), Wikeham-Farrance (a destra)

Si è deciso che il provino utilizzato per una prova edometrica deve avere un diametro minimo di 50 mm ed il rapporto tra diametro e altezza del provino deve risultare superiore a 2.5 al fine di ridurre al minimo gli effetti dell'attrito laterale e in ogni caso inferiore a 6 per evitare di avere un provino troppo sottile e quindi di difficile preparazione. Inoltre l'altezza del provino non può essere inferiore a dieci volte la massima dimensione delle particelle costituenti il materiale da sottoporre a prova (Brunetti,2019).

La cella edometrica di carico contenente il provino si dispone sul telaio per l'applicazione dei carichi. Il laboratorio di Geotecnica frequentato possiede 7 telai di edometro appartenenti a due differenti compagnie: *Tecnotest* e *Wikeham-Farrance*.



Figura 27 Telaio edometri Tecnotest



Figura 28 Telaio edometri Wikeham-Farrance

I carichi applicati variano in funzione delle dimensioni del provino e del telaio utilizzato, considerando sempre delle pressioni standard.

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

Figura 29 Valori standard dei carichi

In generale, l'incremento del carico successivo è pari al carico precedente o comunque il loro rapporto deve essere costante.

Altri elementi essenziali in questo circuito sono i trasduttori, posizionati sulla parte superiore del telaio a contatto con la testa di carico e collegati al software di lettura.

I trasduttori trasmettono al software lo spostamento attraverso un differenziale di potenziale in Volt ed il programma è in grado di trasformare il segnale dei trasduttori in valori di spostamento (mm).

È importante durante la prova mantenere i trasduttori nel range di Volt consono alla lettura (da 8 a 2 Volt per i Tecnotest, mentre da 8 a -8 per i Wykheam).

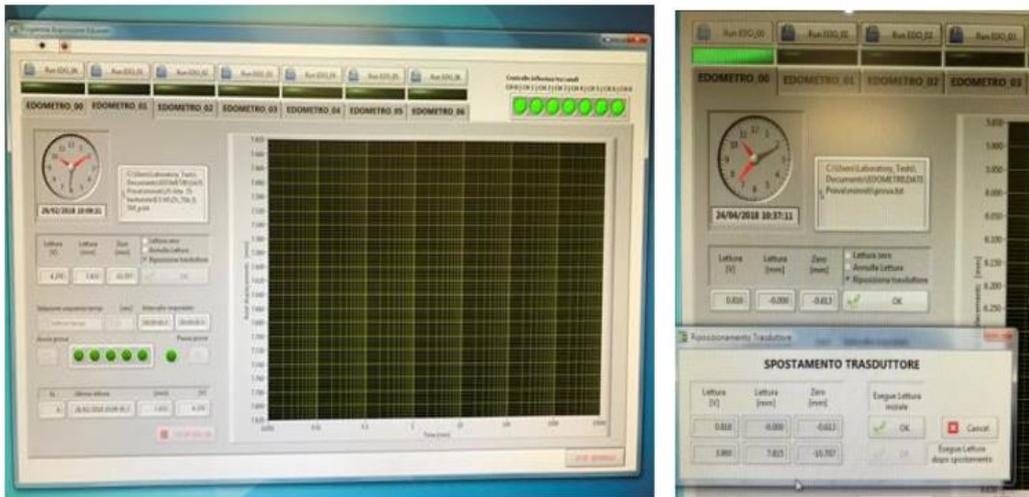


Figura 30 Programma associato agli edometri

4 Materiali e preparazione provini

Come già citato nei capitoli soprastanti, durante l'attività di laboratorio per questo studio sono sviluppate tre miscele di bentonite sodica con tre differenti soluzioni acquose: acqua distillata, soluzione 0,12 molare di NaCl e soluzione 0,12 molare di NaOH.

In questo capitolo, si descrivono tutte le caratteristiche della bentonite, materiale principale utilizzato, e successivamente la preparazione dei provini delle miscele.

In dettaglio, viene descritta la prova edometrica, importante step appartenente alla preparazione, che permette di ottenere provini consolidati, pronti per essere utilizzati nelle tecniche, da una fase di slurry.

4.1 Bentonite

La bentonite è un minerale argilloso ($\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 4\text{SiO}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) composto per lo più da montmorillonite, calcio o sodio appartenente al gruppo dei fillosilicati. I minerali argillosi sono silicati idrati a struttura lamellare e le unità fondamentali della struttura sono tetraedri ed ottaedri collegati tra loro a formare maglie piane. Il gruppo minerario della bentonite comprende tra le caratteristiche tipiche una capacità di scambio cationico, elevata proprietà di rigonfiamento e bassa permeabilità all'acqua. Inoltre, la bentonite può presentare una elevata compressibilità ed il grado di consolidamento, nonostante si presenta basso allo stato iniziale, incrementa nel tempo.

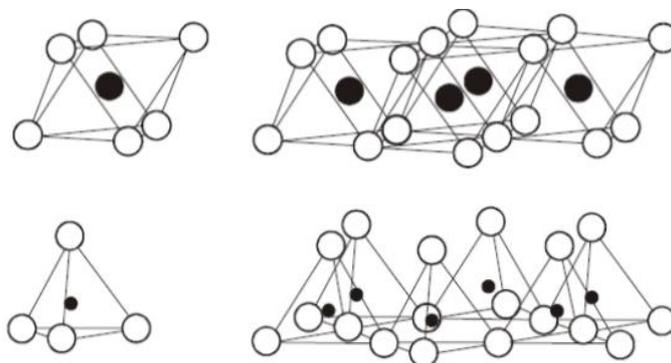
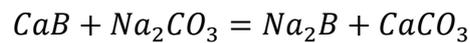


Figura 31 Strutture tetraedrica e ottaedrica della bentonite

La maggior parte delle bentoniti sono sodiche, calciche o miste.

La bentonite sodica è la tipologia utilizzata per le opere di costruzione di ingegneria civile, in particolare per la costruzione di barriere impermeabilizzanti. Essa si ricava da un trattamento della bentonite calcica con il carbonato di sodio. La reazione che trasforma la bentonite calcica in quella sodica è:



La ragione per cui, nel campo delle costruzioni la sodica è preferita alla calcica, è che presenta una maggiore dispersione, migliori proprietà plastiche e reologiche, maggiore rigonfiamento e minore conduttività idraulica grazie ai legami intermedi deboli e una elevata capacità di scambio cationico.

Infatti, la montmorillonite si rigonfia grazie alla separazione degli strati a causa dell'entrata dei cationi interscambiabili e dei cationi d'acqua. Inoltre, i cationi di sodio inizialmente esistente tra gli strati di bentonite sono facilmente sostituibili da cationi multivalenti (ad esempio, Ca^{+2} , Mg^{+2}).

La bassa permeabilità della bentonite di sodio è causata dalla presenza di doppi strati diffusi e di piccole dimensioni delle particelle associate alla frazione montmorillonitica, entrambe risultanti in piccoli e tortuosi percorsi di flusso (Mesri and Olson, 1971).

Sebbene la bentonite di calcio abbia una minore capacità di rigonfiamento e una maggiore conducibilità idraulica dell'acqua rispetto alla bentonite di sodio, le ricerche suggeriscono che la bentonite di calcio è più stabile della bentonite sodica se esposta a costituenti chimici nel fluido permeante (Brunetti, 2019).

La bentonite sodica utilizzata per l'attività nel laboratorio di Geotecnica è *Bentonite Bentosund* fornita da *Laviosa Mineral Solution s.p.a.* (Livorno).



Figura 32 Bentonite sodica

4.1.1 Limiti di Atterberg

Per i terreni a grana fine, come in questo caso studio, le proprietà dipendono soprattutto dalla natura delle particelle. È importante definire il comportamento delle particelle e la loro interazione con l'acqua in funzione proprio del contenuto d'acqua corrispondente di un mezzo.

I valori limite del contenuto d'acqua corrispondenti alla transizione da uno stato di consistenza a un altro sono riconosciuti come *limiti di consistenza* o *limiti di Atterberg*. Un campione di terreno a grana fine può presentarsi in uno stato liquido, plastico, semisolido o solido, a seconda del suo contenuto d'acqua. Il limite di consistenza tra lo stato semisolido e quello solido è *limite di ritiro*; mentre i due limiti di consistenza, che delimitano il campo di comportamento plastico del materiale, sono il *limite liquido* w_L ed il *limite plastico* w_P . Quando il materiale si presenta con un valore di contenuto d'acqua tra questi due limiti, è allo stato plastico e ha un'attitudine ad essere modellato e deformato in modo irreversibile senza rompersi o fessurarsi.

Si definisce l'indice di plasticità IP come:

$$IP = w_L - w_P$$

La plasticità di un materiale è classificata in base all'indice di plasticità.

Il limite liquido w_L , che indica lo stato di transizione tra la fase plastica e la fase liquida, viene misurato con uno strumento chiamato *cucchiaio di Casagrande*. Il limite plastico w_P

è il contenuto limite in corrispondenza del quale si passa da un comportamento plastico ad uno stato quasi semisolido. Esso si determina formando dei bastoncini del diametro di 3,2 e valutando il contenuto d'acqua alla prima fessurazione.

Di seguito si riportano i valori ottenuti per la bentonite (Brunetti, 2019):

LIMITI DI ATTERBERG	
Limite liquido, w_L	615,88 %
Limite plastico, w_P	41,73 %
Indice di plasticità, IP	574,15 %

Tabella 1 Limiti di Atterberg della bentonite (Brunetti, 2019)

4.2 Preparazione dei provini

Il primo step per la preparazione dei provini è di idratare la bentonite con una soluzione acquosa.

Per l'ottenimento delle miscele richieste oggetto di studio si è deciso di miscelare la bentonite sodica solida con una soluzione acquosa 0,12 M o acqua distillata considerando un rapporto in peso pari a 1 a 6. Si è deciso di adottare per ogni miscela sempre il medesimo rapporto per partire da un contenuto d'acqua maggiore uguale al limite liquido.

La miscelazione tra le due componenti viene sviluppata con un miscelatore meccanico per circa 15-20 minuti fino a quando non si crea una miscela uniforme di slurry senza grumi di bentonite.



Figura 33 Miscelatore meccanico



Figura 34 Bentonite idratata

4.2.1 Prova edometrica

Una volta composto lo slurry della miscela, una parte di esso viene introdotta in un anello edometrico all'interno della cella edometrica e subito sottoposta ad una prova edometrica per ottenere un provino consolidato, mantenendo sempre una condizione satura.

È importante preparare il provino in una sala con umidità controllata in minor tempo possibile ed evitare di lasciare esposta in ambiente l'intera miscela in modo tale da minimizzare i fenomeni di evaporazione. Si deve assicurare che durante la preparazione il provino non subisce variazioni del contenuto d'acqua maggiori dell'1 %.

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

La cella deve essere sempre piena di soluzione acquosa in modo da prevenire l'essiccamento del provino nel corso della prova. Inizialmente si introduce all'interno della cella la soluzione acquosa utilizzata per la miscela in atto, ma con il passare dei giorni e lo sviluppo dei carichi la cella viene colmata costantemente con acqua distillata.



Figura 35 Prova edometrica

La prova edometrica riproduce in laboratorio le condizioni di consolidazione monodimensionale del terreno attraverso una sequenza di carichi verticali applicati su un provino cilindrico confinato lateralmente.

In questo caso studio, si adotta una consolidazione ad incrementi di carico con una sequenza di carichi crescente fino a 196,1 kPa. In tali condizioni, le deformazioni ed il flusso d'acqua dei provini confinati lateralmente si sviluppano solo nella direzione verticale.

Ogni processo di carico ha una durata di circa 24 ore, sufficienti a garantire la completa dissipazione delle sovrappressioni dell'acqua interstiziale generata dall'applicazione del carico stesso. Gli ultimi due cicli di carico, a 98,1 kPa e 196,1 kPa, invece, si è deciso di mantenerli per circa 48 ore.

Oltre alla fase di carico, non vengono rilevate le deformazioni con un processo inverso di scarico e quindi, le letture della prova terminano con l'ultimo carico imposto.

Il processo di consolidazione rileva i cedimenti verticali che si sviluppano nel provino e permette di determinare i parametri e la curva di compressione.

Per ogni gradino di carico, si acquisiscono i dati dal software collegato alla prova e si ottengono le curve dei cedimenti in funzione del tempo.

Successivamente si costruisce la curva di compressione riportando i valori dell'indice dei vuoti, in funzione delle deformazioni e quindi dei cedimenti.

5 Elaborazione dei dati

Nel presente capitolo, sono riportati i risultati sperimentali delle tre miscele di bentonite sodica analizzate in questo caso studio:

- Bentonite sodica saturata con acqua distillata
- Bentonite sodica saturata con soluzione di cloruro di sodio NaCl a 0,12 M
- Bentonite sodica saturata con soluzione di idrossido di sodio NaOH a 0,12 M

In primis, si riportano le curve di compressione monoassiale effettuate attraverso prove edometriche, relative agli slurry, prodotti in laboratorio, di ogni miscela. Si tratta di prove essenziali per l'ottenimento di provini consolidati monodimensionalmente da utilizzare nelle tecniche oggetto di studio.

Successivamente, sono presenti i risultati della ritenzione idraulica per essiccamento di ogni miscela, ottenuti attraverso lo sviluppo delle tecniche descritte in precedenza, quali: *equilibrio di vapore, psicrometro WP4C e carta da filtro.*

L'analisi della ritenzione idraulica è effettuata mettendo in relazione i valori ottenuti di suzione totale, o matriciale, con una misura corrispondente della quantità d'acqua presente nel mezzo poroso come il grado di saturazione o la percentuale del contenuto d'acqua.

5.1 Curve di compressione

Si preparano slurry con acqua distillata, o un'altra soluzione, e bentonite sodica con un rapporto di proporzione pari a circa 6 a 1. Questo materiale molto deformabile è introdotto in un anello rigido di diametro circa 50 mm e altezza 20 mm che a sua volta è situato in una cella di carico edometrica di un edometro.

Come già espresso nel precedente capitolo, attraverso gli edometri, lo slurry è sottoposto ad una successione di carichi monoassiali fino a 196,1 kPa. Alla fine di ogni prova si ottiene un provino consolidato con diametro invariato ma altezza inferiore dovuta ai cedimenti sviluppati durante i cicli di carico, pronto per essere utilizzato in una delle tecniche per la ritenzione idraulica.

Grazie ai cedimenti avvenuti durante ogni incremento di carico, si può valutare l'indice dei vuoti per ogni carico con la seguente formula:

$$e_i = \Delta e_i + e_{i-1}$$

Dove:

$$\Delta e_i = \frac{H_0 - H_i}{H_0} * (1 + e_{i-1})$$

Partendo dall'indice dei vuoti iniziale:

$$e_0 = G_s * w_{slurry}$$

Considerando:

- H_0 : altezza iniziale del provino;
- H_i : altezza dopo il carico i -esimo;
- w_{slurry} : contenuto d'acqua iniziale dello slurry;
- G_s : gravità specifica;

In seguito, comparando le prove edometriche appartenenti allo stesso slurry, si può osservare il comportamento volumetrico di ogni miscela adottata e il decremento dell'indice dei vuoti per ogni incremento di carico.

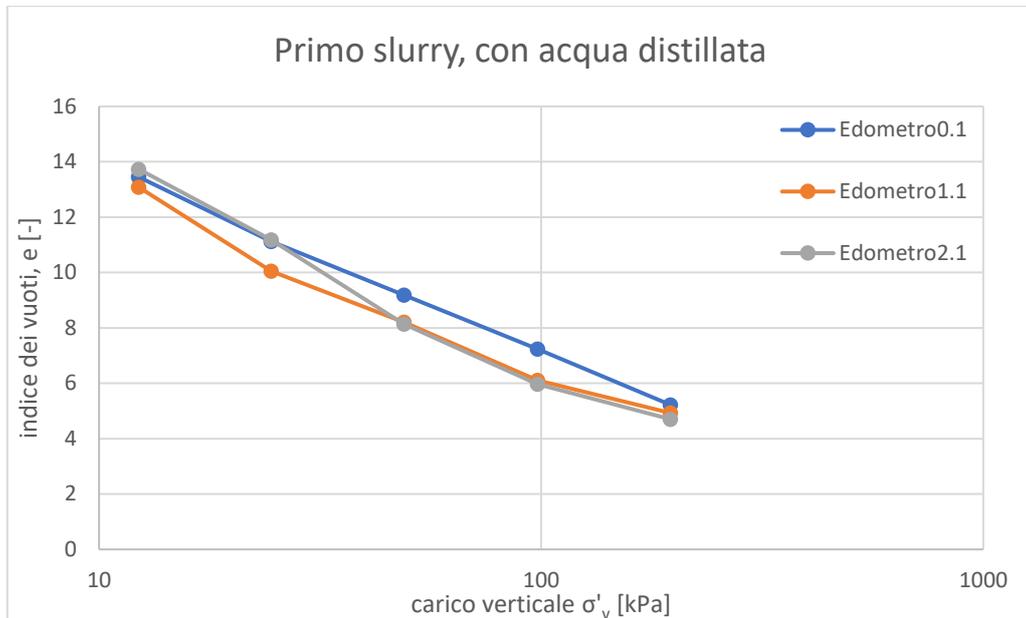


Figura 36 Curva di compressione del primo slurry della miscela con acqua distillata

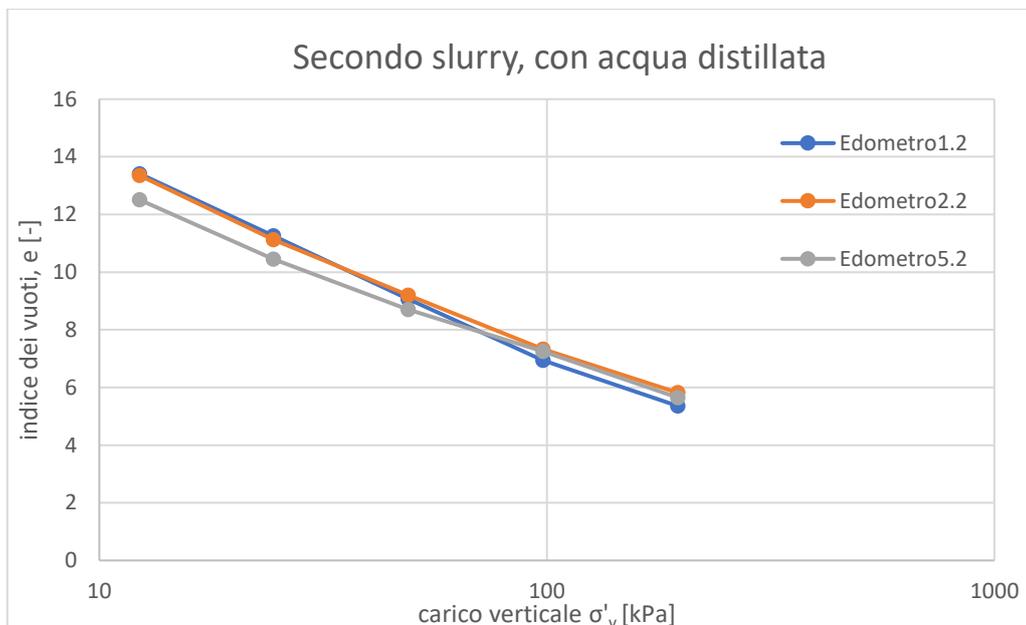


Figura 37 Curva di compressione del secondo slurry della miscela con acqua distillata

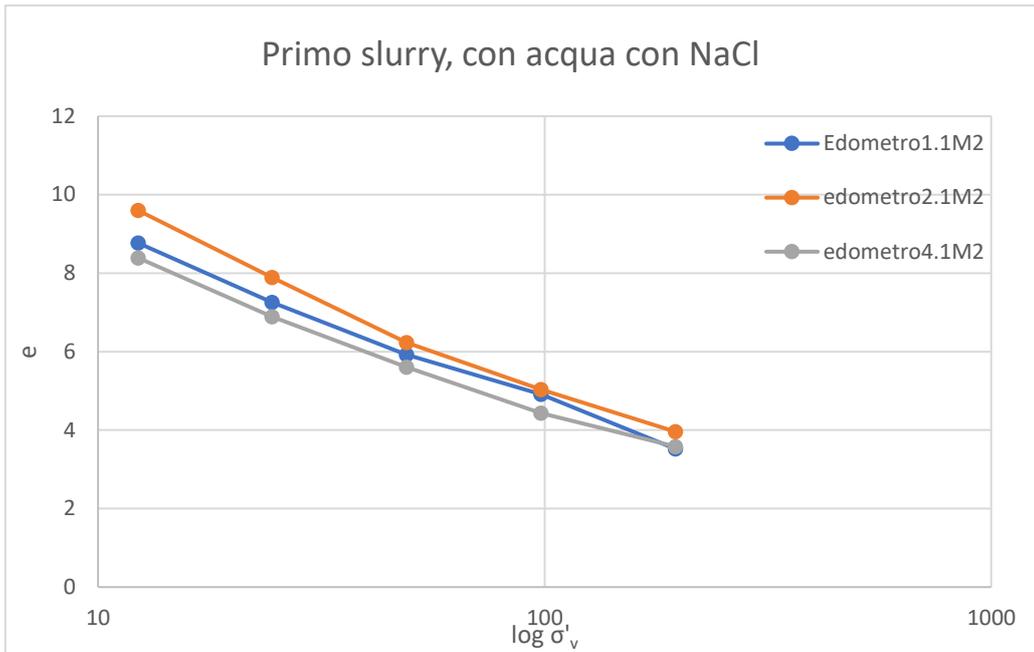


Figura 38 Curva di compressione del primo slurry della miscela con soluzione di NaCl

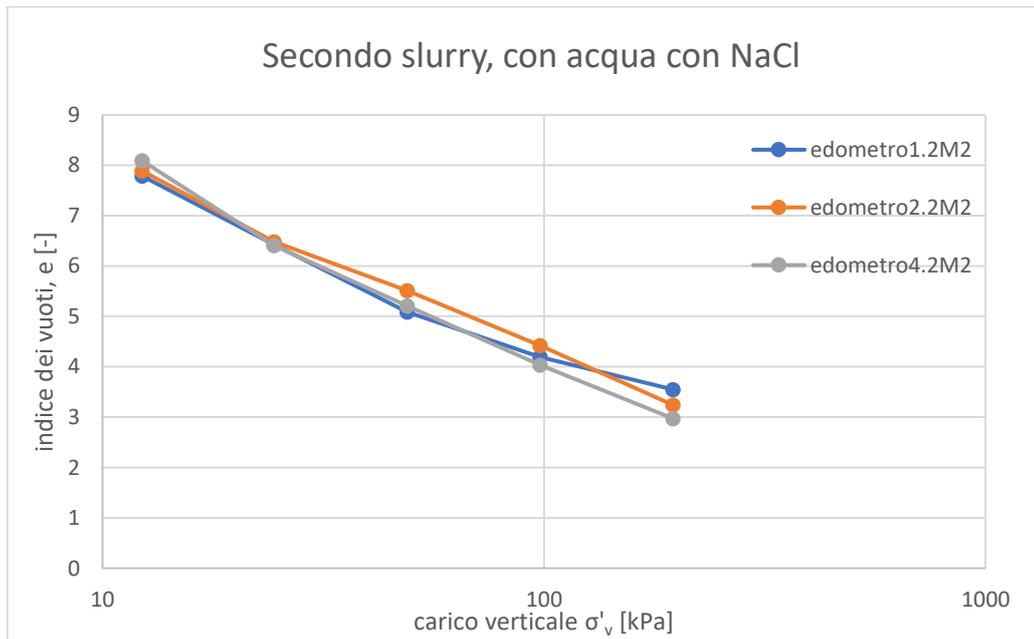


Figura 39 Curva di compressione del secondo slurry della miscela con soluzione di NaCl

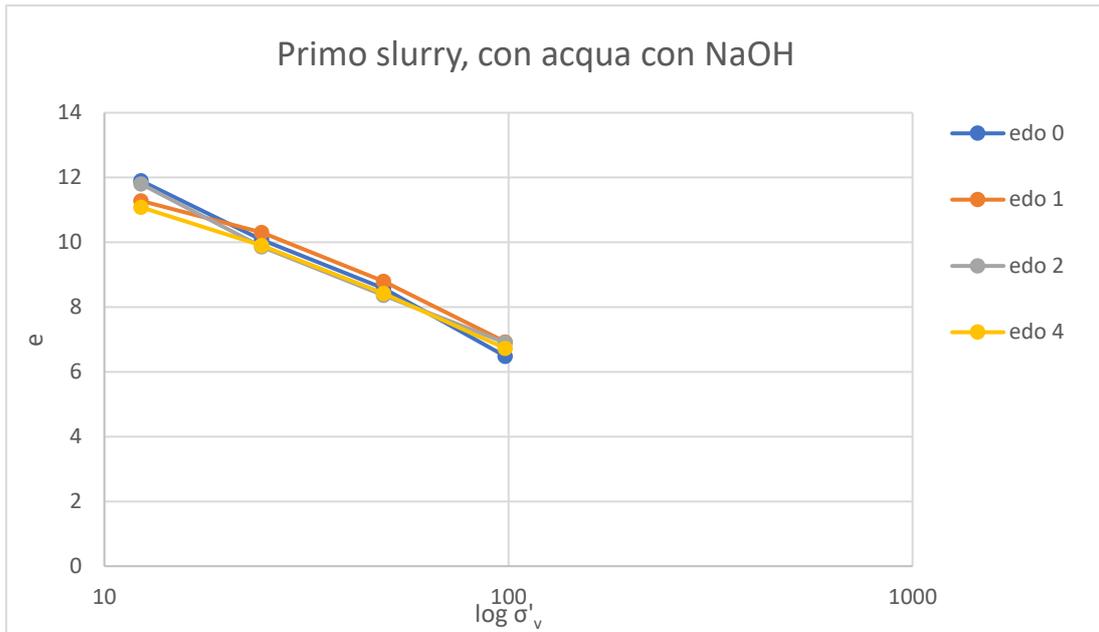


Figura 40 Curva di compressione del primo slurry della miscela con soluzione di NaOH

5.2 Equilibrio di vapore

Inizialmente per la seguente tecnica sono selezionate, tra tutte quelle presenti in tabella riportata di seguito (Romero,2011), nove soluzioni saline, poi preparate con un miscelatore magnetico considerando la solubilità indicata per ognuna.

Compound	T (°C)	A (%)	B (K)	$u_{s,25}(\%)$ ± 25 °C	ψ (MPa) ± 25 °C	Solubility (g/100 g H ₂ O) 30 °C
NaOH·H ₂ O	15-60	5.48	27	6	386	113
LiBr·2H ₂ O	10-30	0.23	996	6	386	193
ZnBr ₂ ·2H ₂ O	5-30	1.69	455	8	347	529
KOH·2H ₂ O	5-30	0.014	1924	9	330	128
LiCl·H ₂ O	20-65	14.53	-75	11	303	86
CaBr ₂ ·6H ₂ O	11-22	0.17	1360	16	251	170*
LiI·3H ₂ O	15-65	0.15	1424	18	235	170
CaCl ₂ ·6H ₂ O	15-25	0.11	1653	29	170	97*
MgCl ₂ ·6H ₂ O	5-45	29.26	34	33	152	57*
NiI ₂ ·2H ₂ O	5-45	3.62	702	38	133	192
K ₂ CO ₃ ·2H ₂ O	20			44	112	113
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	10-30	1.89	981	51	92	156
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	5-35	25.28	220	53	87	74*
NaBr·2H ₂ O	0-35	20.49	308	58	75	98
NaNO ₂	20			66	57	88
KI	5-30	29.35	254	69	51	153
SrCl ₂ ·6H ₂ O	5-30	31.58	241	71	47	57*
NaNO ₃	10-40	26.94	302	74	41	95
NaCl	10-40	69.20	25	75	39	36
NH ₄ Cl	10-40	35.67	235	79	32	41
KBr	5-25	40.98	203	81	29	71
(NH ₄) ₂ SO ₄	10-40	62.06	79	81	29	78
KCl	5-25	49.38	159	84	24	37
Sr(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	5-25	28.34	328	85	22	89
BaCl ₂ ·2H ₂ O	5-25	69.99	75	90	14	38
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	20			91	13	62*
CaI	5-25	70.77	75	91	13	95
KNO ₃	0-50	43.22	225	92	11	46
CuSO ₄ ·5H ₂ O	20			97	4	24*
K ₂ SO ₄	10-50	86.75	34	97	4	13

* solubility values possibly affected by solid phase changes, usually from one hydrated phase to another or from a hydrate to the anhydrous solid

Figura 41 Valori teorici di differenti soluzioni (Romero,2011)

Le soluzioni saline selezionate presentano differenti livelli di suzione totale, con un ampio range tra i valori al fine di ottenere una dispersione di dati ben distribuita.

Prima di introdurre nel fondo di un apposito contenitore sigillato ciascuna soluzione, si misura ogni effettivo livello di suzione totale mediante l'uso dello psicrometro WP4. Poiché la temperatura influenza radicalmente i valori di suzione totale, le misure effettuate con lo psicrometro, a temperatura di 21,4 °C, presentano alcune variazioni rispetto ai valori di riferimento presentati da Romero (2001).

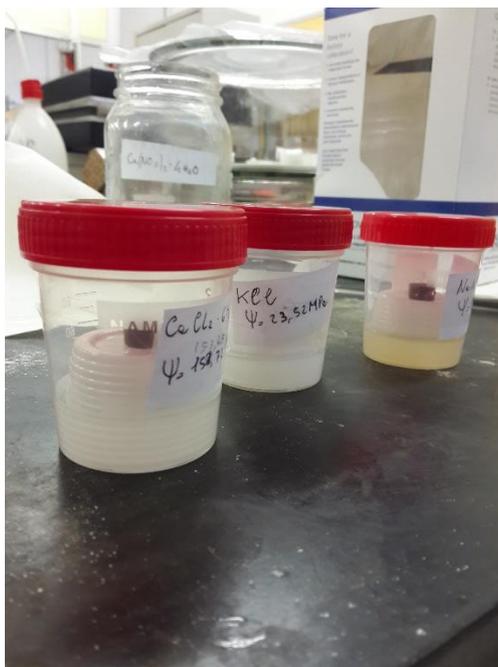


Figura 42 Contenitori con tecnica di equilibrio di vapore

Di seguito, le soluzioni utilizzate, con i rispettivi valori di suzione ottenuti, per la miscela con acqua distillata.

SOLUZIONE SALINA	ψ [Mpa]
NH ₄ Cl	33,87
Na NO ₂	59,57
K NO ₃	9,11
Na NO ₃	35
K Cl	20,23
Na Cl	37,5
BaCl ₂ 2H ₂ O	12,8
K ₂ SO ₄	4,91
CaCl ₂ 6H ₂ O	168,8

Tabella 2 Suzione totale per ogni soluzione salina utilizzata a 21,4°C

Una volta finita la consolidazione dei provini con diametro di circa 50 mm, sono estrusi da essi nove campioni con diametro iniziale 12,16 mm.

I nove campioni sono posti in nove differenti barattoli a chiusura stagna che contengono sul fondo una piccola quantità di una soluzione salina citata in tabella x, una differente per

ognuno. Ogni contenitore genera un ambiente chiuso con un'atmosfera contraddistinta da un'umidità relativa variabile in relazione alla soluzione salina. Poiché il campione è rinchiuso in un sistema chiuso con un'umidità relativa imposta e quindi suzione totale costante, esso tende con il passare del tempo a subire la suzione corrispondente alla soluzione salina del barattolo fino all'equilibrio.

I campioni sono chiusi nei barattoli ermetici e posizionati su un apposito supporto al fine di evitare il contatto con la soluzione fluida sottostante, per circa venti giorni, fino all'equilibrio.

Con una cadenza bigiornaliera viene monitorata la perdita di peso di ogni campione che si genera grazie al processo di essiccamento presente all'interno del barattolo. Quando il peso non presenta più variazioni significative e il campione ha raggiunto l'equilibrio con l'ambiente all'interno del barattolo, la prova può essere considerata conclusa.

Di seguito sono riportati gli andamenti delle masse dei provini nel tempo per ogni soluzione salina.

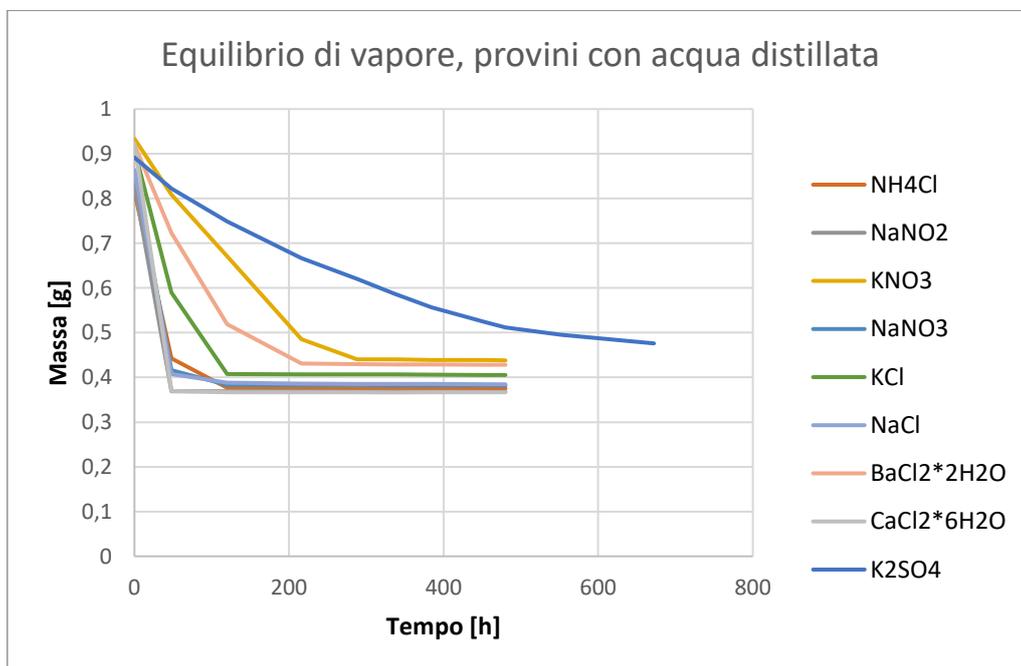


Figura 43 Andamento delle masse dei campioni di miscela con acqua distillata

Emerge che i campioni introdotti in ambienti con suzioni totali più elevate raggiungono in minor tempo l'equilibrio perdendo massa e quindi contenuto d'acqua bruscamente; mentre quelli sottoposti a suzioni totali più basse hanno un processo di equilibrio più lungo

come si può notare dalla curva azzurra rappresentante la soluzione salina K_2SO_4 e corrispondente al valore più basso di suzione adottato.

Dopo aver estratto definitivamente ogni campione dal proprio barattolo, si rilevano la massa umida all'equilibrio e le misure di diametro e altezza finali con un calibro di precisione. Infine, si introducono per circa 24 ore in un forno con temperatura di $105^\circ C$ per rilevare la massa secca di ognuno e quindi il volume del secco, utili per ricavare il contenuto d'acqua effettivo ed il grado di saturazione.

Di seguito le formulazioni per l'ottenimento del contenuto d'acqua all'equilibrio:

$$w_{eq} = \frac{(P_{u,eq} - P_s)}{P_s}$$

Con:

- $P_{u,eq}$: massa umida finale del provino;
- P_s : massa secca del provino;

Di seguito le formulazioni per l'ottenimento del grado di saturazione:

$$S_r = \frac{V_w}{V_v}$$

Con:

- Volume dell'acqua: $V_w [mm^3] = (P_{u,eq} - P_s) * \gamma_w$
- Volume dei vuoti: $V_v = V_{T,eq} - V_s$
- Volume del secco: $V_s = P_s * \gamma_{bentonite}$

Si riportano i dati ottenuti di ritenzione idraulica per essiccamento con la tecnica dell'equilibrio di vapore relativi alla miscela di bentonite con acqua distillata.

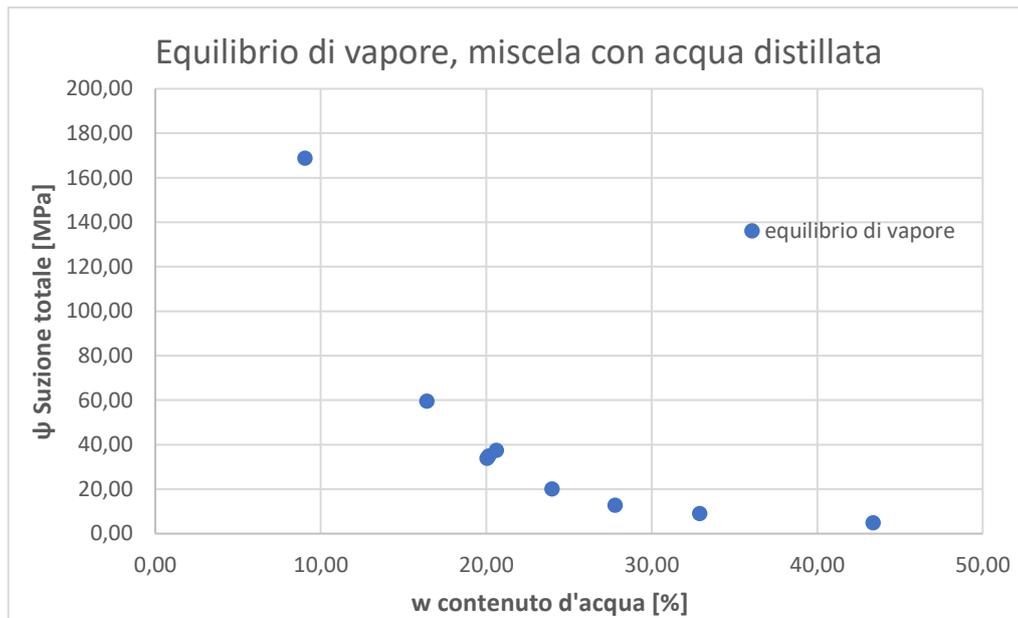


Figura 44 Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela con acqua distillata

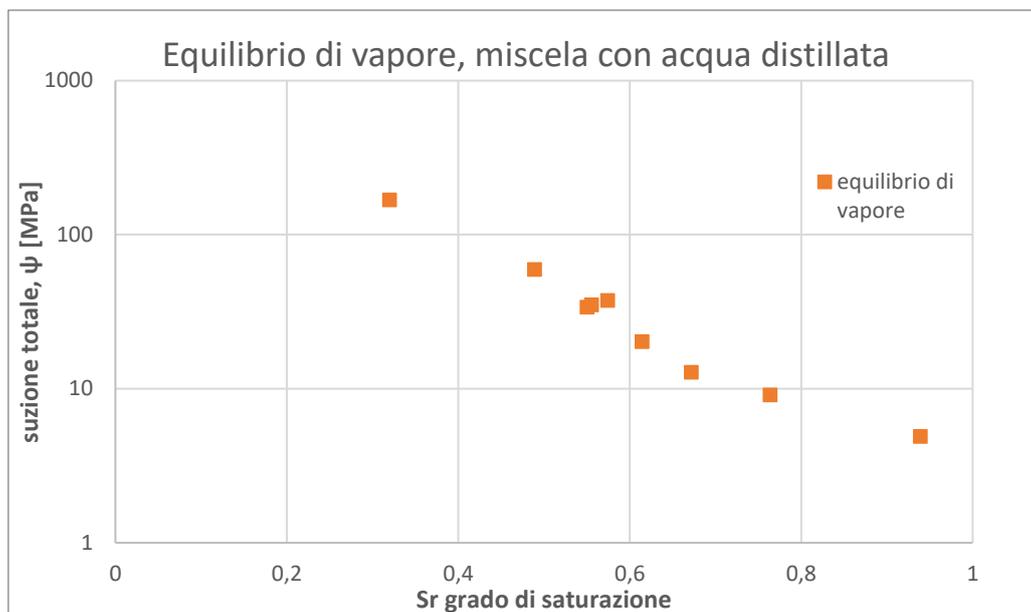


Figura 45 Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela con acqua distillata

Per quanto riguarda la miscela di bentonite con soluzione di NaCl (0,12 M), è adottato il medesimo procedimento di equilibrio di vapore della prima miscela con acqua distillata. Le differenze presenti rispetto alla precedente miscela sono la lieve variazione delle misure di suzione totale delle soluzioni saline e l'omissione della soluzione salina NH₄Cl, con suzione

totale pari a 33,87 Mpa. Per cui, sono utilizzati otto provini e non più nove come in precedenza.

Di seguito, le soluzioni utilizzate, con i rispettivi valori di suzione ottenuti, per la miscela con soluzione di NaCl (0,12 M).

SOLUZIONE SALINA	ψ [Mpa]
Na NO ₂	59,57
K NO ₃	9,11
Na NO ₃	35
K Cl	20,23
Na Cl	37,5
BaCl ₂ 2H ₂ O	12,8
K ₂ SO ₄	4,91
CaCl ₂ 6H ₂ O	168,8

Tabella 3 Suzione totale per ogni soluzione salina utilizzata a 21,4°C

Di seguito sono riportati gli andamenti delle masse dei provini nel tempo per ogni soluzione salina.

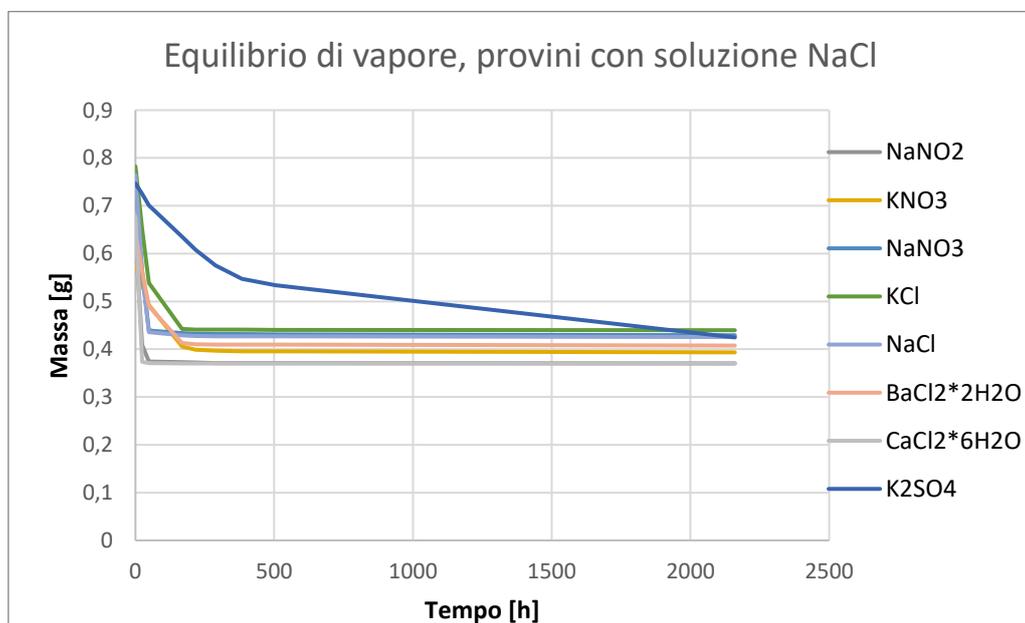


Figura 46 Andamento delle masse dei campioni di miscela con soluzione NaCl

Come per la precedente miscela, anche in questo caso si possono notare differenze temporali per l'equilibrio tra i vari livelli di suzione.

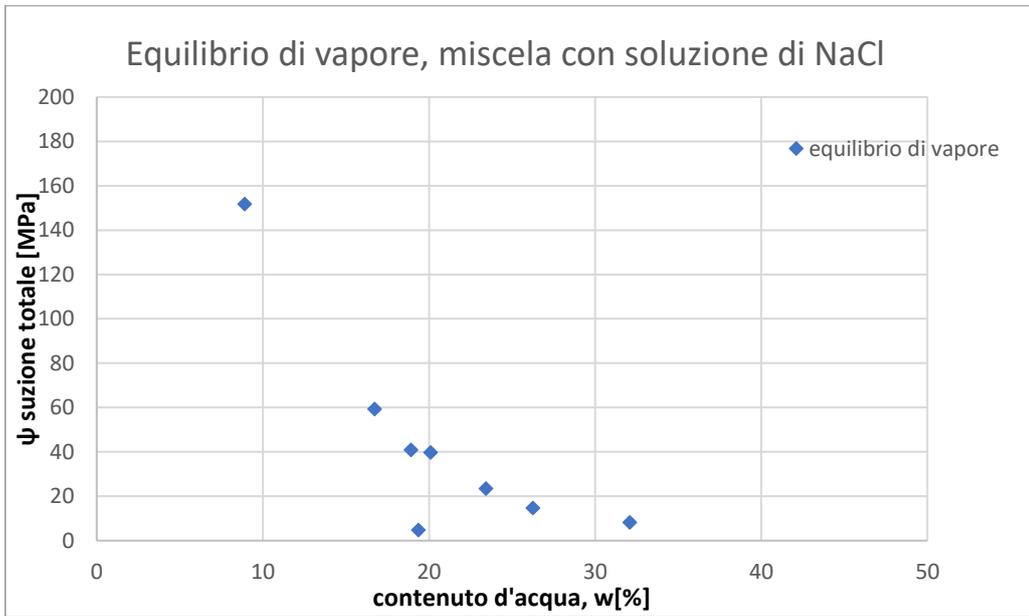


Figura 47 Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela con soluzione di NaCl

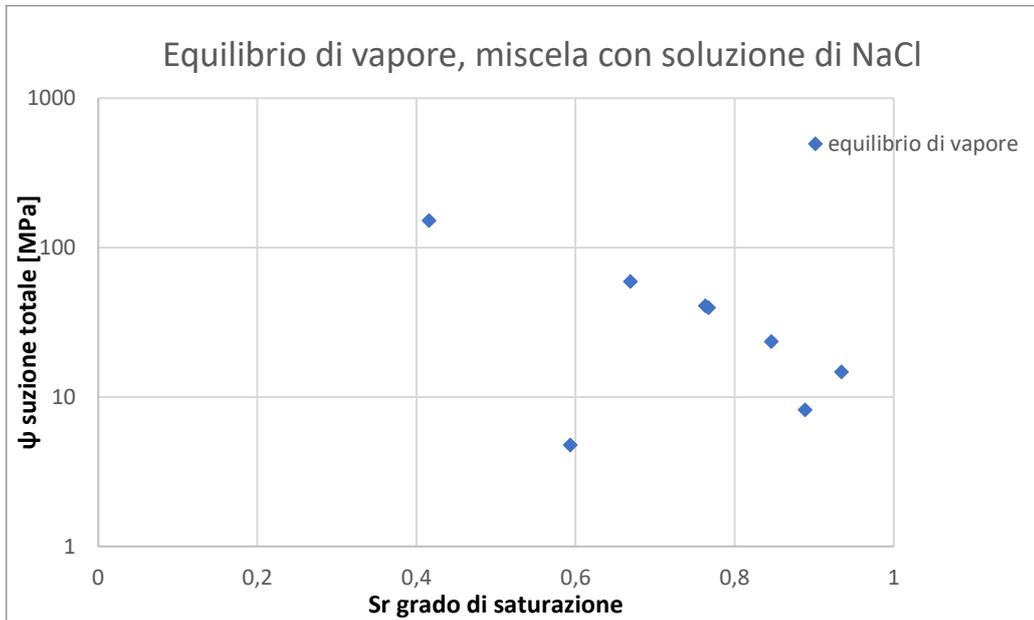


Figura 48 Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela con soluzione di NaCl

Di seguito sono riportati i grafici di suzione totale relazionata con percentuale di contenuto d'acqua w e grado di saturazione S_r per la miscela di bentonite con soluzione di NaOH.

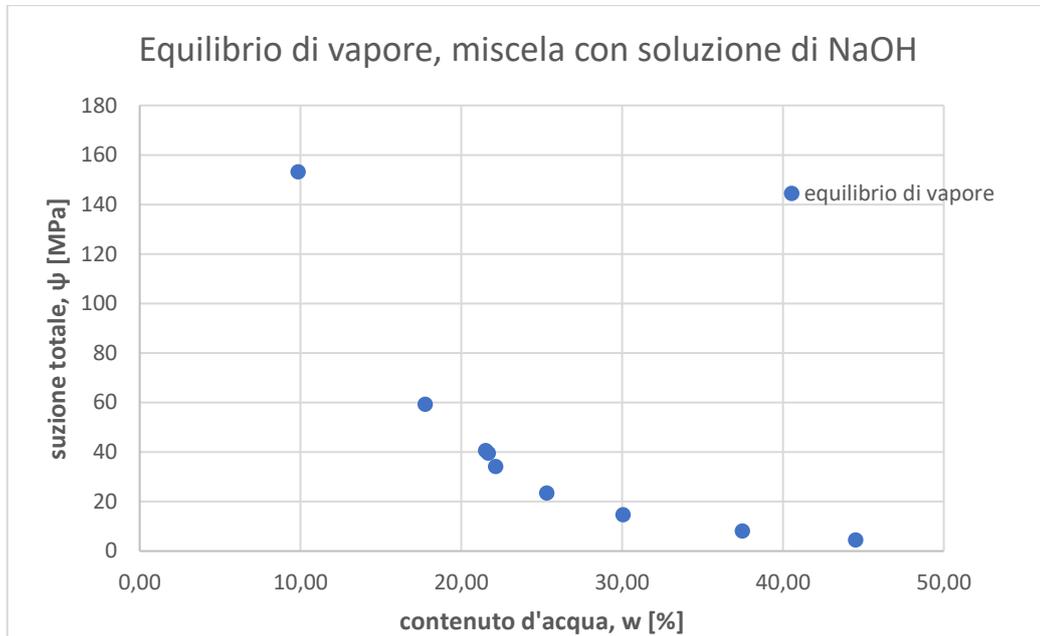


Figura 49 Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela con soluzione di NaOH

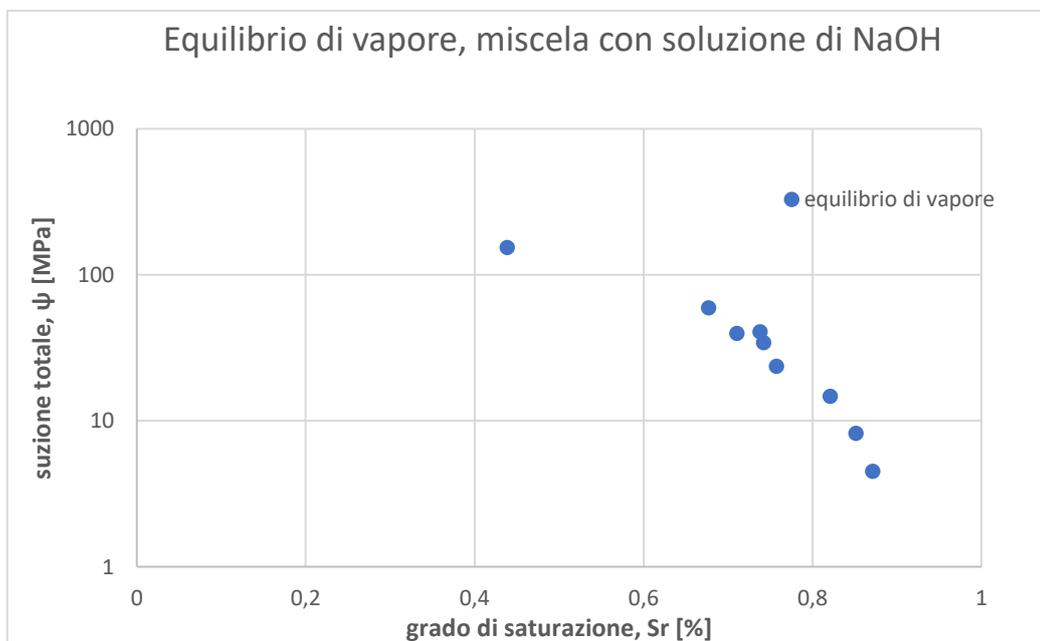


Figura 50 Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela con soluzione di NaOH

5.3 Psicrometro a condensazione WP4C

Per ottenere delle misurazioni di suzione totale con lo psicrometro WP4C sono utilizzati dei campioni di diametro 18,56 mm.

Analogamente alla tecnica precedente, i campioni utilizzati per questa tecnica sono estrusi inizialmente da un provino consolidato con prova edometrica fino ad un carico di 196,1 kPa di diametro pari a circa 50 mm.

Dopo aver rilevato le misure iniziali di ogni campione estruso da analizzare, essi sono sigillati con della pellicola per circa 20 ore e conservati in un contenitore con acqua alla base in modo tale da far equilibrare l'umidità relativa (RH) di ognuno. Senza il sigillo, lo psicrometro potrebbe impiegare molto tempo a rilevare una misurazione di suzione totale ed inoltre, essendo proprio la suzione dipendente dell'umidità relativa, potrebbe rilevarla erroneamente poiché l'umidità relativa nella parte esterna del campione presenterebbe valori più bassi rispetto al cuore del campione e quindi non sarebbe equilibrata. Ogni campione viene introdotto nella apposita camera dello strumento fino al segnale di fine lettura, generalmente per circa 20-30 minuti.

La lettura della suzione totale viene rilevata da uno schermo presente sullo strumento digitalmente.

Una volta estratto dalla camera di misurazione, sono ricavati peso, altezza e diametro di ogni campione per la valutazione del contenuto d'acqua e del volume totale attuale corrispondenti alla lettura di suzione appena terminata.

Successivamente, i campioni, prima di esser risigillati nuovamente per 20 ore, sono lasciati esposti a temperatura ambiente per qualche ora e con frequenti pesate si controlla la diminuzione della massa umida fino ad una nuova percentuale di contenuto d'acqua da associare ad una nuova lettura. In particolare, un campione è lasciato esposto più dell'altro per avere livelli di contenuto d'acqua differenti e quindi ottenere una dispersione di dati più ampia.

Dopo aver ripetuto la procedura più volte, i campioni sono inseriti in un forno a temperatura 105 °C per 24 ore circa per ricavare la massa secca di ognuno e valutare il contenuto d'acqua e il grado di saturazione definitivi per ogni lettura.

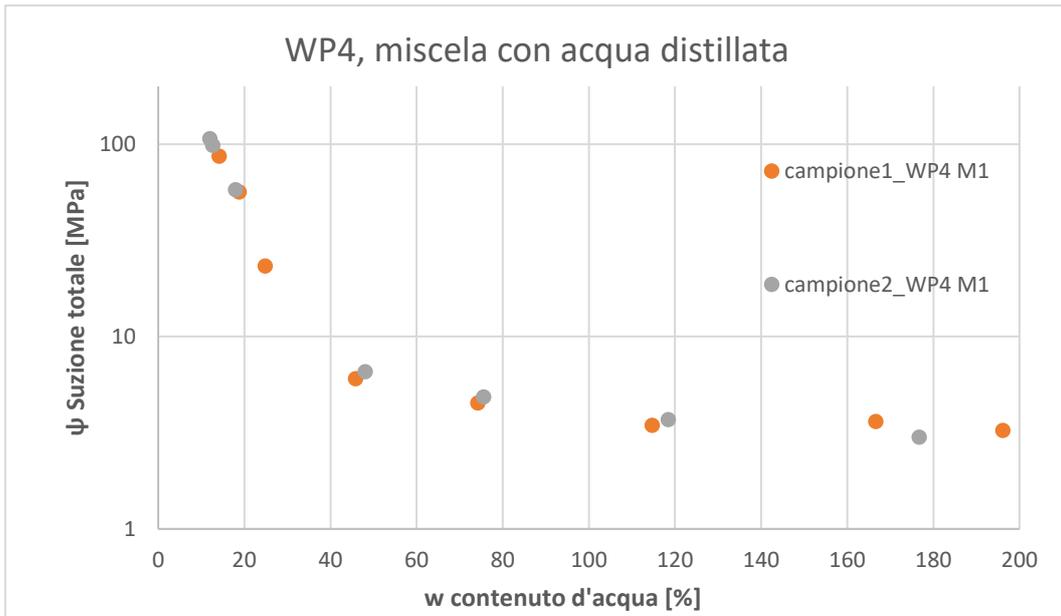


Figura 51 Dati ottenuti con WP4C per la miscela con acqua distillata

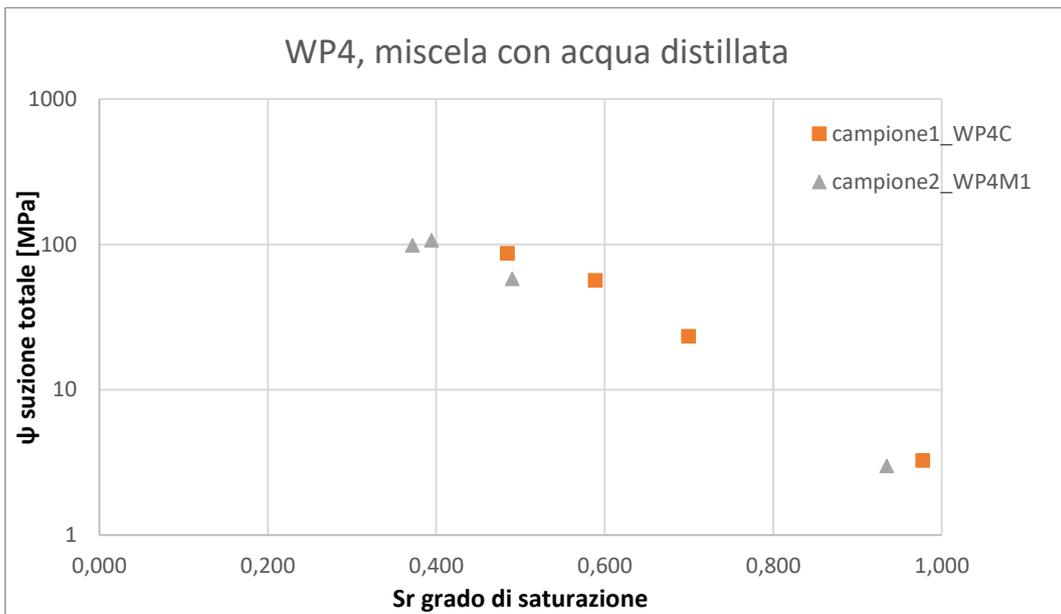


Figura 52 Dati ottenuti con WP4C per la miscela con acqua distillata

Per la miscela di bentonite con soluzione di NaCl (0,12 M) è adottato lo stesso procedimento.

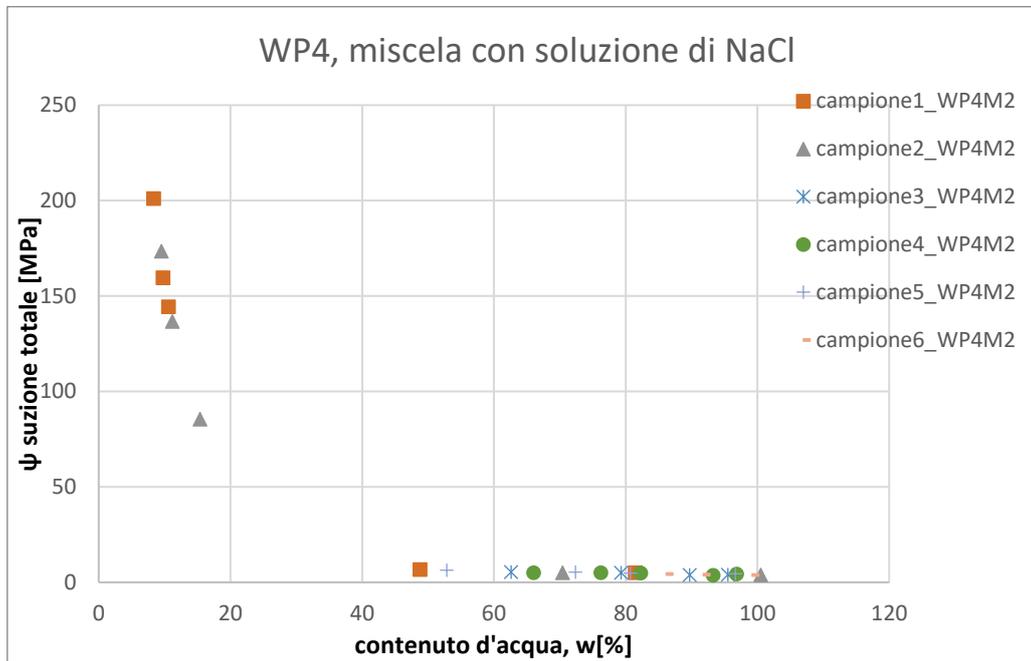


Figura 53 Dati ottenuti con WP4C per la miscela con soluzione di NaCl

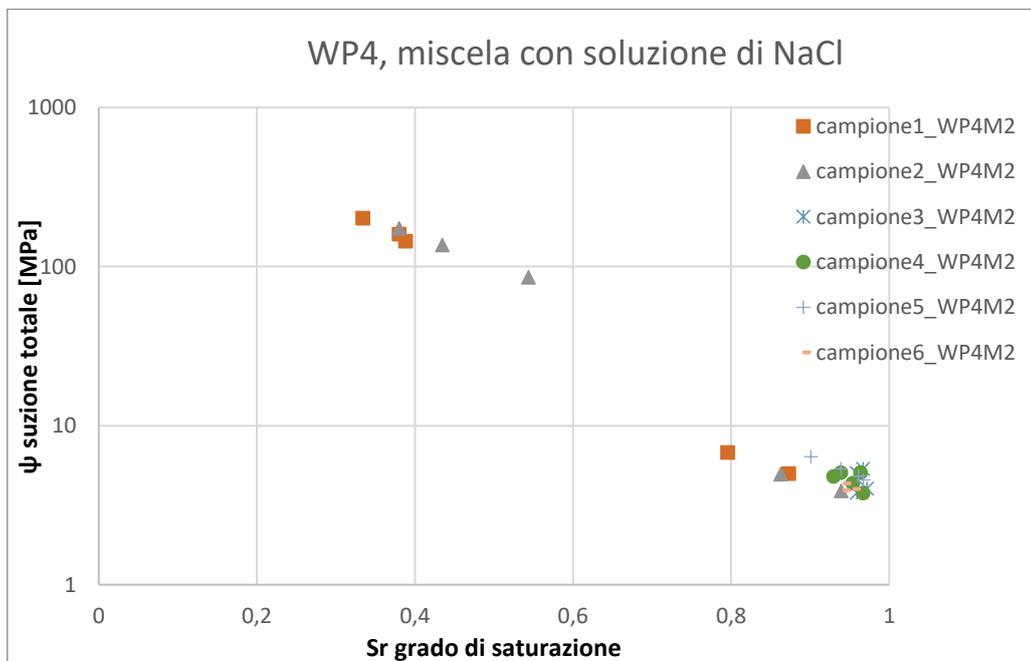


Figura 54 Dati ottenuti con WP4C per la miscela con soluzione di NaCl

Inoltre, si riportano i grafici di ritenzione idraulica riferiti alle misurazioni con il WP4C in funzione della suzione matriciale s .

Considerando una suzione osmotica iniziale $\pi_{iniziale}$, possiamo determinare le suzioni osmotiche per ogni step in funzione del contenuto d'acqua.

$$\pi_i = \frac{\pi_{iniziale} * W_{iniziale}}{W_i}$$

E quindi:

$$s_i = \psi_i - \pi_i$$

Per la miscela con acqua distillata $\pi_{iniziale} = 0,2496$ Mpa.

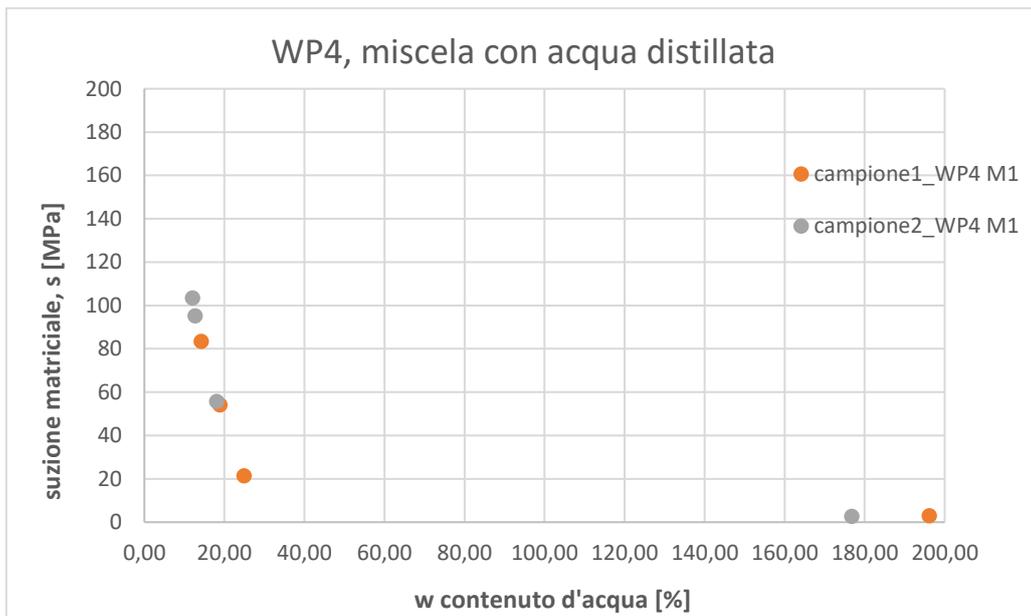


Figura 55 Dati ottenuti con WP4C per la miscela con acqua distillata

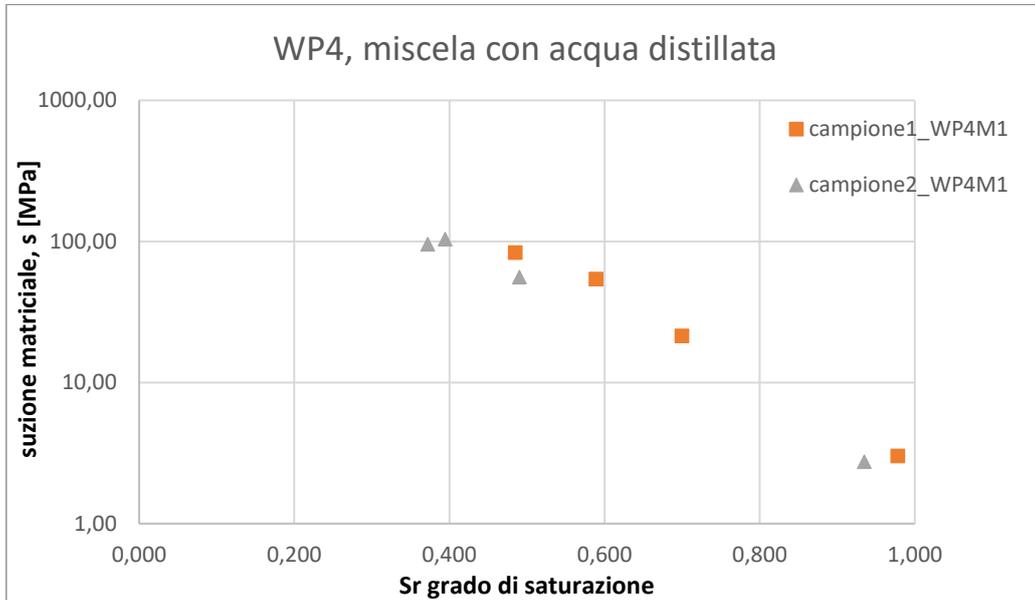


Figura 56 Dati ottenuti con WP4C per la miscela con acqua distillata

Per la miscela con soluzione di NaCl si considera $\pi_{iniziale} = 2,6963$ Mpa.

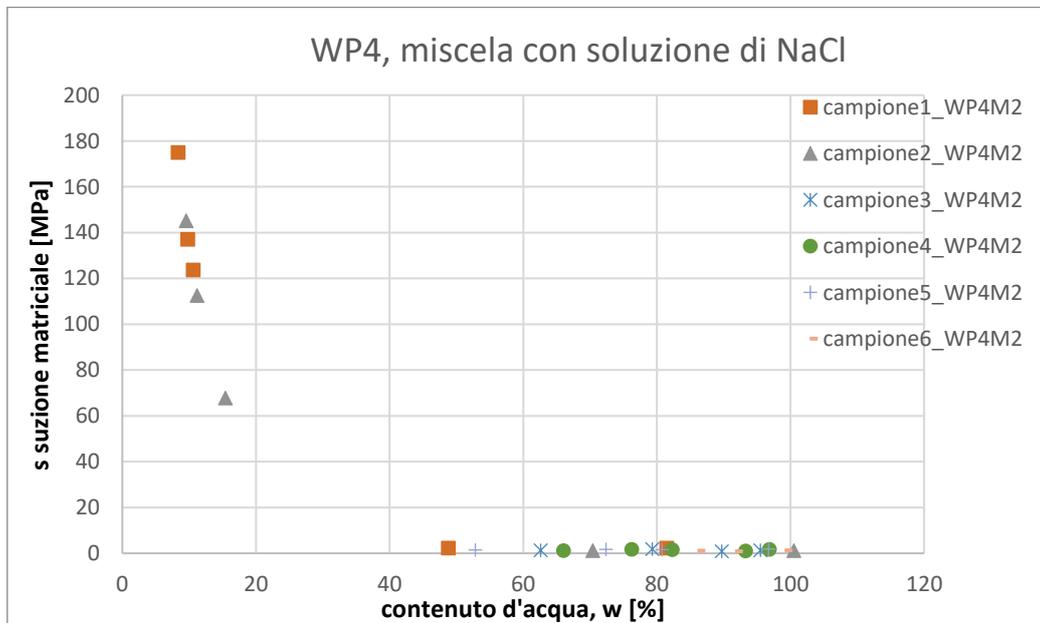


Figura 57 Dati ottenuti con WP4C per la miscela con soluzione di NaCl

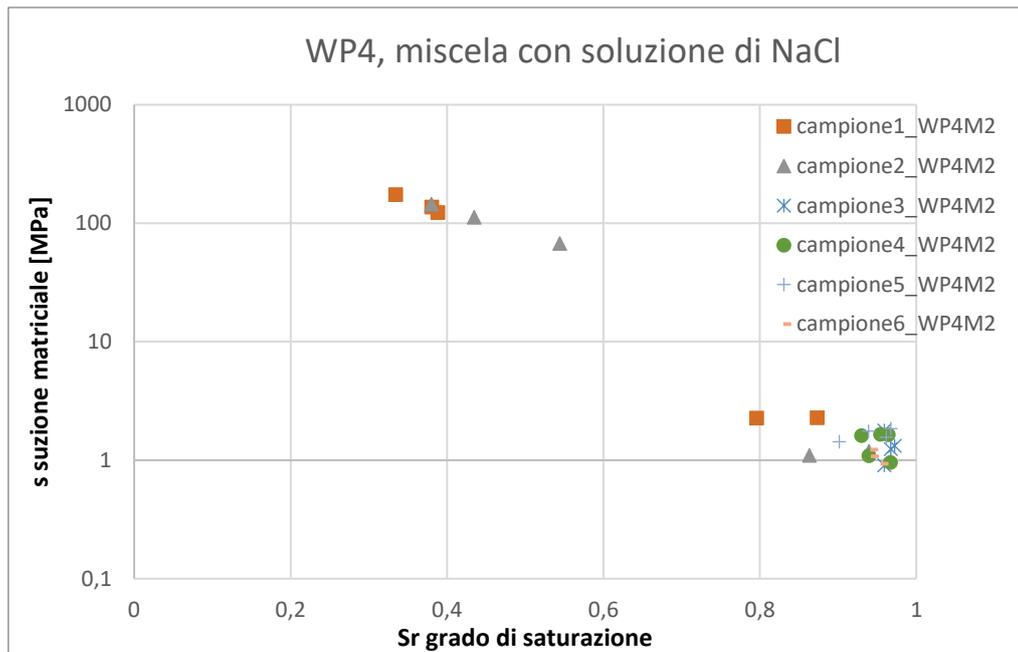


Figura 58 Dati ottenuti con WP4C per la miscela con soluzione di NaCl

5.4 Carta filtro

Per questa prova sono utilizzati direttamente due provini consolidati di diametro 50,45 mm, ottenuti da uno slurry della stessa miscela attraverso due prove edometriche eseguite contemporaneamente su due edometri differenti fino ad un carico di 196,1 kPa.

Una volta estratti dalle celle edometriche, viene misurata la massa iniziale dei due provini e misurati con il calibro altezza e diametro per stimare il volume totale iniziale.

Successivamente, vengono assemblati uno sopra l'altro e posti in un contenitore ermetico per creare un sistema chiuso e lasciati equilibrare per una ventina di giorni. In mezzo ai campioni sono introdotti tre dischi di carta da filtro Scheicher & Schuell No. 589 allo stato secco.

I due dischi a contatto con i campioni, di diametro di circa 50 mm, servono a proteggere il disco centrale con diametro leggermente inferiore, circa 48 mm, da impurezze o residui di bentonite poiché, una volta raggiunto l'equilibrio nel recipiente chiuso, la massa umida di esso è utile per la valutazione della suzione matriciale. Quindi è importante l'integrità e la pulizia del disco centrale per non alterare la misura della sua massa umida e il suo contenuto d'acqua.



Figura 59 Due campioni di bentonite sodica



Figura 60 Due campioni assemblati per tecnica carta filtro

Nel contenitore, oltre ai campioni assemblati con 3 dischi di carta filtro, viene introdotto un quarto disco allo stato secco al di sopra dei campioni senza avere contatto con essi. Il quarto disco, lontano dall'assemblaggio ma appartenente allo stesso sistema chiuso, è in grado di assorbire l'umidità relativa interna. Anch' esso viene pesato alla fine della prova per ricavare il suo contenuto d'acqua all'equilibrio utile per valutare il valore di suzione totale corrente.

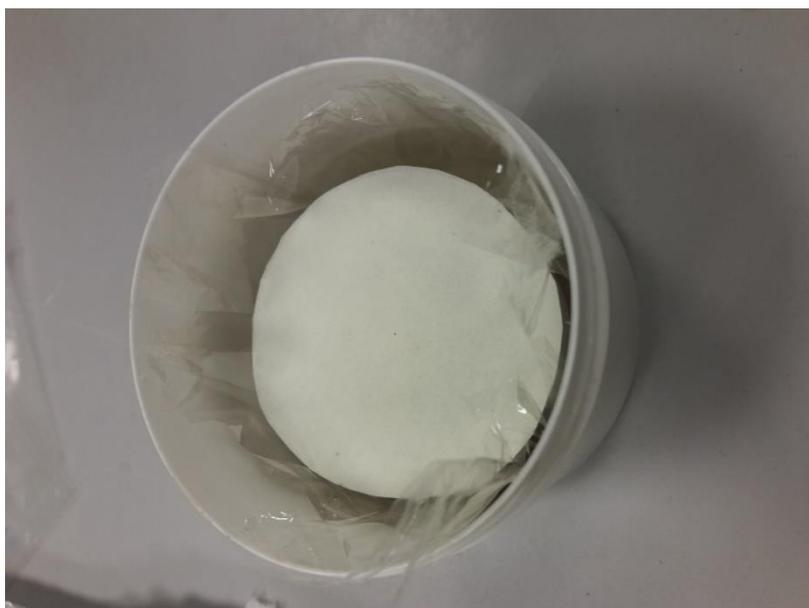


Figura 61 Contenitore con tecnica della carta filtro prima della chiusura

La valutazione delle suzioni totale e matriciale è eseguita con una legge matematica in funzione del contenuto d'acqua all'equilibrio delle carte filtro, rispettivamente, esterna e interna all'assemblaggio.

In alcuni studi, è stata ricavata una legge attraverso interpolazione di dati di calibrazione della carta filtro, ossia valutando il contenuto d'acqua all'equilibrio di carte filtro introdotte in dei contenitori ermetici con suzione imposta.

In questo caso studio, per ricavare suzione totale e matriciale è adottata la relazione riportata nell'articolo "*Preliminary investigation on the water retention behaviour of cement bentonite mixtures*, (Musso et al.,2019)":

$$\psi [kPa] = 145150 * e^{(-0.185w_f)}$$

Alla fine di ogni prova corrente, oltre al peso delle carte, vengono pesati i due campioni e vengono misurati diametro e altezza per valutare contenuto d'acqua e grado di saturazione attuali dei campioni.

Per la ripetizione della prova, i campioni vengono lasciati esposti a temperatura ambiente per far diminuire il loro contenuto d'acqua ed inoltre, vengono preparati nuovi dischi allo stato secco da introdurre nuovamente nel contenitore.

Una volta terminata la ripetizione delle prove definitivamente, i campioni vengono introdotti nel forno a 105°C per ricavare il loro peso secco.

Analogamente alle due tecniche precedenti, i dati sono espressi in funzione di contenuto d'acqua e grado di saturazione valutati con le formulazioni sopracitate nel paragrafo dell'equilibrio di vapore. Per questa tecnica, data la presenza di due provini assemblati, si considerano le medie dei valori dei due provini.

Si riportano i grafici con i dati relativi a questa prova di tutte le miscele adottate.

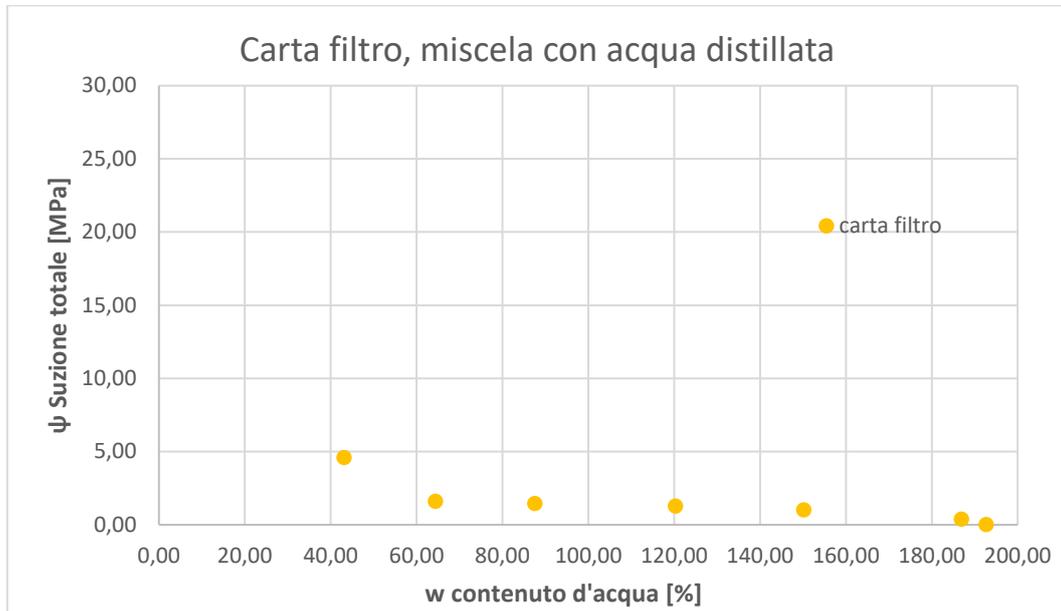


Figura 62 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con acqua distillata

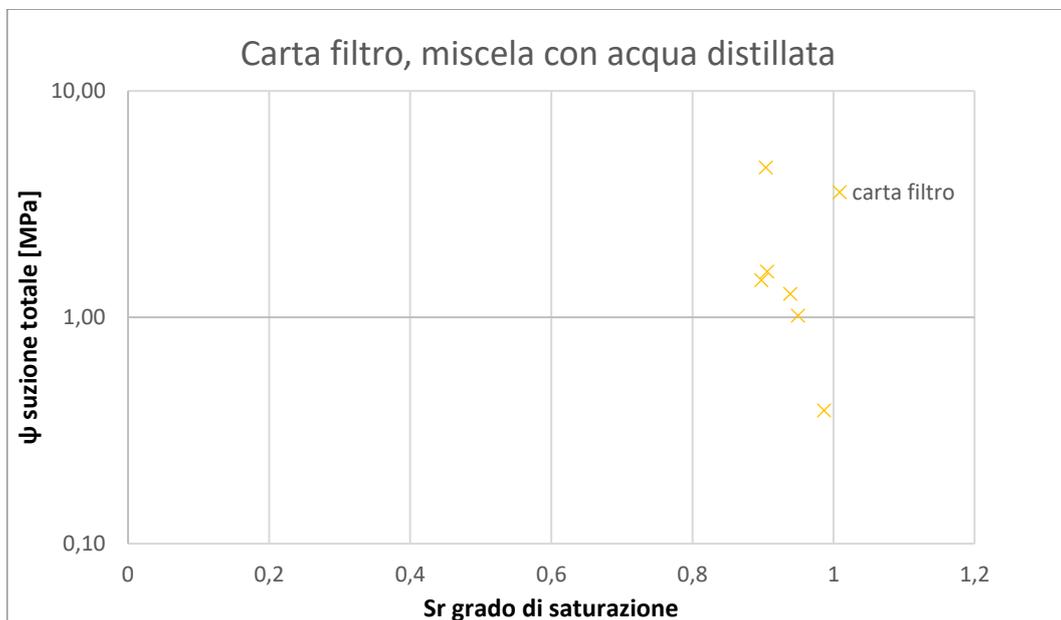


Figura 63 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con acqua distillata

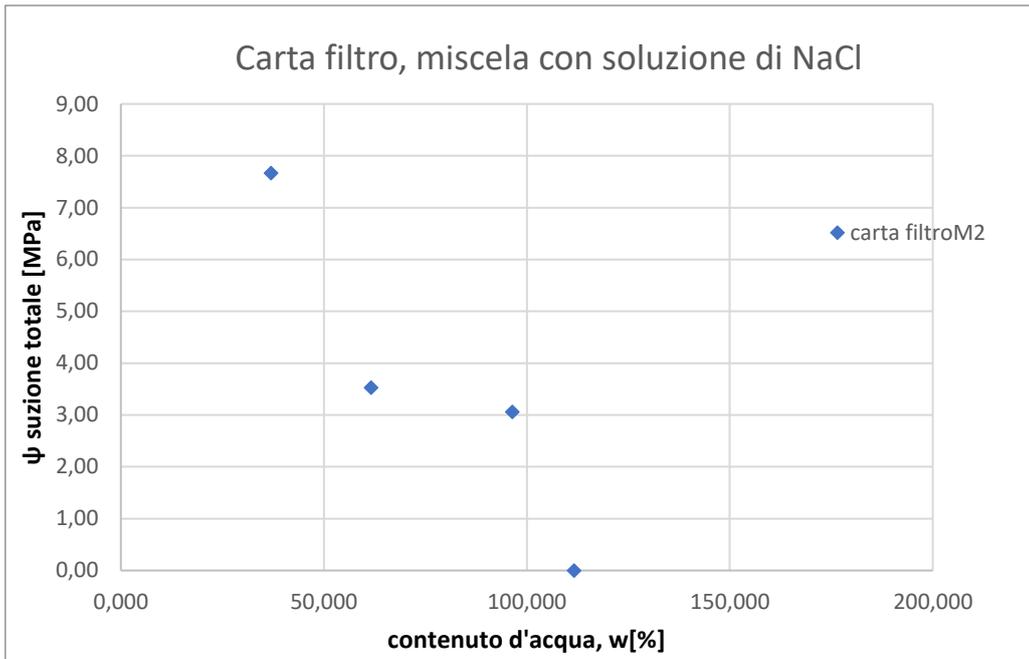


Figura 64 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con soluzione di NaCl

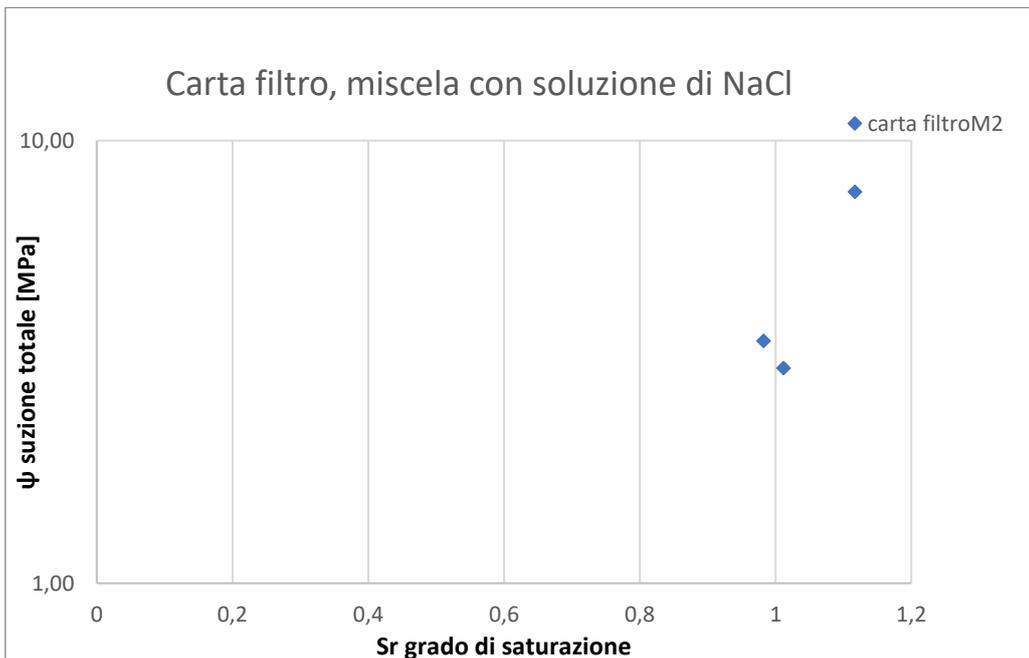


Figura 65 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con soluzione di NaCl

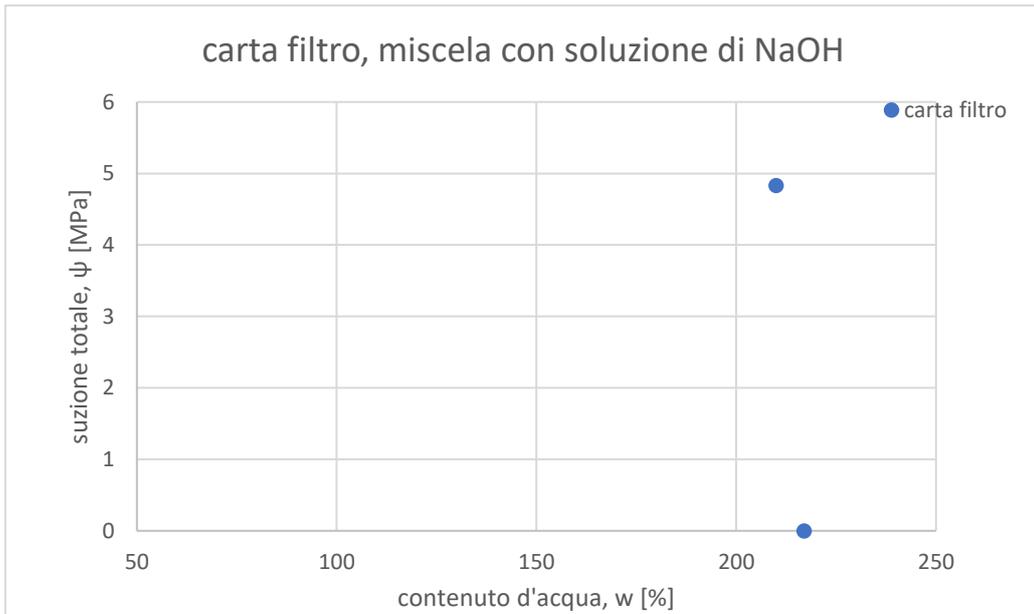


Figura 66 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con soluzione di NaOH

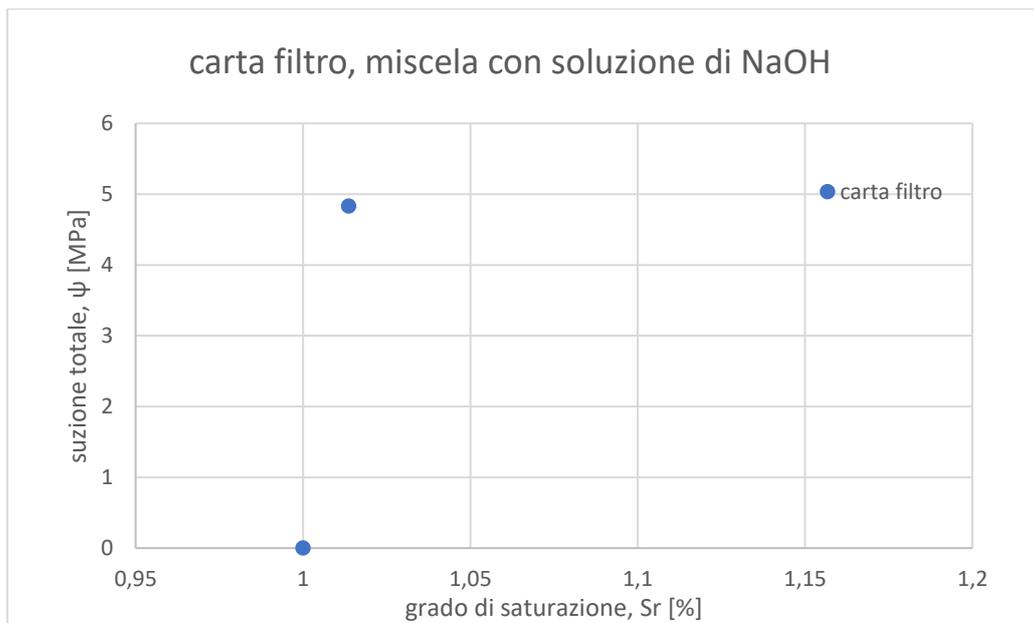


Figura 67 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con soluzione di NaOH

Come per la tecnica del WP4C, si riportano i grafici relativi alla suzione matriciale s di tutte le miscele.

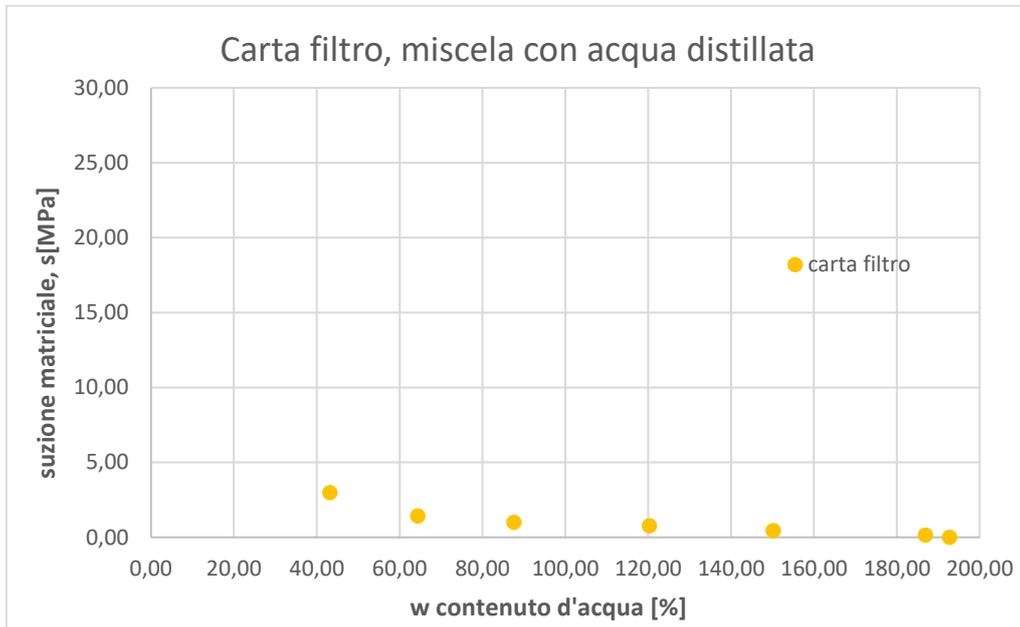


Figura 68 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con acqua distillata

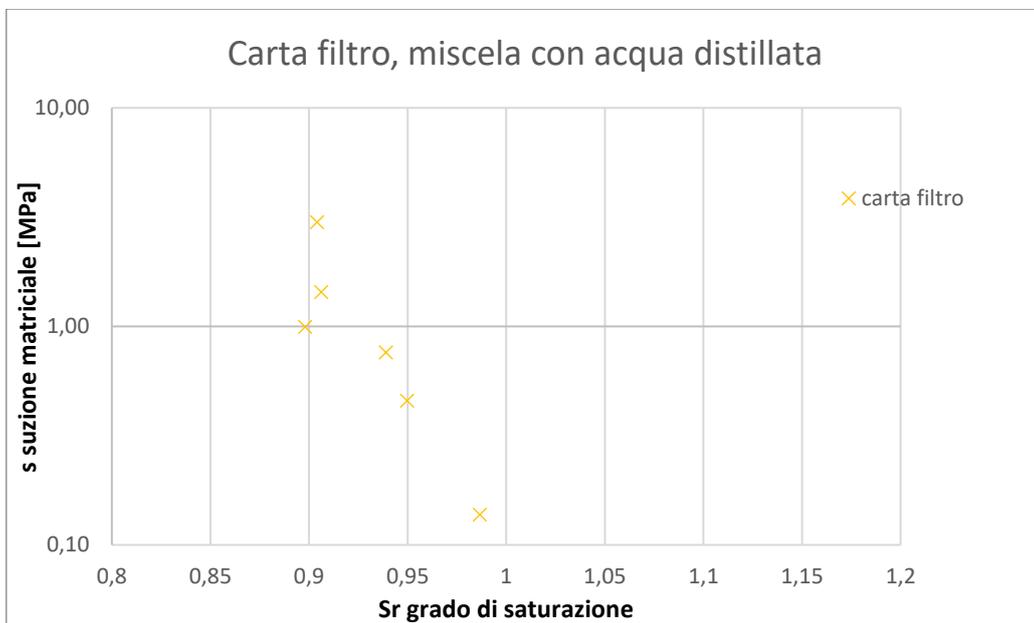


Figura 69 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con acqua distillata

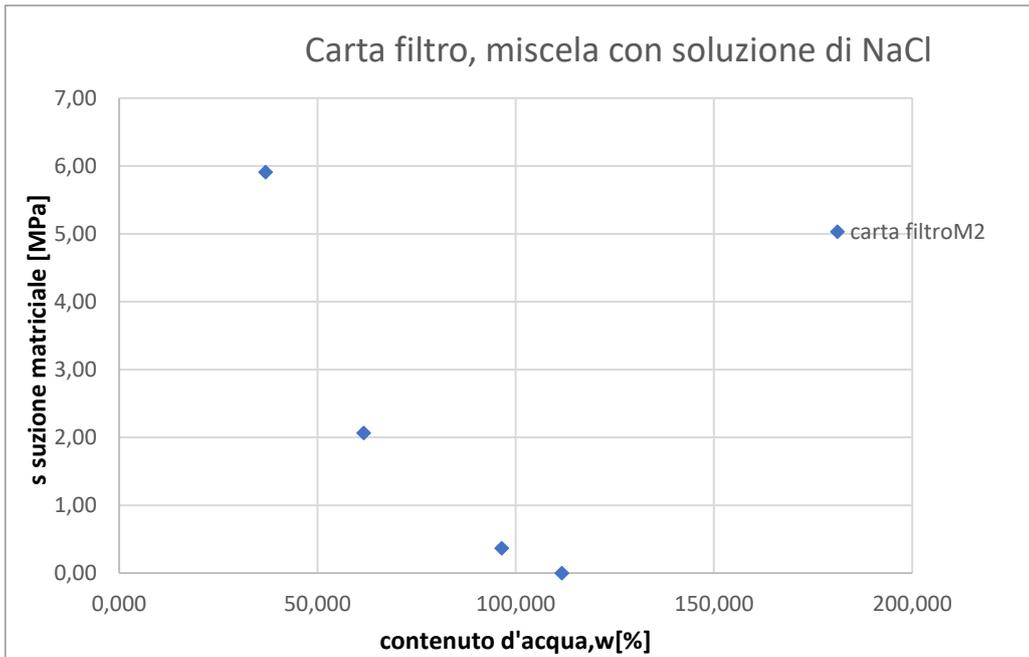


Figura 70 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con soluzione di NaCl

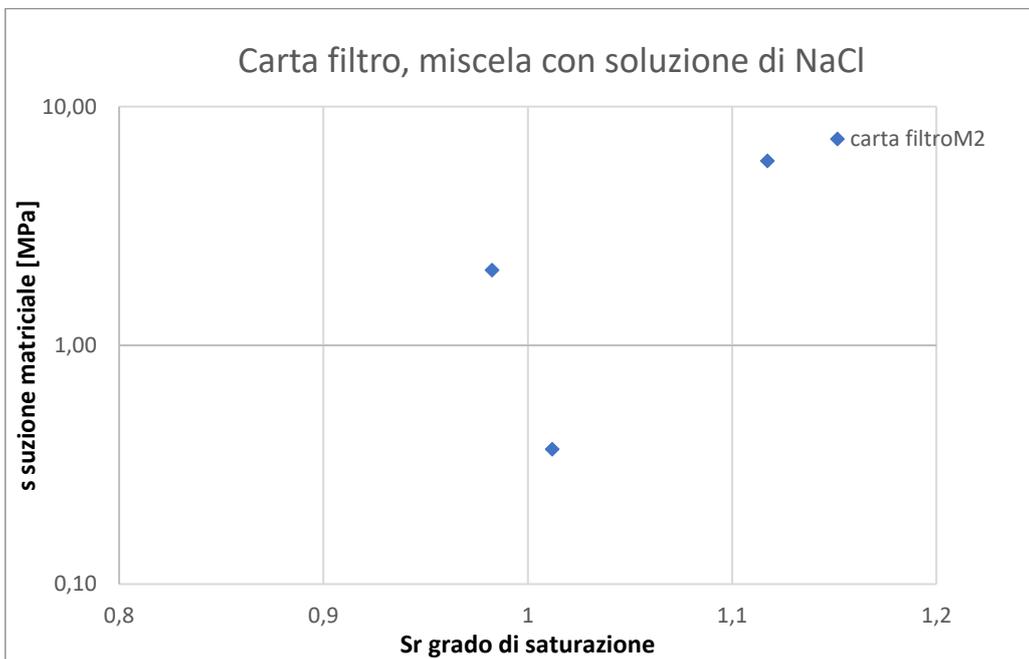


Figura 71 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con soluzione di NaCl

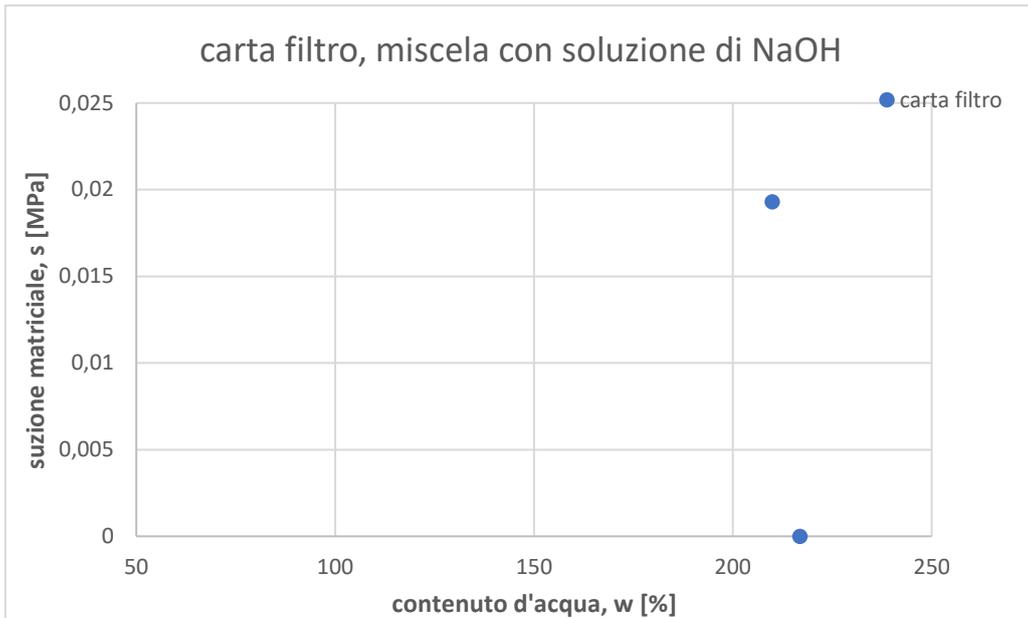


Figura 72 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con soluzione di NaOH

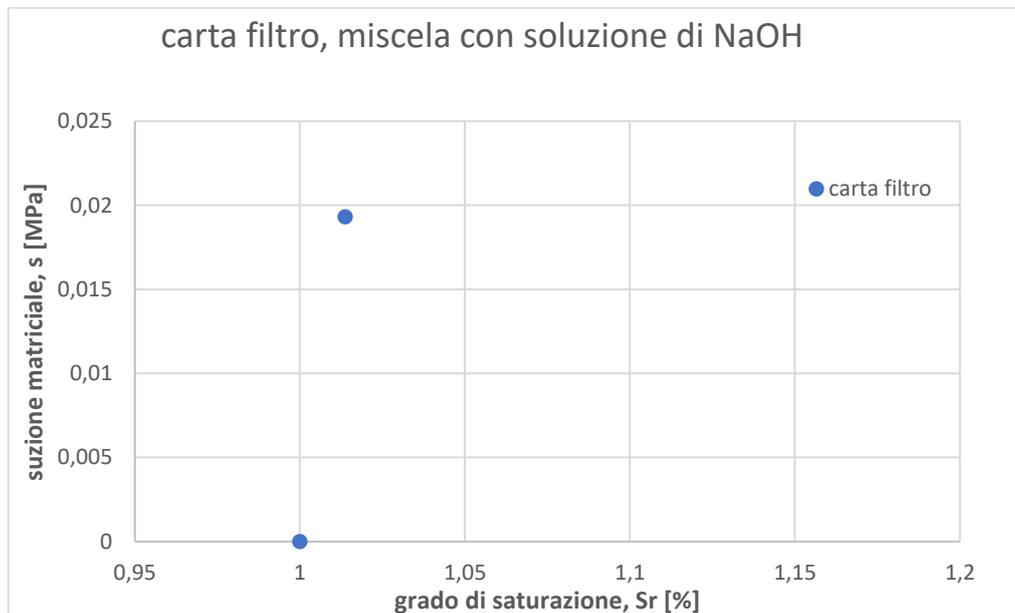


Figura 73 Dati ottenuti con tecnica carta filtro per la miscela con soluzione di NaOH

6 Interpretazione dei dati

Nel capitolo corrente, si effettuano delle valutazioni attraverso più comparazioni dei dati elaborati nelle prove o tecniche descritte precedentemente.

In primis, si interpretano gli andamenti delle curve di compressione delle prove edometriche effettuate per la consolidazione dei provini.

Successivamente, si osservano gli andamenti della ritenzione idraulica di tutte le miscele in termini di contenuto d'acqua e grado di saturazione comparando tutti i dati delle diverse tecniche effettuate. Inoltre, è effettuata una valutazione dell'indice dei vuoti in funzione della suzione matriciale comparando, anche in questo caso, tutti i dati utili delle varie tecniche.

6.1 Curve di compressione

Si riportano gli andamenti delle prove edometriche che rappresentano il decremento dell'indice dei vuoti in funzione dei carichi effettuati. I valori sono dedotti attraverso le formule descritte nel precedente capitolo, partendo dai cedimenti progressivi sviluppati e l'indice dei vuoti iniziale ricavato dal contenuto d'acqua dello slurry.

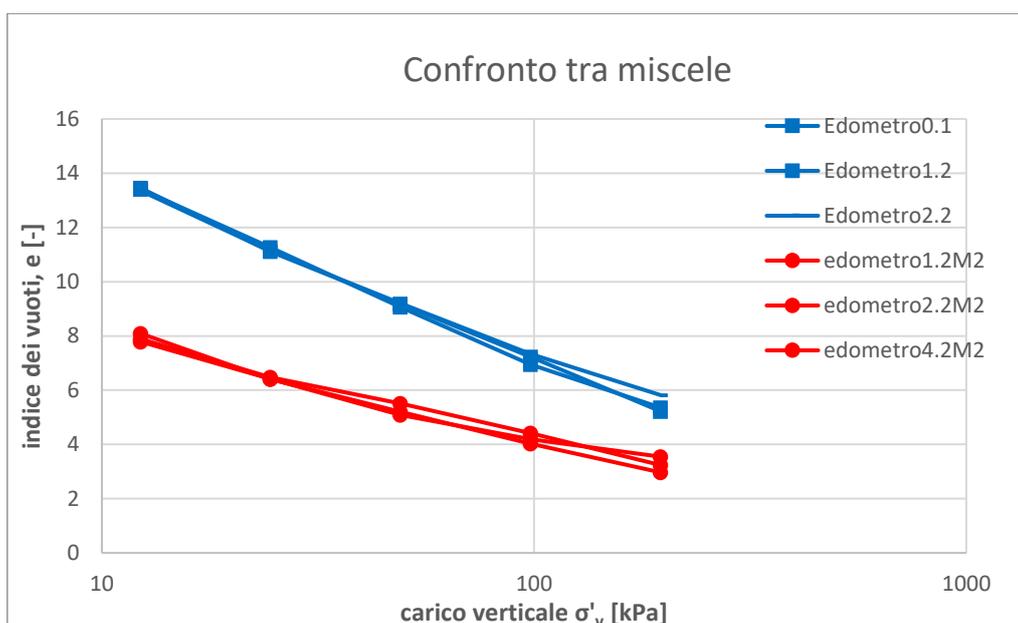


Figura 74 Confronto delle curve di compressione delle due miscele

Dalla figura 67 si può dedurre che l'andamento delle curve di compressione blu, relativo alla miscela di bentonite con acqua distillata, presenta valori di indice dei vuoti più alti rispetto all'andamento rosso, relativo alla miscela di bentonite con soluzione di NaCl.

Questo risultato fa pensare che la differenza di concentrazione salina tra le due miscele, può influenzare il mezzo poroso in termini di indice dei vuoti, ma non esclude la possibilità di imprecisioni nella valutazione dei valori, dovuta a letture errate dei cedimenti durante la prova edometrica.

6.2 Sviluppo dell'indice dei vuoti

È possibile valutare lo sviluppo dell'indice dei vuoti per ogni prova di ogni tecnica utilizzata per la ritenzione idraulica, attraverso le misure con il calibro di precisione, partendo da un volume totale $V_{T,0}$ e l'indice dei vuoti iniziale e_0 all'inizio della tecnica.

$$e_i = e_0 * (1 - \varepsilon_{v,i}) - \varepsilon_{v,i}$$

Di cui la deformazione volumetrica è valutata con il volume totale corrente diminuito nella fase di essiccamento:

$$\varepsilon_{v,i} = \frac{V_{T,0} - V_{T,i}}{V_{T,0}}$$

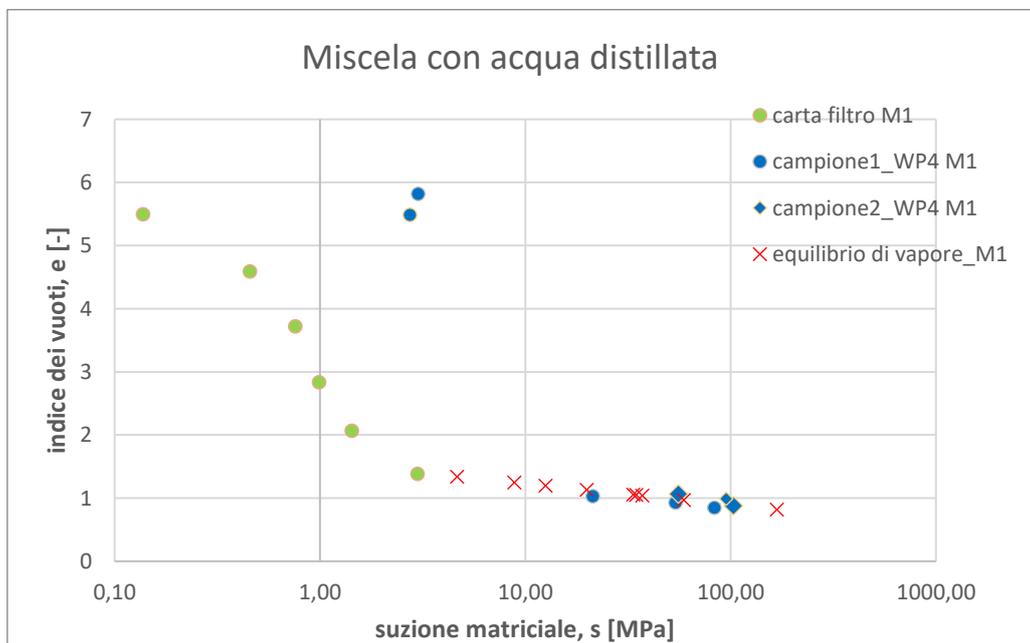


Figura 75 Andamento dell'indice dei vuoti durante le tecniche per la miscela con acqua distillata

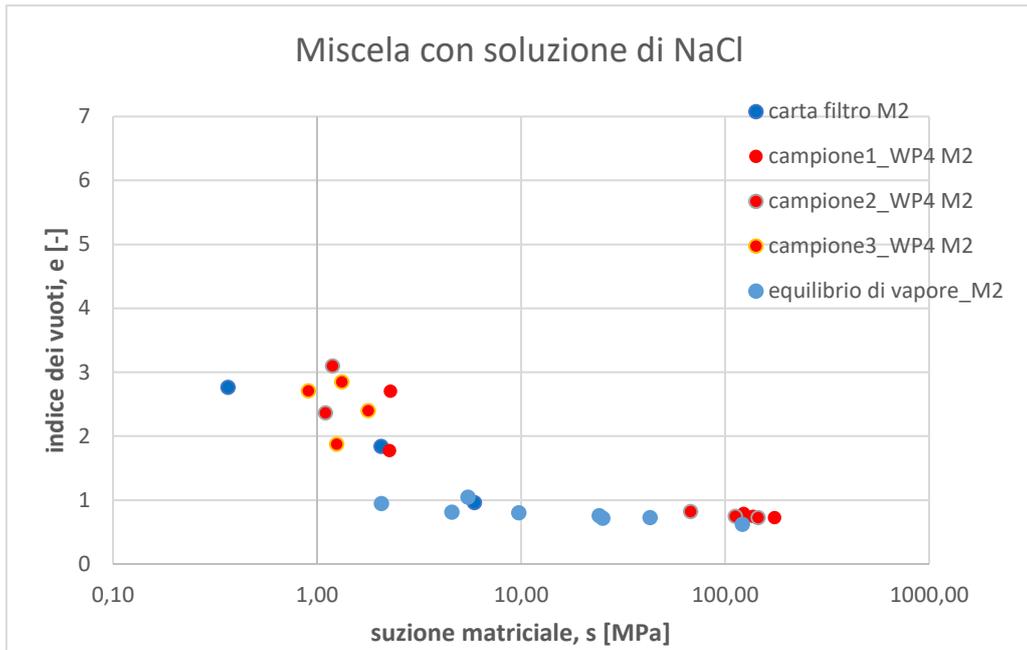


Figura 76 Andamento dell'indice dei vuoti durante le tecniche per la miscela con soluzione di NaCl

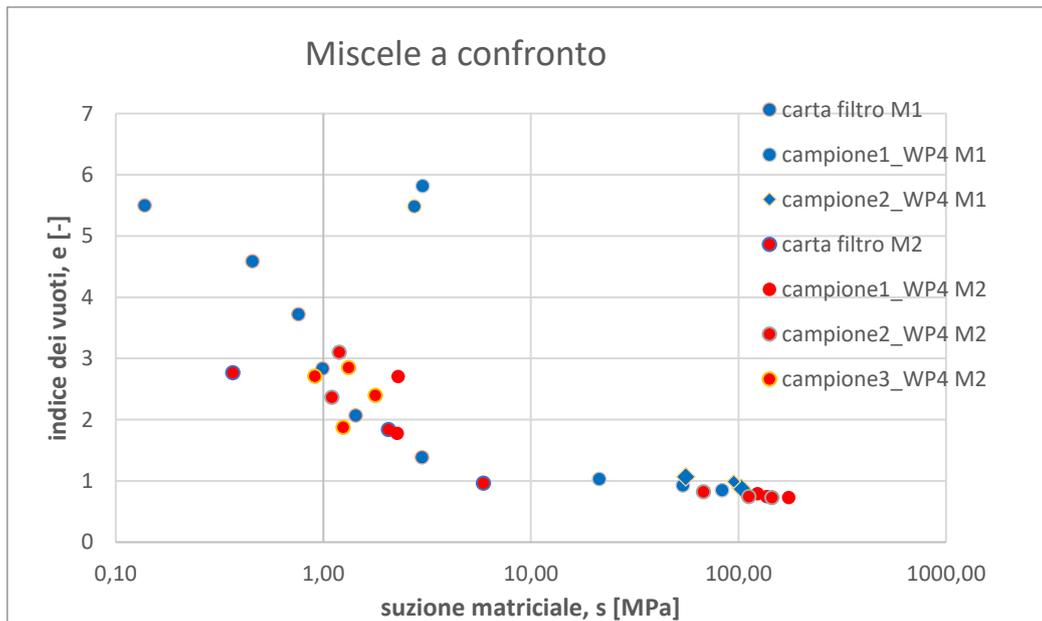


Figura 77 Confronto degli andamenti dell'indice dei vuoti durante le tecniche

Si può notare dalla figura 76 che per valori bassi di suzione di matrice, le due miscele presentano un andamento dell'indice dei vuoti differente, mentre per valori alti di suzione gli andamenti coincidono.

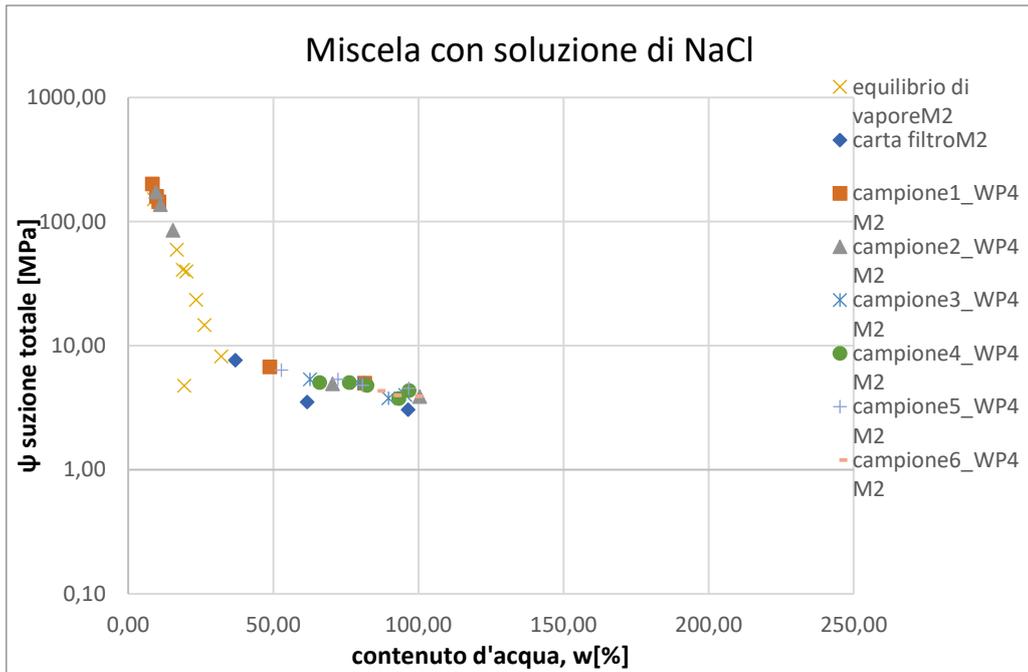


Figura 80 Ritenzione idraulica della miscela con soluzione di NaCl

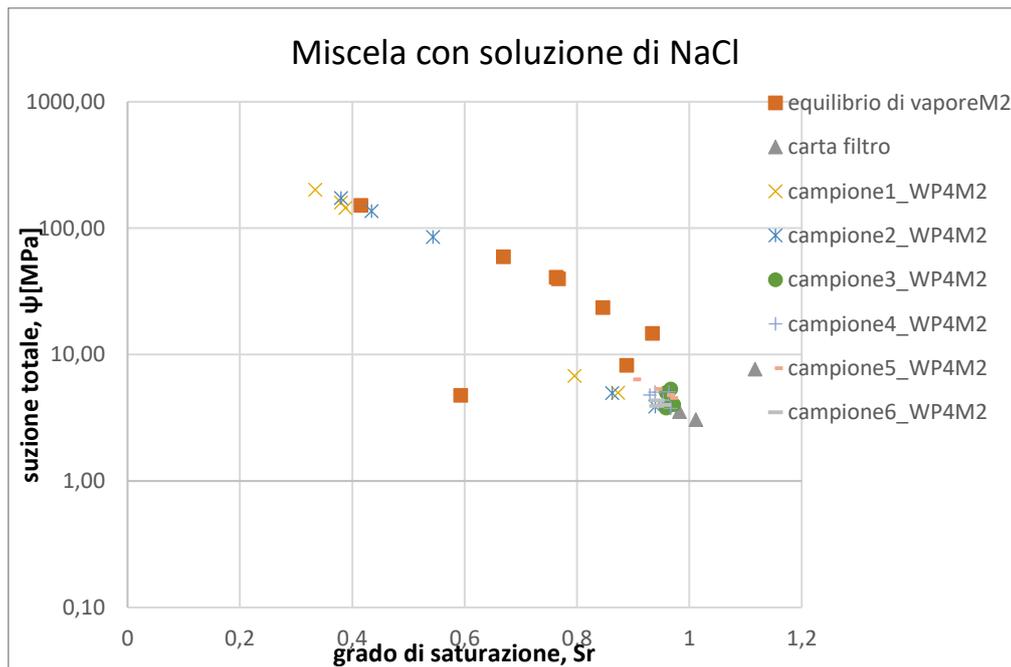


Figura 81 Ritenzione idraulica della miscela con soluzione di NaCl

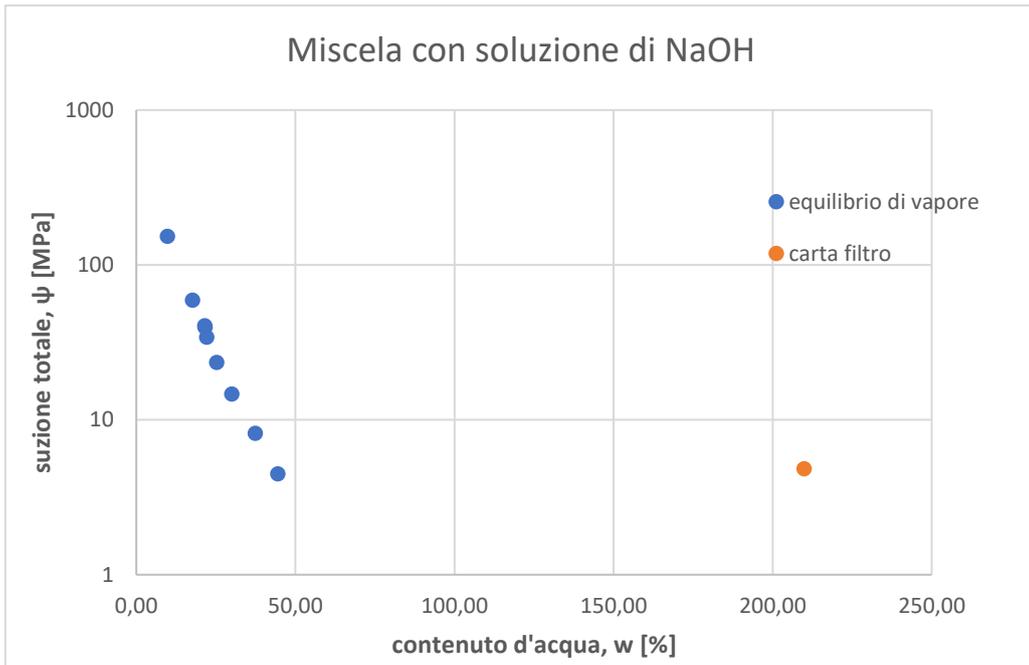


Figura 82 Ritenzione idraulica della miscela con soluzione di NaOH

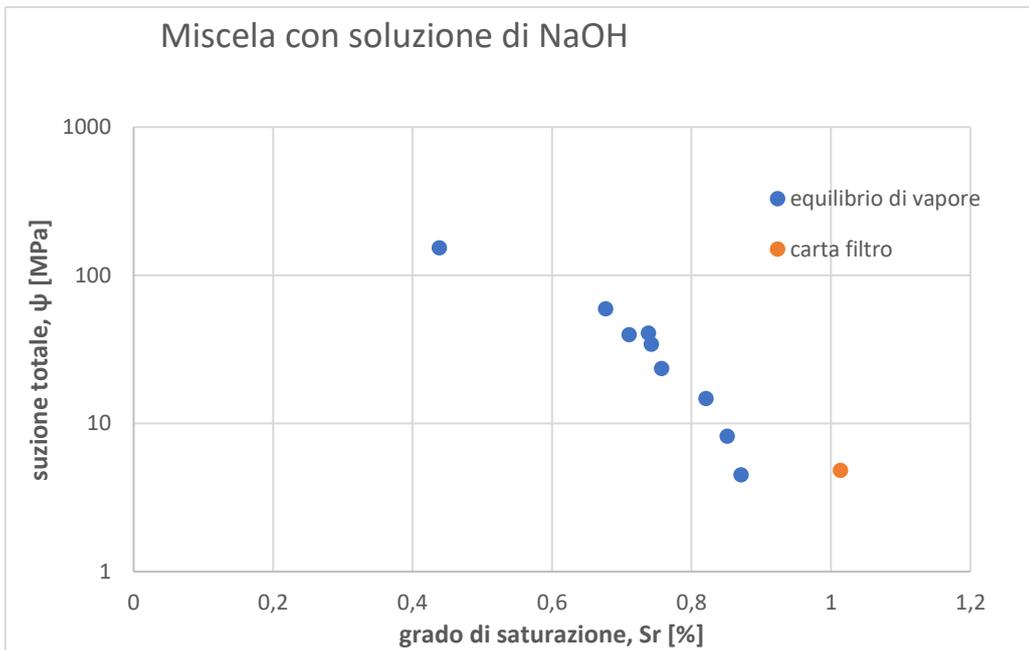


Figura 83 Ritenzione idraulica della miscela con soluzione di NaOH

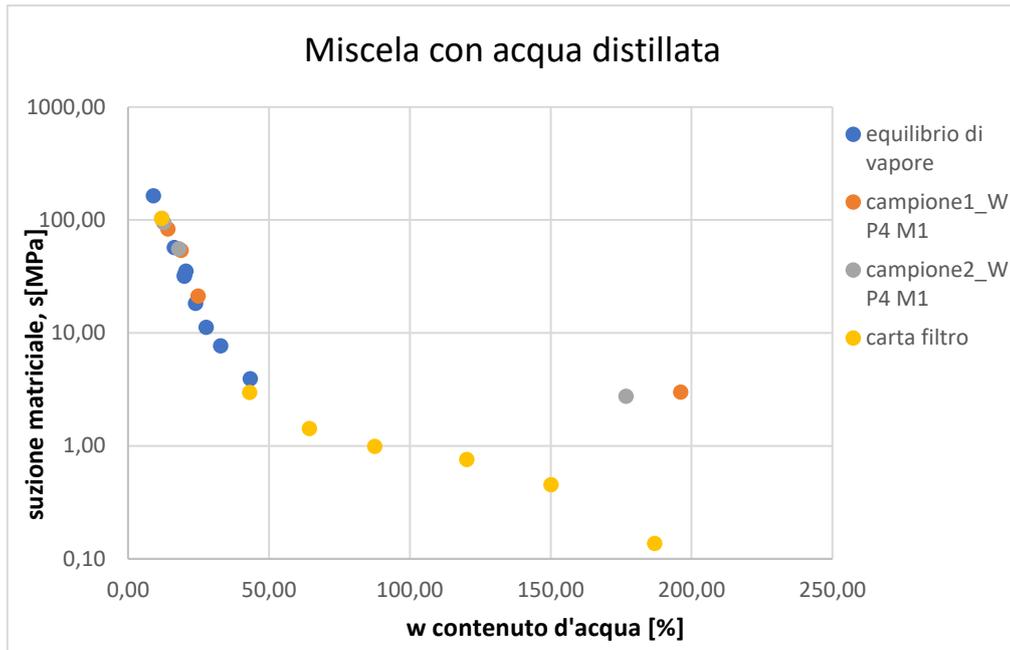


Figura 84 Ritenzione idraulica della miscela con acqua distillata

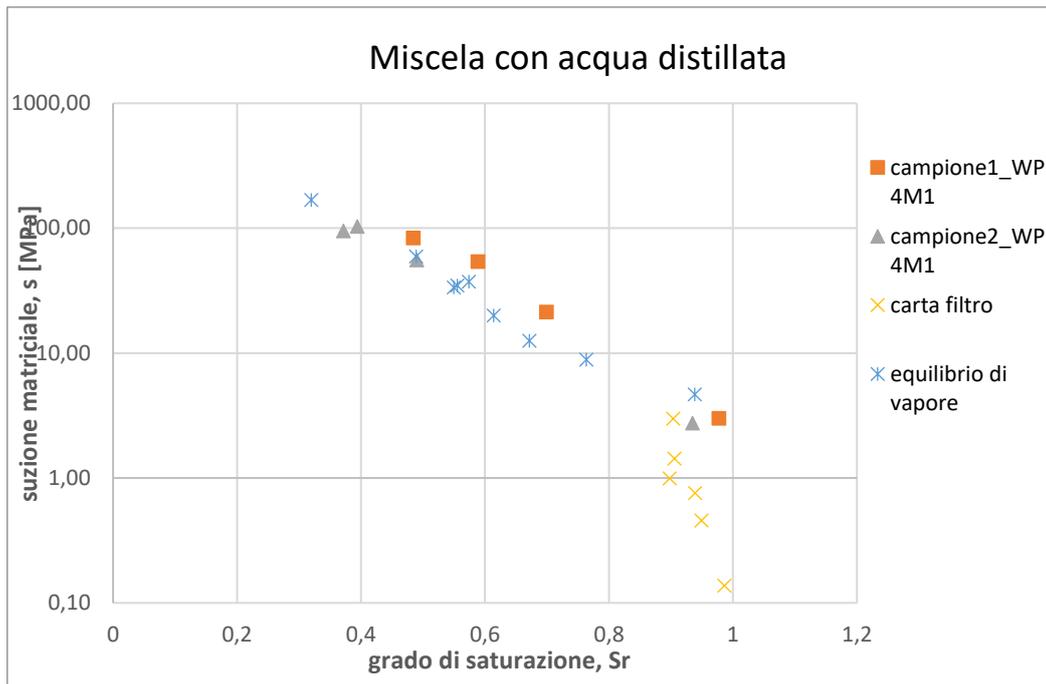


Figura 85 Ritenzione idraulica della miscela con acqua distillata

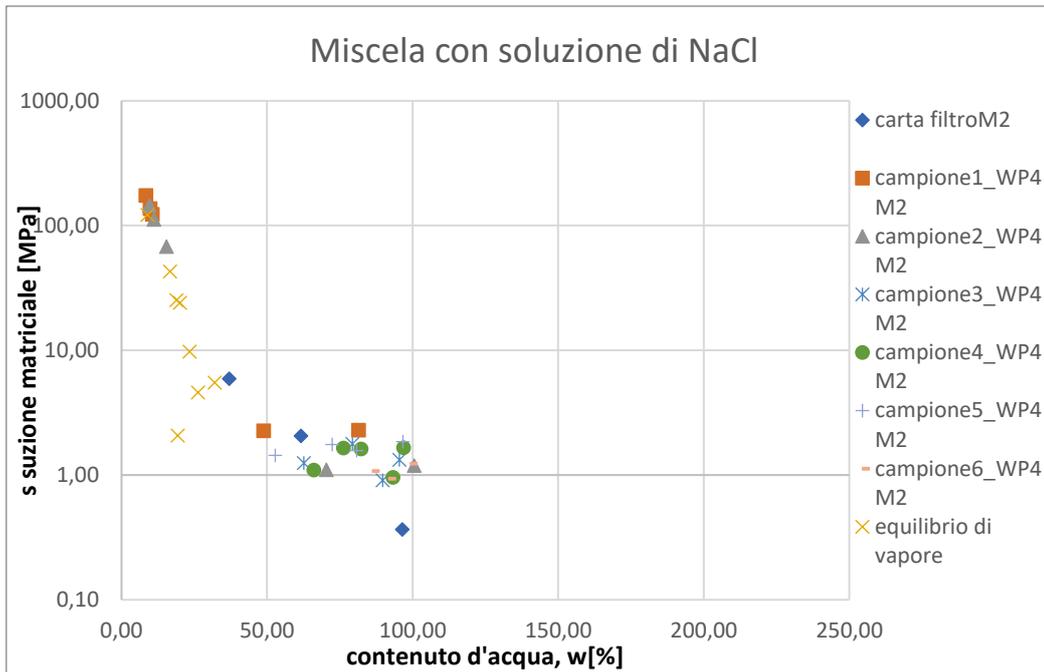


Figura 86 Ritenzione idraulica della miscela con soluzione di NaCl

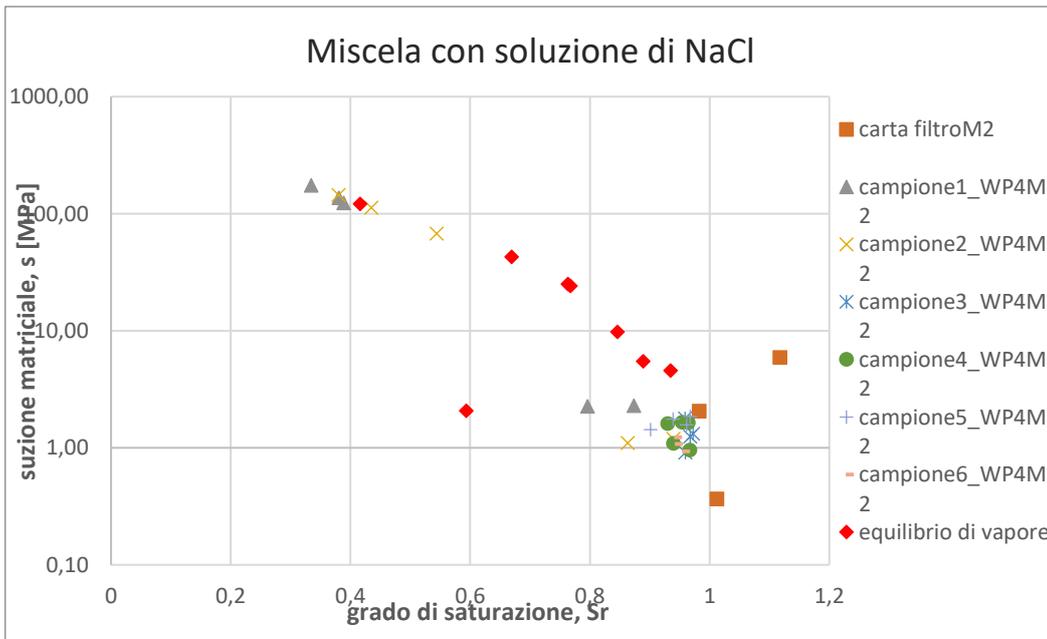


Figura 87 Ritenzione idraulica della miscela con soluzione di NaCl

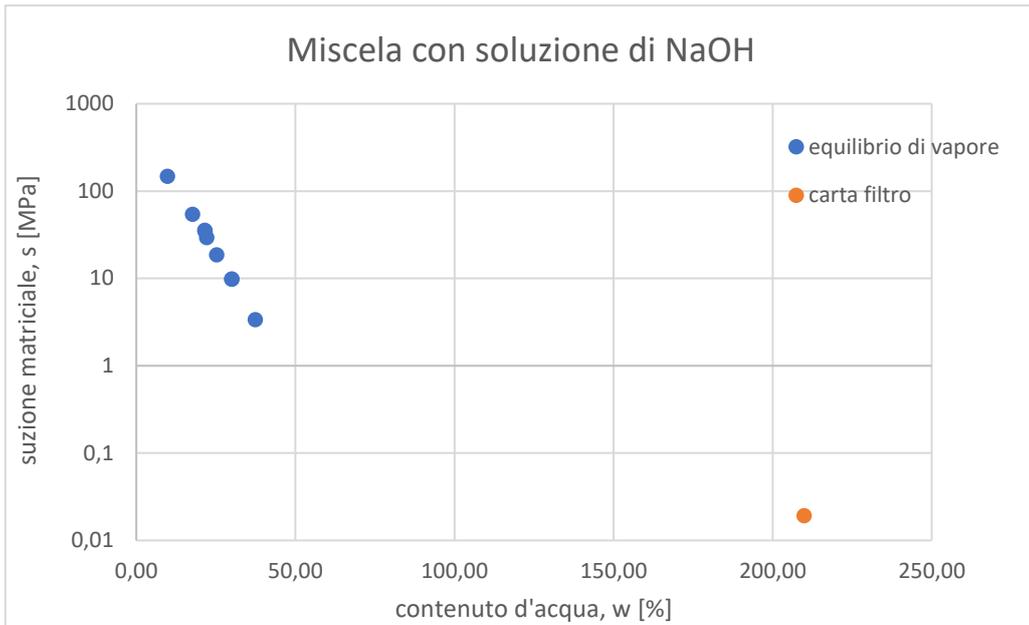


Figura 88 Ritenzione idraulica della miscela con soluzione di NaOH

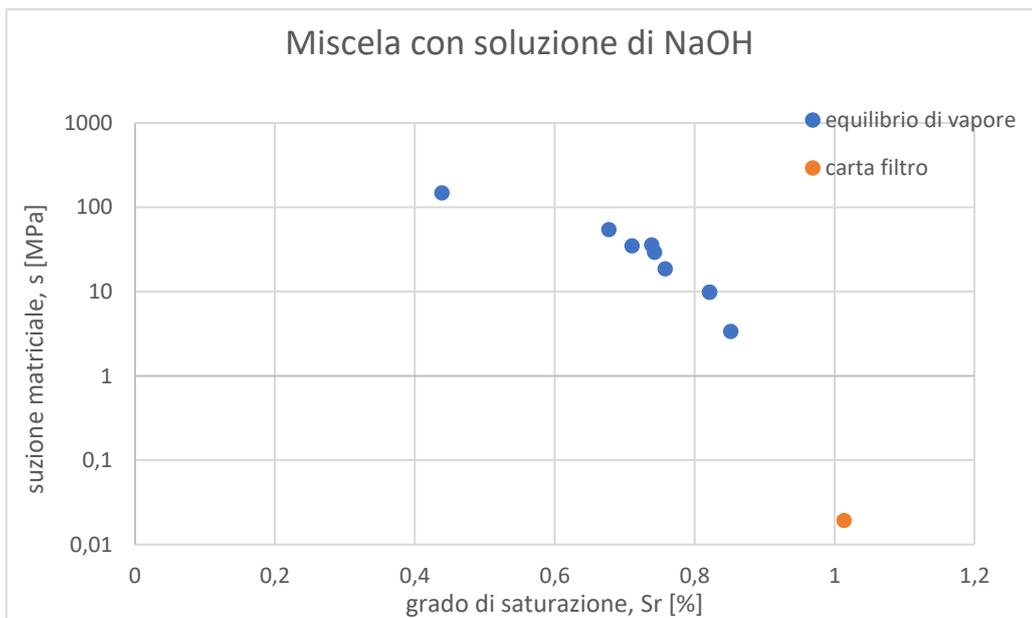


Figura 89 Ritenzione idraulica della miscela con soluzione di NaOH

Si riproducono le fitting curve dei grafici suzione matriciale (s) e contenuto d'acqua (w) di ogni miscela per effettuare successivamente confronti tra gli andamenti sviluppati.

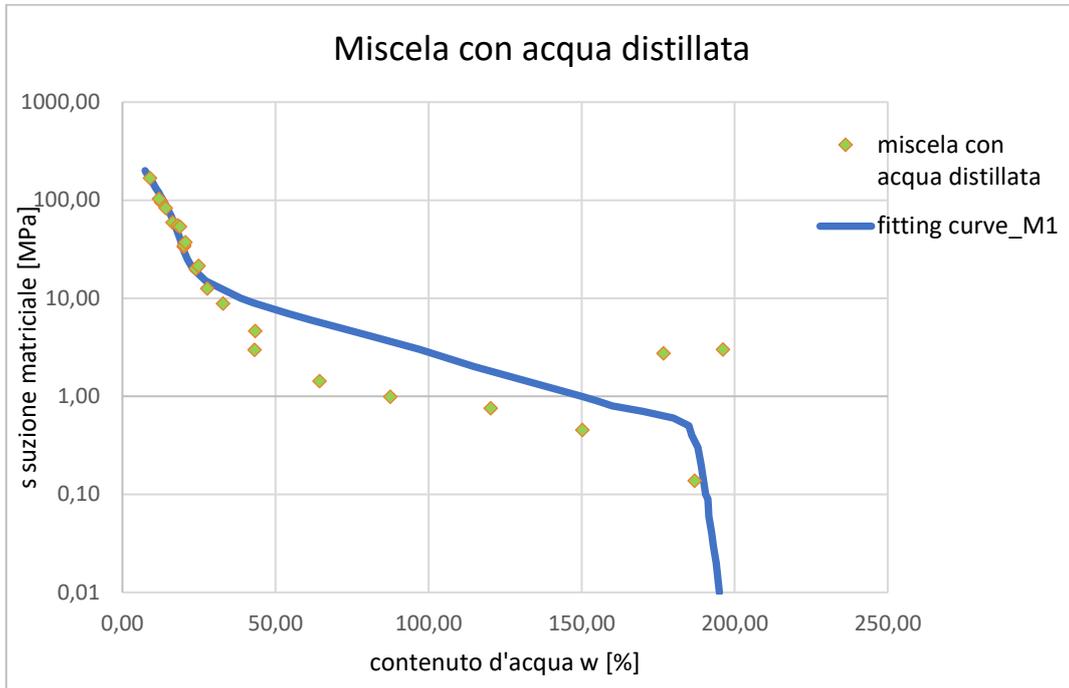


Figura 90 Fitting curve del grafico s-w per la miscela con acqua distillata

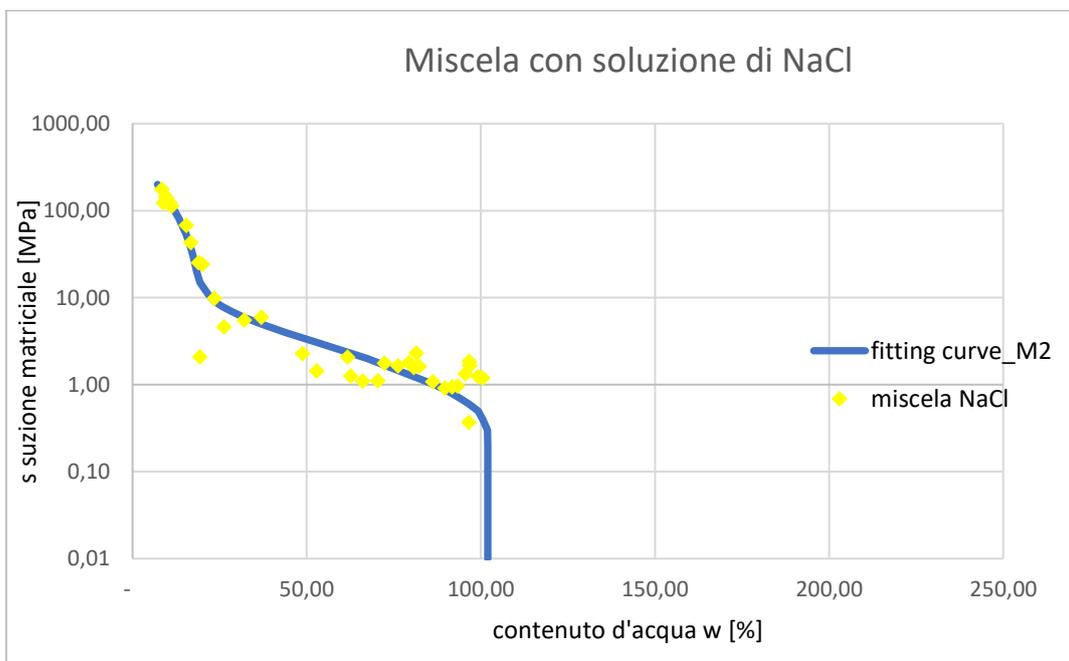


Figura 91 Fitting curve del grafico s-w per la miscela con soluzione di NaCl

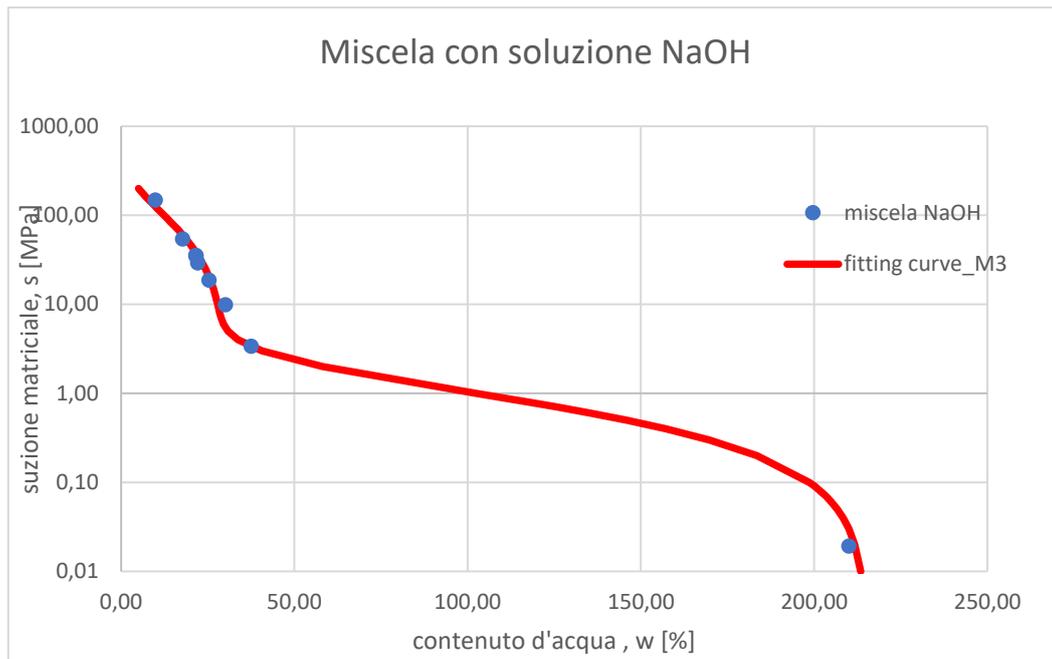


Figura 92 Fitting curve del grafico s-w per la miscela con soluzione di NaOH

Inoltre, sono prodotte le fitting curve degli andamenti sviluppati attraverso la curva di Van Genuchten per approssimare al meglio i risultati sperimentali.

Di seguito la formulazione adottata di Van Genuchten:

$$S_{\text{eff}} = \frac{S_r - S_r^{\text{irr}}}{1 - S_{\text{ar}} - S_r^{\text{irr}}} = \begin{cases} \left[\frac{1}{1 + (\alpha s)^n} \right]^m & \text{per } s \geq 0 \\ 1 & \text{per } s < 0 \end{cases}$$

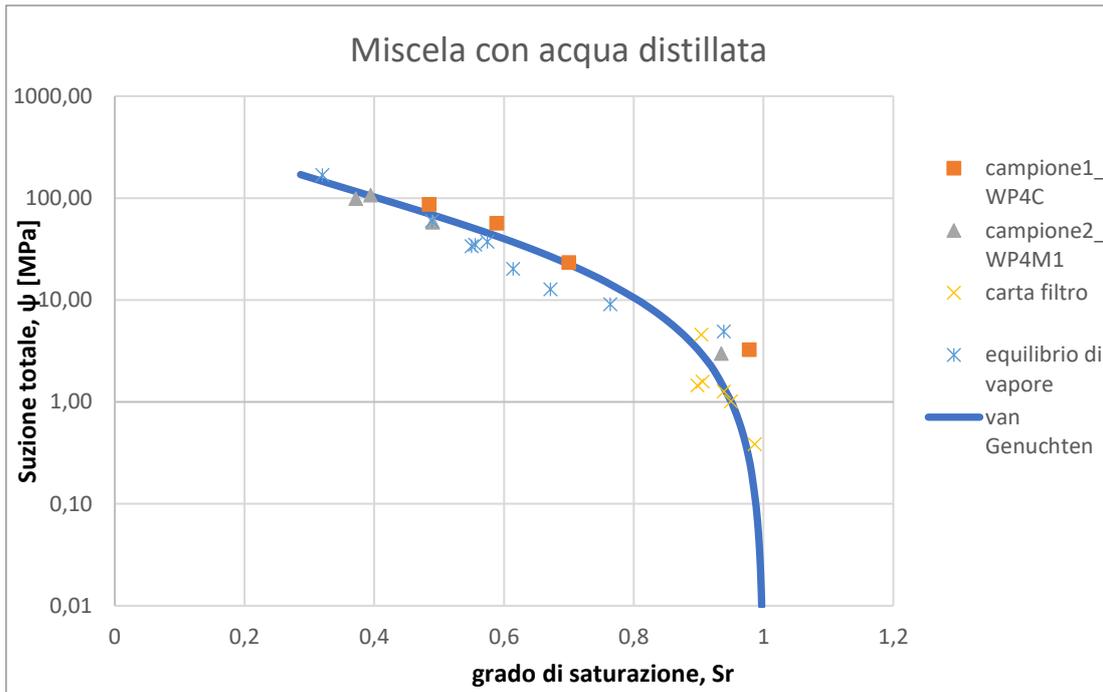


Figura 93 Fitting curve mediante van Genuchten della miscela con acqua distillata

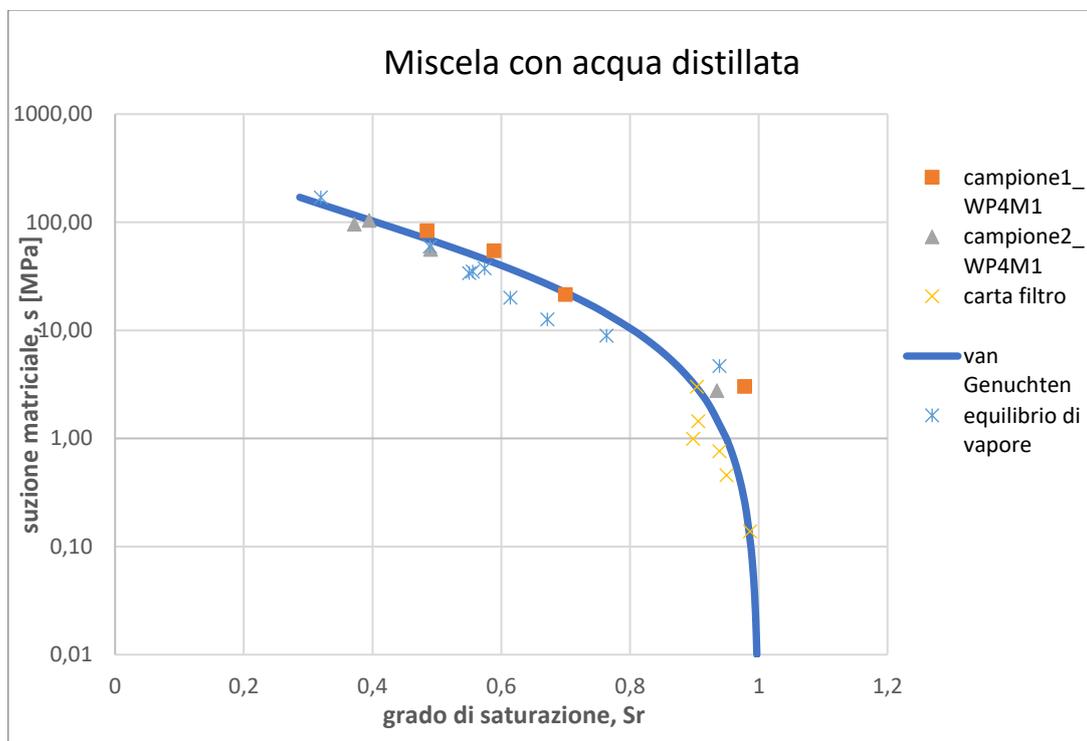


Figura 94 Fitting curve mediante van Genuchten della miscela con acqua distillata

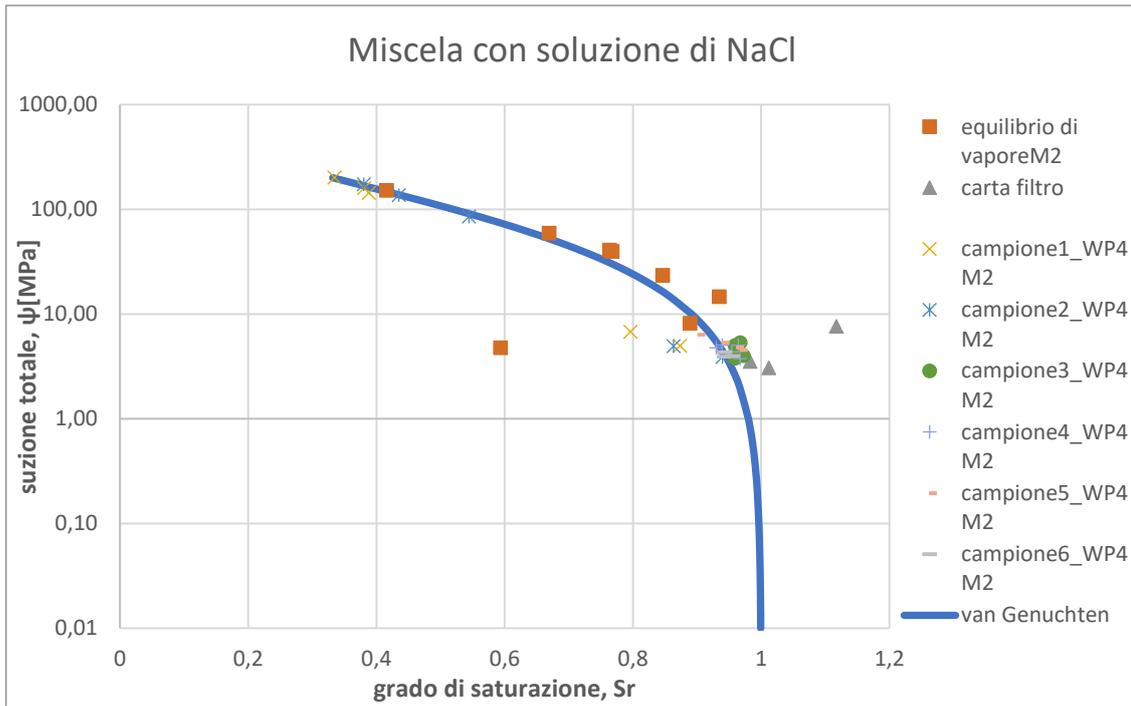


Figura 95 Fitting curve mediante van Genuchten della miscela con soluzione di NaCl

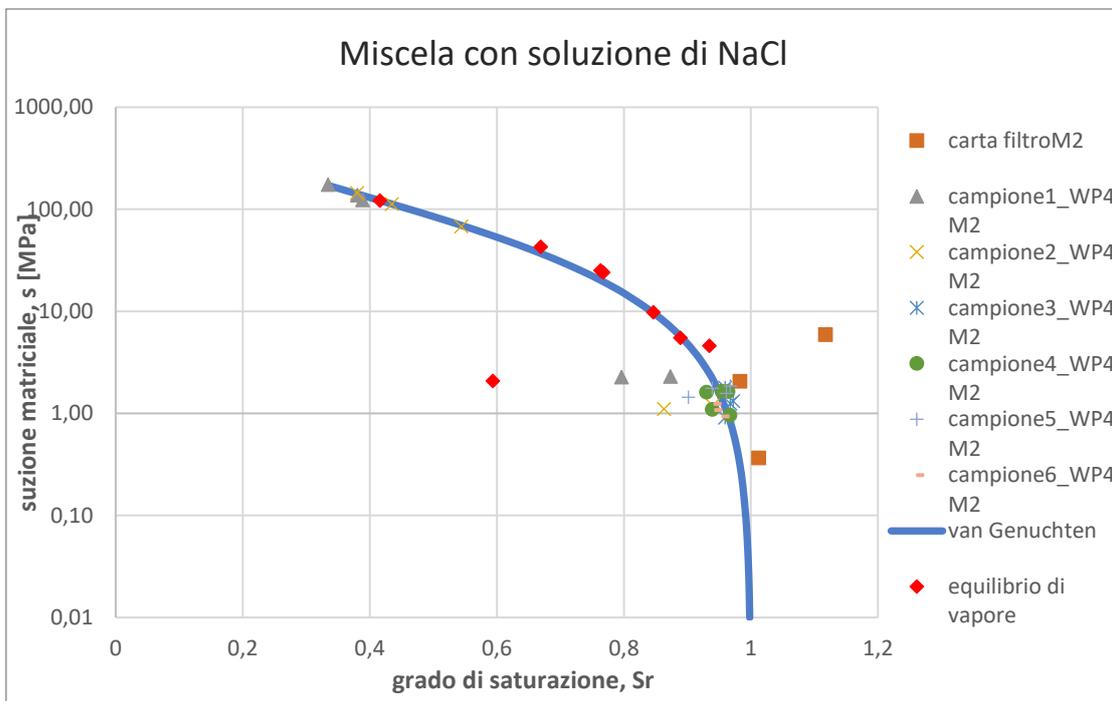


Figura 96 Fitting curve mediante van Genuchten della miscela con soluzione di NaCl

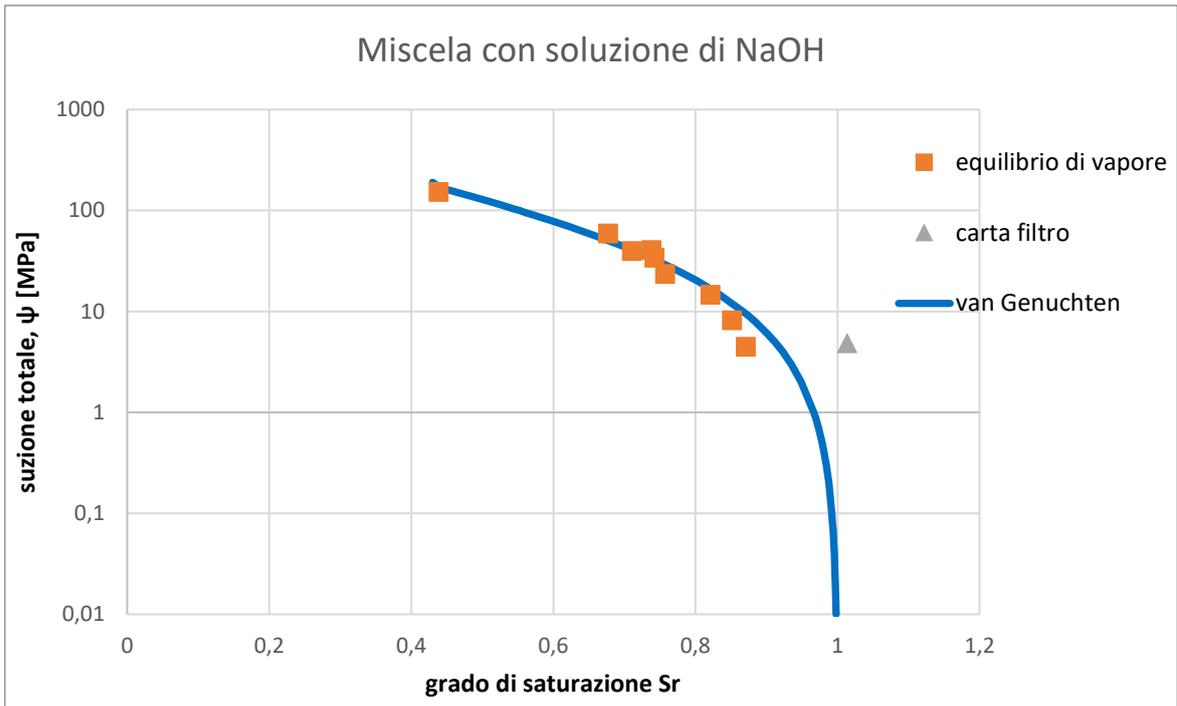


Figura 97 Fitting curve mediante van Genuchten della miscela con soluzione di NaOH

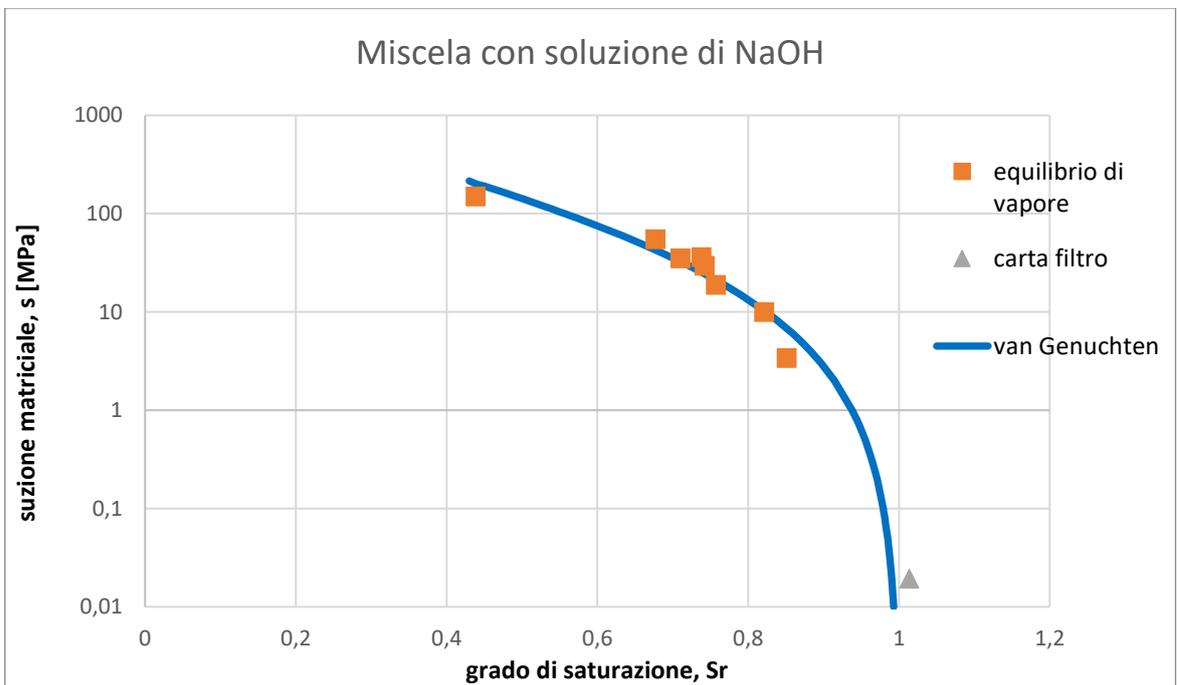


Figura 98 Fitting curve mediante van Genuchten della miscela con soluzione di NaOH

I punti corrispondenti ai valori sviluppati con la tecnica della carta filtro risultano sovrastimati rispetto al trend sviluppato con il modello di van Genuchten sia per la miscela con soluzione di NaCl che per la miscela con soluzione di NaOH. Mentre, per la miscela con acqua distillata i dati relativi alla tecnica della carta filtro si approssimano bene con il trend di van Genuchten.

7 Conclusioni

Nella presente tesi sono riportati i risultati dell'esperienza svolta presso il Laboratorio di Geotecnica del Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica (DISEG) del Politecnico di Torino.

È analizzato il comportamento idraulico di tre diverse miscele di bentonite sodica, attraverso lo sviluppo delle curve di ritenzione idraulica, mettendo in relazione la suzione di matrice e la suzione totale con un quantitativo d'acqua come il grado di saturazione o il contenuto d'acqua.

Al fine di ottenere le curve di ritenzione è stata estrapolata una serie di dati distribuiti omogeneamente attraverso tecniche sperimentali a controllo di suzione o a controllo di contenuto d'acqua.

L'insieme di dati corrispondenti a più tecniche sono stati interpretati globalmente per ogni miscela con l'equazione di van Genuchten per l'ottenimento della relazione tra suzione e grado di saturazione.

In particolare, le curve di ritenzione idraulica sviluppate si riferiscono al percorso di essiccazione dei provini.

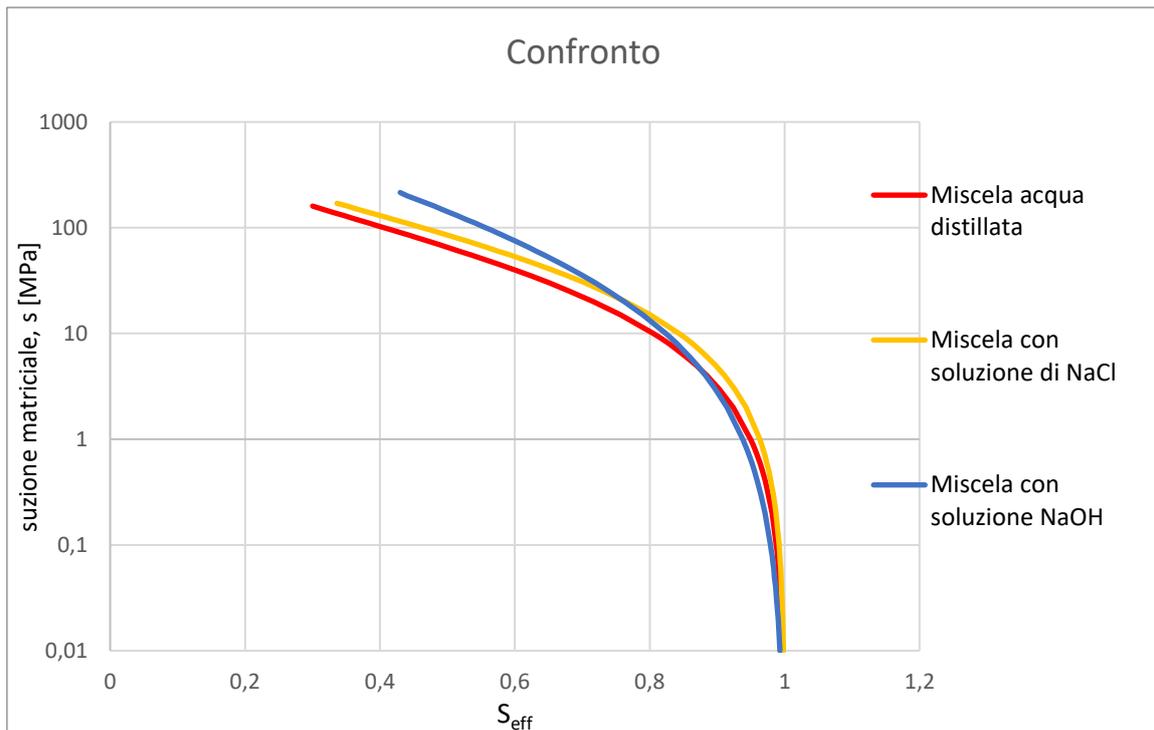


Figura 99 Confronto tra le curve s - S_{eff}

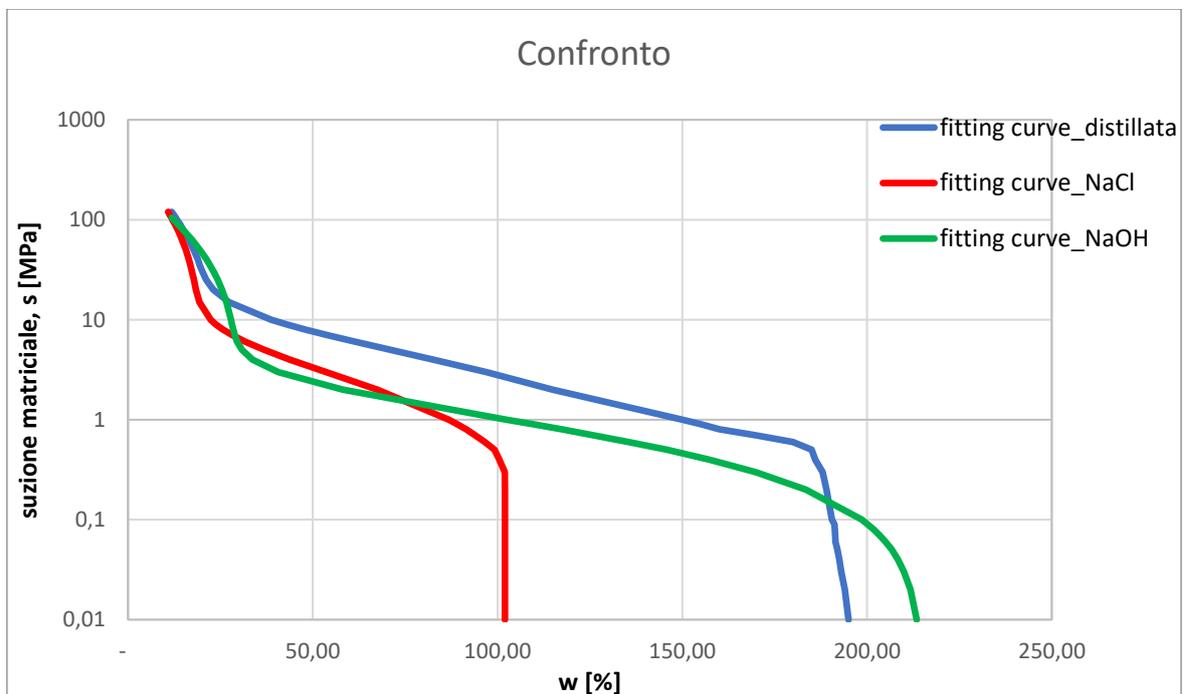


Figura 100 Confronto tra le curve s - w

Si può notare dal confronto tra le curve s-w per il percorso di essiccazione che le miscele presentano un contenuto d'acqua iniziale differente (per suzioni che tendono a zero), dovuto alle differenti componenti presenti nelle soluzioni.

Differenti risultano anche i livelli di suzione di inizio desaturazione.

Bibliografia

Bear J., Cheng A.H.-D. (2010), *Modeling Groundwater Flow and Contaminant Transport*, Theory and Applications of Transport in Porous Media 23, chapter 6 *Unsaturated flow models*

De Paoli V., Mascardi C., Marcellino P., Paviani A. (1991), *La ingegneria geotecnica nella salvaguardia e recupero del territorio, Le applicazioni dei diaframmi nella difesa ambientale*

Facciorusso J., Madiari C., Vannucchi G. (2011), *Dispense di Geotecnica*, Università di Firenze – Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – Sezione Geotecnica, capitolo 10 *Terreni insaturi*

Tarantino A., Romero E., Cui J. Y. (2008), *Laboratory and field testing of unsaturated soils*, New York, Springer, da pag. 21 a pag. 52

Musso et al., (2019), *Preliminary investigation on the water retention behaviour of cement bentonite mixtures*

Musso G., Scelsi G., Della Vecchia G. (2019), *Modelling the role of pore water salinity on the water retention behaviour of compacted active clays*, Rivista italiana di geotecnica

Marinho F.A.M., Oliveira O.M. (2006), *The filter paper method revisited*, Geotechnical Testing Journal, Volume 29, p. 250-258

Romero E. (2001), *Controlled Technique*, 4° Simposio Brasileiro de Solos Nao Saturados, Gehling & Schnaid (eds), Porto Alegre, Brasil, p. 535-542

Lima A., *Experimental techniques*, Tesi di laurea magistrale, chapter 3 *Thermo-Hydraulic tests*

Brunetti M. (2019), *Studio sperimentale della ritenzione d'acqua nelle miscele cemento bentonite*, Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino, Relatore prof. Musso G.