

POLITECNICO DI TORINO



Collegio di Ingegneria Civile

**Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Civile Geotecnica**

Tesi di Laurea Magistrale

**Studio sperimentale della ritenzione d'acqua nelle  
miscele cemento bentonite**

**Relatori**

Prof. Guido Musso

Prof. Renato Cosentini

**Candidato**

Marco Brunetti

Ottobre 2019



"There is no glory in foundations"

Karl von Terzaghi



# Sommario

<i>Abstract</i> .....	X
<i>Introduzione</i> .....	1
1. Curve di ritenzione .....	3
1.1 Modelli analitici di curve di ritenzione .....	7
1.2 Potenziale di matrice e altri potenziali .....	12
1.2.1 Potenziale totale .....	12
1.2.2 Potenziale matriciale .....	13
1.3 Il fenomeno di isteresi .....	16
2. Tecniche di laboratorio .....	21
2.1 Colonna d'acqua sospesa .....	21
2.2 Tecnica della traslazione degli assi .....	24
2.3 Tecnica dell'equilibrio di vapore.....	28
2.4 Tecnica della carta da filtro .....	32
2.4.1 Cenni Storici .....	32
2.4.2 Metodo.....	33
2.4.3 Calibrazione della carta da filtro.....	36
2.4.4 I fattori che influenzano il metodo della carta da filtro per suzioni totali e matriciali .....	45
3. Materiali.....	51
3.1 Bentonite.....	51
3.1.1 Limiti di Atterberg .....	52
3.2 Cemento Portland 32,5 .....	52
4. Apparecchiature utilizzate.....	55
4.1 Psicrometro a condensazione WP4C.....	55
4.2 Edometro a suzione controllata .....	58
4.2.1 Taratura dei trasduttori LVDT.....	61
4.2.2 Determinazione dei parametri caratteristici della pietra porosa.....	62
5. Procedura di prova .....	65
5.1 Preparazione dei provini .....	65
5.1.1 Idratazione della bentonite .....	65
5.1.2 Aggiunta del cemento .....	66
5.1.3 Colata negli stampi .....	66
5.1.4 Maturazione .....	67
5.1.5 Calcolo della massa specifica relativa.....	68
6. Elaborazione dei dati.....	71

6.1 Equilibrio di vapore .....	71
6.1.1 Preparazione delle soluzioni saline.....	71
6.1.2 Gestione dei dati sperimentali .....	72
6.2 Psicrometro a condensazione WP4C.....	79
6.2.1 Gestione dei dati sperimentali: Essiccazione .....	79
6.2.2 Gestione dei dati sperimentali: Imbibizione .....	83
6.3 Carta da filtro .....	85
6.3.1 Calibrazione carta filtro .....	85
6.3.2 Gestione dei dati sperimentali: Essiccazione .....	89
6.3.3 Gestione dei dati sperimentali: Imbibizione .....	94
6.4 Edometro a suzione controllata .....	97
6.4.1 Gestione dei dati sperimentali: Essiccazione.....	97
6.4.2 Gestione dei dati sperimentali: imbibizione .....	99
6.4.3 Problematiche riscontrate.....	101
7. Interpretazione dei dati.....	103
8. Conclusioni .....	113
<i>Bibliografia</i> .....	119

# Indice delle figure

Figura 1: Sezione di una barriera in cemento bentonite .....	2
Figura 2: Curva di ritenzione (Bear e Cheng, 2010) .....	3
Figura 3: Disposizione dell'acqua tra i grani di terreno (Bear e Cheng, 2010) .....	3
Figura 4: Fasi di drenaggio e reidratazione (Bear e Cheng, 2010) .....	4
Figura 5: Modello di curva di ritenzione (Tuller e Or, 2005) .....	10
Figura 6: Curva del potenziale matriciale (Bear e Cheng, 2010) .....	15
Figura 7: Fenomeno di isteresi (Tuller e Or, 2005) .....	16
Figura 8: Effetto ink bottle (Tuller e Or, 2005) .....	17
Figura 9: Effetto goccia di pioggia (Tuller e Or, 2005) .....	17
Figura 10: Effetti dell'aria intrappolata (Bear e Cheng, 2010) .....	18
Figura 11: Apparato di Buchner-Haines (Tarantino, 2008) .....	21
Figura 12: Apparato di Buchner (Tarantino, 2008) .....	22
Figura 13: Schema della classica colonna d'acqua sospesa (Tarantino 2008) .....	23
Figura 14: Andamento della suzione nel tempo durante un percorso di imbibizione (Romero, 1999) .....	26
Figura 15: Isocrone di suzione (Romero, 1999) .....	27
Figura 16: Relazione tra suzione totale e concentrazione di NaClm in soluzione acquosa (Romero, 2001) .....	29
Figura 17: Valori teorici Romero (2001) .....	30
Figura 18: Relazione tra suzione totale e densità (Romero, 2001) .....	31
Figura 19: Metodo della carta da filtro (Bulut e Leong, 2008) .....	33
Figura 20: Flusso di vapore attraverso il provino, Marinho e Oliveira (2006) .....	34
Figura 21: Rappresentazione schematica del flusso attraverso i fori, Marinho e Oliveira (2006) .....	35
Figura 22: curve di calibrazione con suzione totale e di matrice per filtro Whatman n.42 (Leong et. al 2002) e Schleicher & Schuell n. 589 (Bulut and Wray 2005) .....	37
Figura 23: Tecniche utilizzate per il metodo della carta filtro, Marinho e Oliveira (2006) .....	37
Figura 24: Curva di calibrazione per la carta filtro tipo Whatman No. 42, Marinho e Oliveira (2006) .....	39
Figura 25: Tempi di equilibrio per il raggiungimento della suzione nelle carte da filtro tipo Whatman No. 42, Marinho e Oliveira (2006) .....	41
Figura 26: Interpretazione dei dati per la calibrazione della carta filtro, Duran (1986) .....	42
Figura 27: Effetto dei tempi di equilibrio sulle curve di calibrazione, Marinho (1994) .....	43
Figura 28: Effetti del tempo di equilibrio e della distanza dalla fonte d'acqua, Marinho e Oliveira (2006) .....	44
Figura 29: Curve di calibrazione per la carta da filtro Fisher, Marinho e Oliveira (2006) .....	45
Figura 30: Calibrazione della carta filtro tipo Whatman No. 42 e S&S 589, Leong (2002) .....	46
Figura 31: Profilo di suzione in funzione della profondità, van der Raadt et al. (1987) .....	47
Figura 32: Equazioni per le curve di calibrazione di carte da filtro tipo Whatman No. 42 e Schleicher & Schuell 589, Leong (2002) .....	47
Figura 33: Curve di calibrazione per la carta da filtro, Leong (2002) .....	48
Figura 34: Psicrometro a condensazione WP4C .....	55
Figura 35: Differenza di temperatura registrata allo psicrometro .....	57
Figura 36: Edometro a suzione controllata smontato .....	59
Figura 37: Andamento della permeabilità della pietra porosa nel tempo .....	63

Figura 38: valore di ingresso dell'aria del disco di ceramica.....	64
Figura 39: Miscela di bentonite.....	65
Figura 40: Miscela di cemento e bentonite.....	66
Figura 41: Fine della fase di colatura dei provini negli stampi.....	67
Figura 42: Picnometro.....	68
Figura 43: Grossi cristalli di sale utilizzati per le soluzioni saline.....	71
Figura 44: Prova con la tecnica dell'equilibrio di vapore.....	72
Figura 45: Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore sulla miscela M1.....	73
Figura 46: Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore sulla miscela M2.....	74
Figura 47: Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore sulla miscela M3.....	74
Figura 48: Andamento nel tempo delle masse dei provini della miscela M1.....	75
Figura 49: Andamento nel tempo delle masse dei provini della miscela M2.....	75
Figura 50: Andamento nel tempo delle masse dei provini della miscela M3.....	76
Figura 51: Risultati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela M1 ...	77
Figura 52: Risultati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela M2 ...	78
Figura 53: Risultati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela M3 ...	78
Figura 54: Risultati ottenuti con lo psicrometro WP4C per la miscela M1.....	80
Figura 55: Risultati ottenuti con lo psicrometro WP4C per la miscela M1.....	80
Figura 56: Risultati ottenuti con lo psicrometro WP4C per la miscela M2.....	81
Figura 57: Risultati ottenuti con lo psicrometro WP4C per la miscela M1.....	81
Figura 58: Risultati ottenuti con lo psicrometro WP4C per la miscela M3.....	82
Figura 59: Risultati ottenuti con lo psicrometro WP4C per la miscela M3.....	82
Figura 60: Risultati ottenuti con lo psicrometro WP4C per la miscela M1.....	83
Figura 61: Tutti i dati ottenuti con lo psicrometro WP4C per la miscela M1.....	84
Figura 62: Calibrazione della carta da filtro.....	85
Figura 63: Valori ottenuti con la calibrazione della carta da filtro in essiccazione.....	86
Figura 64: Confronto tra i valori ottenuti con la calibrazione della carta filtro e i valori proposti in letteratura.....	87
Figura 65: Valori ottenuti con la calibrazione della carta da filtro in imbibizione.....	89
Figura 66: Provini con carta filtro per la misura della suzione di matrice.....	90
Figura 67: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M1 in essiccazione.....	91
Figura 68: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M1 in essiccazione.....	91
Figura 69: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M2 in essiccazione.....	92
Figura 70: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M2 in essiccazione.....	92
Figura 71: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M3 in essiccazione.....	93
Figura 72: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M3 in essiccazione.....	93
Figura 73: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M1 in imbibizione.....	94
Figura 74: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M1 in imbibizione.....	95
Figura 75: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M2 in imbibizione.....	95

Figura 76: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M2 in imbibizione.....	96
Figura 77: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M3 in imbibizione.....	96
Figura 78: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M3 in imbibizione.....	97
Figura 79: Andamento nel tempo del volume d'acqua per suzione di matrice 50 kPa.....	98
Figura 80: Andamento nel tempo del volume d'acqua per suzione di matrice 150 kPa ...	98
Figura 81: Andamento nel tempo del volume d'acqua per suzione di matrice 300 kPa ...	99
Figura 82: Andamento nel tempo del volume d'acqua per suzione di matrice 300 kPa in imbibizione.....	100
Figura 83: Andamento nel tempo del volume d'acqua per suzione di matrice 150 kPa in imbibizione.....	100
Figura 84: valori ottenuti con l'edometro a suzione controllata .....	101
Figura 85: indice dei vuoti della miscela M1 .....	104
Figura 86: indice dei vuoti della miscela M2 .....	105
Figura 87: indice dei vuoti della miscela M3 .....	105
Figura 88: confronto degli indici dei vuoti per le tre miscele .....	106
Figura 89: Curva di ritenzione in termini di contenuto d'acqua e suzione di matrice per la miscela M1 .....	107
Figura 90: Curva di ritenzione in termini di grado di saturazione e suzione di matrice per la miscela M1 .....	107
Figura 91: Curva di ritenzione in termini di grado di saturazione efficace e suzione di matrice per la miscela M1 .....	108
Figura 92: Curva di ritenzione in termini di contenuto d'acqua e suzione di matrice per la miscela M2 .....	109
Figura 93: Curva di ritenzione in termini di grado di saturazione e suzione di matrice per la miscela M2 .....	109
Figura 94: Curva di ritenzione in termini di grado di saturazione efficace e suzione di matrice per la miscela M2 .....	110
Figura 95: Curva di ritenzione in termini di contenuto d'acqua e suzione di matrice per la miscela M3 .....	110
Figura 96: Curva di ritenzione in termini di grado di saturazione e suzione di matrice per la miscela M3 .....	111
Figura 97: Curva di ritenzione in termini di grado di saturazione efficace e suzione di matrice per la miscela M3 .....	111
Figura 98: Confronto tra le curve di van Genuchten in essiccazione in termini di contenuto d'acqua e suzione di matrice .....	114
Figura 99: Confronto tra le curve di van Genuchten in essiccazione in termini di grado di saturazione e suzione di matrice .....	115



## *Abstract*

This work aims to study hydraulic retention on the cement bentonite mixtures, materials often used in the diaphragm walls realization for contaminated sites encapsulation or ancient dump.

Different mixtures were studied, which differ in mass ratios between cement and bentonite. Hydraulic characterization was occurred with using many sperimental techniques.

This study involves three different mixtures because mass ratios affect the hydromechanical characteristics of material, so a cornestone of this study will be a comparison of the behaviors.

To explore hydraulic behavior on a wide range of suctions it's need use different experimental techniques, each one has a limited field of application. In particular, a control suction oedometer was used, which uses axis translation technique to give matric suction between 50 kPa and 300 kPa, a condensation pscrometer (WP4C Decagon) to measure total suction higher than 1 MPa, filter paper technique to measure suction along drying and wetting paths and vapour equilibrium transfert to give total suction higher than 4 MPa.

For every type of test, variations of mass or volume are registered, in order to define water content values and saturation ratio, these sample characteristics will be related with total and matric suction.

Experimental data interpretation occurs with Van Genuchten's analytic relation. These equations define a curve, which depends by three geotechnical parameters, whose trend should adapt on the values obtained.



## *Introduzione*

La costruzione delle barriere cemento bentonite nasce in Italia nel 1940. L'idea di questi muri è partita quando una compagnia americana chiamata ICOS Corporation ha osservato che i fanghi bentonitici, che erano utilizzati durante lo scavo di pali, potevano stabilizzare lo scavo. La compagnia acquisì un brevetto per la costruzione di muri cemento bentonitici alla fine del 1940 e svilupparono una ricerca sulla ricerca sulle tecniche costruttive. Tuttavia Ryan e Day riportarono, in un articolo scientifico del 1986, che i muri cemento bentonite erano utilizzati negli Stati Uniti dalla metà degli anni quaranta.

Le barriere cemento bentonite sono un tipo di barriere che è stato sviluppato alla fine del 1960 in Europa (Ryan e Day 1986). È stato dapprima utilizzato nel Regno Unito nel 1975 come illustrato da Jefferis (1997) e oggi sono utilizzate in tutto il mondo. 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 di larghezza compresa nel range 0,4 – 1,6 m possono raggiungere profondità di 170 m, 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.

Le barriere verticali a bassa permeabilità sono ampiamente utilizzate per controllare il flusso delle acque sotterranee negli scavi al di sotto del livello dell'acqua, dentro e fuori i bacini e attraverso dighe e argini.

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. La forma finale dei muri bentonitici è un comportamento non strutturale, essi si comporteranno come argille rigide e potrebbero essere scavati con pale a mano. La sequenza costruttiva di questi di questi muri è la seguente:

- La bentonite viene miscelata con l'acqua finché non si ottiene un mix omogeneo. Successivamente si lascia idratare la bentonite per circa 24h perché gli aspetti principali del muro sono controllati dal processo di idratazione;
- Il secondo step prevede l'aggiunta di cemento creando così un fango bentonitico omogeneo;
- Nella terza ed ultima fase la miscela viene colata nella trincea contemporaneamente allo scavo.

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. Infatti la fessurazione di un solo elemento comporterebbe una via preferenziale per la migrazione dell'agente contaminante al di fuori della struttura, che quindi, perderebbe di efficacia.

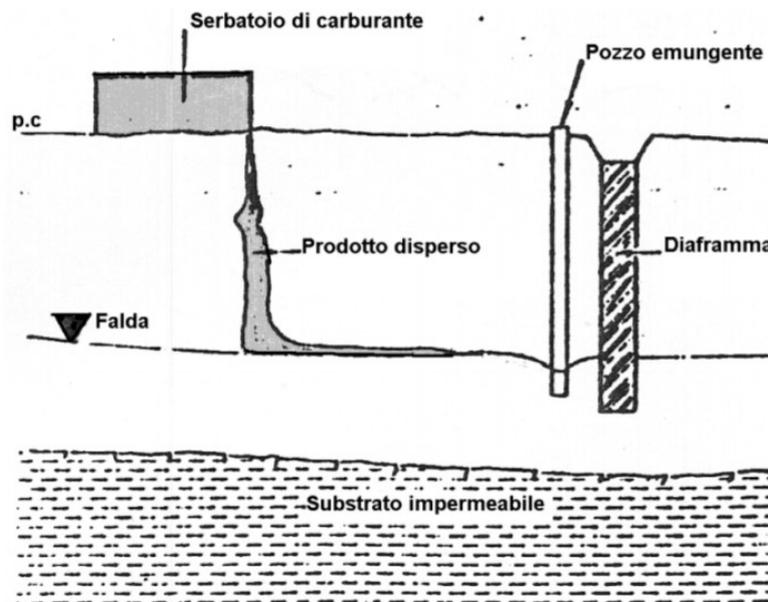


Figura 1: Sezione di una barriera in cemento bentonite

# 1. Curve di ritenzione

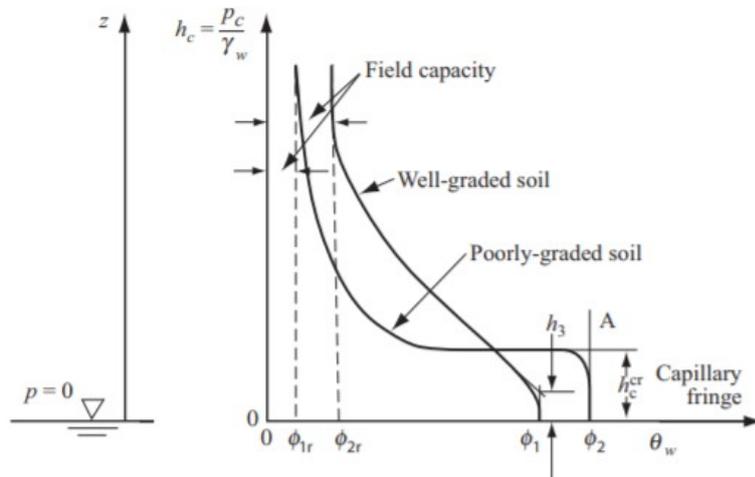


Figura 2: Curva di ritenzione (Bear e Cheng, 2010)

In Figura 2 notiamo la relazione tra pressione capillare e il raggio del menisco, è ragionevole assumere che per molti menischi, la pressione capillare media dipenderà da alcuni raggi medi dei menischi, e quindi dalla saturazione. Il nostro obiettivo è quello di presentare la relazione tra la pressione capillare media e la saturazione di due fasi fluide che occupano gli spazi vuoti di una zona insatura.

Partiamo considerando la distribuzione di due fasi, aria (fase non umida) e acqua (fase umida), dentro gli spazi vuoti. Ad una bassa saturazione l'acqua occupa i domini in forma di anello intorno ai punti di contatto dei grani, questo è chiamato anello pendolare (Figura 3).

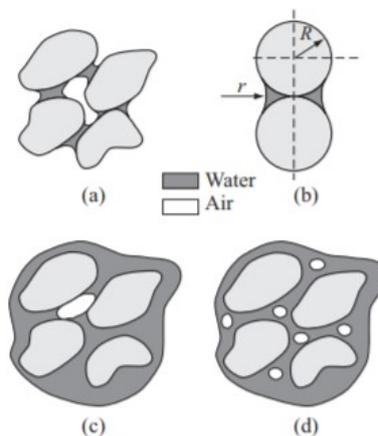


Figura 3: Disposizione dell'acqua tra i grani di terreno (Bear e Cheng, 2010)

L'interfaccia aria acqua ha la forma di una sella e un numero di anelli pendolari adiacenti può fondersi. Quando i grani non si toccano fra di loro, l'acqua prende la forma di un ponte, connettendo i due grani. A questa bassa saturazione, gli anelli pendolari sono isolati e non formano una fase d'acqua continua, eccetto per i film molto sottili di acqua adsorbita sulla superficie del solido. Come la saturazione dell'acqua aumenta, gli anelli pendolari si espandono e fondono, fino a formare una fase di acqua continua. Sopra questa saturazione critica, la massa d'acqua forma una fase continua e la sua saturazione è chiamata funicolare. Come la saturazione dell'acqua aumenta, si sviluppa una situazione in cui l'aria non è più una fase continua. È divisa in bolle individuali situate nei pori larghi. L'aria viene detta in stato di saturazione insulare.

Una bolla d'aria può muoversi solo se una differenza di pressione è applicata ad essa dall'acqua circostante e deve essere sufficiente a spremerla attraverso la costrizione dei pori. Dipendendo dalla distribuzione delle dimensioni dei pori, gli stadi sopra descritti (da acqua pendolare a funicolare) non avverranno contemporaneamente attraverso l'intero dominio di saturazione. È possibile asserire che ad una bassa saturazione, parte dell'acqua formi una fase continua, mentre la rimanente parte è ancora in uno stato pendolare, con un graduale incremento della saturazione. Una transizione simile può avvenire per decrementi di saturazione, questo può dare origine a modelli in cui parte dell'acqua nei pori medi è mobile, mentre l'altra parte è immobile. Con il tempo, il volume dell'aria legato alla saturazione insulare può decrescere per via della solubilità dell'aria in acqua. Analogamente, il volume dell'acqua in un anello pendolare può decrescere col tempo per via dell'evaporazione. Con queste definizioni, possiamo adesso seguire il cambiamento nella saturazione dell'acqua come un provino mediamente poroso inizialmente saturato è gradualmente drenato dal suo fondo con introduzione di aria dalla cima.

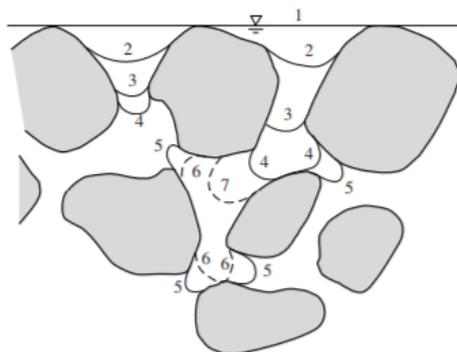


Figura 4: Fasi di drenaggio e reidratazione (Bear e Cheng, 2010)

La Figura 4 mostra i successivi stadi di drenaggio (da 1 a 5) e reidratazione (6 e 7). Ogni stato corrisponde ad un certo volume d'aria occupante una certa porzione di spazio dei vuoti ad una saturazione corrispondente. Come l'acqua drena, si formano dei menischi all'interfaccia aria acqua, il raggio di curvatura ad ogni punto in un menisco dipende dalla pressione capillare locale. Ad ogni fase, la più alta pressione capillare che può essere mantenuta da un'interfaccia locale corrisponde al più piccolo raggio di curvatura che può essere accomodato in un poro attraverso cui l'interfaccia è stata ritirata. Perciò il più piccolo raggio di curvatura avviene nel più stretto poro ancora saturo. In generale, i pori hanno differenti forme e dimensioni perciò non saranno svuotati dalla stessa pressione capillare. I pori larghi saranno svuotati da una bassa pressione capillare mentre quelli più stretti, che comportano i raggi di curvatura più piccoli, saranno svuotati da alte pressioni capillari. Come l'acqua drena progressivamente, l'interfaccia aria acqua si ritira in canali che supportano raggi di curvatura piccoli. Il fluido continua a ritirarsi finché le interfacce prendono la posizione di equilibrio in canali che sono sufficientemente stretti da supportare interfacce con i più piccoli raggi di curvatura. Ovviamente se tutti i canali sono ugualmente larghi, ad una data pressione capillare, nessun equilibrio può essere mantenuto ed un improvviso e "quasi" completo drenaggio è osservato. Diciamo "quasi" perché un po' d'acqua rimarrà sempre come anelli pendolari isolati e come film di acqua adsorbita. Come l'acqua evapora, il volume dell'acqua negli anelli pendolari diminuisce, i raggi di curvatura dei menischi diminuiscono e la pressione capillare aumenta.

La distribuzione di pressione dentro ogni fluido sarà idrostatica mentre saranno soddisfatte le condizioni di salti di pressioni in tutti i punti dell'interfaccia. In questi punti il salto di pressione corrisponderà al raggio di curvatura dell'interfaccia in quel punto, in questo modo l'equilibrio è stabilito tra la tensione superficiale e la gravità. Dalla precedente descrizione, è ovvio che ad ogni fase del processo di drenaggio, la quantità di acqua rimanente negli spazi vuoti prende una certa configurazione microscopica. Quest'ultima è legata alla distribuzione microscopica della geometria di interfaccia, conseguentemente, la quantità di acqua rimanente negli spazi vuoti dipende dalla pressione capillare macroscopica definita nella formula

$$p_c = \overline{p_n^n} - \overline{p_w^w}$$

*Equazione 1*

In cui  $\overline{p_n^n}$  è la pressione dell'aria e  $\overline{p_w^w}$  la pressione dell'acqua.

La pressione capillare aumenta quando la saturazione d'acqua diminuisce, che a sua volta corrisponde ad un decremento di area superficiale d'interfaccia. Ora invertiamo il processo e iniziamo a riempire lo spazio tra i pori con acqua.

Visualizzando il mezzo poroso come un assemblaggio casuale di tubi di vari raggi, l'Equazione 1 può essere interpretata affermando che questi tubi drenano ad una data pressione capillare. Possiamo concludere che una forte relazione esiste tra la pressione capillare macroscopica e la saturazione dell'acqua. La relazione tra la quantità di acqua presente negli spazi vuoti, in termini della sua saturazione, e la pressione capillare prevalente è registrata come curva di pressione capillare (curva di ritenzione) e mostra quanta acqua è trattenuta nel terreno dalla pressione capillare. La pressione capillare dipende dalla tensione superficiale tra aria e acqua  $\gamma_{\omega n}$  che dipende dalla temperatura all'interfaccia  $T_{\omega n}$  e dalla concentrazione  $c_{\omega n}^Y$  dei  $\gamma$  componenti all'interfaccia. Sotto l'equilibrio termodinamico, la temperatura è la stessa nelle due fasi adiacenti  $T_{\omega}$  temperatura dell'acqua e  $T_n$  temperatura dell'aria.

$$T_{\omega} = T_n = T_{\omega n}$$

*Equazione 2*

e le concentrazioni sono funzioni di una delle due fasi.  $f_{\omega}(c_{\omega})$  funzione dell'acqua e  $f_n(c_n)$  funzione dell'aria

$$c_{\omega n}^Y = f_{\omega}(c_{\omega}) = f_n(c_n)$$

*Equazione 3*

perciò la pressione capillare si può scrivere come:

$$p_c = p_c(S_r, \gamma_{\omega n}(T_{\omega n}, c_{\omega n}))$$

*Equazione 4*

In cui  $S_r$  è il grado di saturazione

Più conciso:

$$p_c = p_c(S_r, T_{\omega n}, c_{\omega n})$$

*Equazione 5*

Per semplicità assumiamo che la pressione capillare sia

$$p_c = p_c(S_r)$$

*Equazione 6*

La Figura 2 indica un esempio di curva di ritenzione. Il punto A in figura indica la soglia di pressione capillare  $h_c^{CF}$  corrispondente alla dimensione dei pori più larga. Se partiamo da un provino che è completamente saturato dall'acqua, possiamo produrre la capillarità  $h_c^{CF}$  drenando una piccola quantità di acqua. Praticamente l'aria non penetrerà nel provino,

finché la capillarità critica sarà raggiunta. La pressione corrispondente,  $p_c^{cr}$ , è chiamata pressione critica, o pressione di soglia. Quando esprimiamo in termini di pressione, il valore critico è anche chiamato valore di ingresso dell'aria. Come il grado della pressione capillare  $h_c$  aumenta, una piccola riduzione iniziale  $\theta_w$  (associata al ritiro del menisco aria acqua nei pori del provino) è osservata. Poi al valore di pressione critica  $h_c^{cr}$  l'aria entra nei pori più larghi che iniziano a drenare. La forma della curva di ritenzione e, quindi, anche la pressione di soglia, dipendono della distribuzione delle forme e dimensioni del poro.

La curva 1 e la 2 in Figura 2 corrispondono rispettivamente ad un terreno bene assortito e ad uno mal assortito. Come il drenaggio dell'acqua progredisce, osserviamo che una certa quantità di acqua rimane negli spazi vuoti anche ad alte pressioni capillari in forma di anelli pendolari isolati e sottili pellicole immobili. Il corrispondente valore di saturazione dell'acqua, denotato da  $S_r^{irr}$  è chiamato saturazione di acqua (o umidità) irriducibile. In termini di frazione volumetrica,  $\theta^{irr}$  è chiamato contenuto di acqua (o umidità) irriducibile. Quando l'aria è presente solo in forma di bolle isolate, la saturazione dell'aria  $S_a$  è indicata come saturazione d'aria residua  $S_{ar}$ . Abbiamo usato il termine irriducibile per la fase di bagnature mentre per la fase di non bagnature abbiamo usato il termine residuo. Ulteriore saturazione è possibile dall'evaporazione dell'acqua e da un flusso del film immobile, a queste basse saturazioni il concetto di potenziale matriciale dovrebbe essere usato piuttosto che pressione capillare.

## 1.1 Modelli analitici di curve di ritenzione

Una varietà di metodi sono impiegati per determinare la relazione di pressione capillare. Un approccio diretto è ottenuto dai dati di pressione capillare di saturazione misurati in laboratorio, ottenuti da misure simultanee del contenuto d'acqua del terreno e potenziale matriciale. Tecniche comuni per misurare il contenuto d'acqua nel terreno includono la semplice determinazione gravimetrica del provino, misura della resistività calibrata o celle dielettriche e time-domain reflectometry. La tecnica più comune per misurare la pressione d'acqua negativa nel terreno utilizza dispositivi noti come tensiometri.

Il tensiometro è costituito da un tubo rigido riempito con acqua e attrezzato con manometro e un trasduttore per misurare la pressione nel tubo. Il contatto tra l'acqua nel terreno e nel tensiometro è stabilito attraverso una "coppa porosa" fatta in ceramica (o altri materiali rigidi inerti). Quando è inserita nel terreno, l'acqua saturante il tubo rigido sigillato è inizialmente alla pressione atmosferica. L'acqua nel terreno è alla pressione

sub atmosferica. La suzione applicata attraverso il muro della coppa porosa tira fuori un piccolo volume di acqua producendo la stessa pressione sub atmosferica nel tubo e questa pressione è indicata dal dispositivo di misurazione. Prima di determinare la pressione e il contenuto d'acqua ad ogni passaggio, bisogna essere certi che l'equilibrio tra la pressione dell'acqua nel terreno e la pressione nel tensiometro sia stato effettivamente raggiunto. Questo può portare a lunghi periodi di tempo che dipendono dalla resistenza idraulica della coppa porosa e del terreno circostante. Il tempo per stabilire l'equilibrio può essere ridotto selezionando una coppa con più alta permeabilità, ma poi incontreremo la possibilità che l'aria sia risucchiata nel tensiometro. Il range di tale dispositivo è quindi limitato dal valore di ingresso dell'aria del tensiometro e dalla pressione di cavitazione dell'acqua. Questo limita l'utilizzo dei tensiometri a pressione capillare a meno di 0,8 atm.

Un altro approccio per stimare la pressione capillare di saturazione è condotto da esperimenti di flusso dinamico nel laboratorio o sul terreno. Un tipico esperimento comprende alcune sequenze di infiltrazione d'acqua, redistribuzione, drenaggio, e/o eventi di evaporazione. La curva di pressione capillare è stimata confrontando il contenuto d'acqua osservato, le pressioni, e/o i flussi risultati simulando il corrispondente problema del valore iniziale/al contorno del flusso transitorio.

Dalla soluzione di questi modelli discende la determinazione delle proprietà idrauliche del terreno ottenute confrontando i dati misurati con quelli predetti di modelli. Il processo di determinazione delle proprietà del terreno, comparando i dati misurati con i valori predetti risolvendo un modello matematico per il corrispondente problema al contorno, è riferita ad un problema inverso, o ad un problema di stima dei parametri o problema di calibrazione.

I metodi inversi hanno il vantaggio che prediligono i parametri effettivi che sono direttamente rilevati dalle condizioni dinamiche sperimentali. Possono, perciò, richiedere meno tempo sperimentale, o sforzo, dei laboratori convenzionali o dei metodi sul campo. Il loro primo svantaggio è che la soluzione del problema inverso non è sempre unica, differenti valori di un parametro idraulico possono dare simili modelli predittivi.

Durante gli anni, i metodi sono stati sviluppati per stimare le proprietà idrauliche dalla distribuzione delle dimensioni dei grani molto più facilmente che dai dati idraulici statici o dinamici.

Molti autori hanno proposto un'espressione analitica per la forma generale della curva di ritenzione. Queste espressioni includono coefficienti che possono essere ricavati dai problemi inversi, il simbolo  $S_{eff}$  definito come:

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

*Equazione 7*

è chiamato saturazione dell'acqua effettiva o ridotta. Qui la saturazione di acqua irriducibile,  $S_r^{irr}$  può dipendere dalle condizioni sotto cui la pressione capillare è misurata

- Brooks & Corey:

il modello di Brooks & Corey lega la saturazione effettiva,  $S_{eff}$ , alla suzione di matrice  $s$  mediante la seguente relazione:

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

*Equazione 8*

Dove  $\lambda$  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  $\lambda$  è legato alla distribuzione della dimensione dei pori nel terreno: in particolare si osserva come un terreno con un grande valore di  $\lambda$  può perdere il suo contenuto d'acqua velocemente anche per piccole variazioni della suzione imposta, mentre un terreno con  $\lambda$  basso necessita di suzioni elevate per rilasciare il liquido e il fenomeno avviene molto più gradualmente.

Questo è approssimativamente il valore di  $p_c$  su una curva di drenaggio di pressione capillare in cui esiste una fase d'aria continua nello spazio vuoto.

Il modello di Brooks & Corey è stato ripreso da Campbell (1974) il quale, utilizzando la medesima legge di potenza, ha espresso il grado di saturazione  $S_r$  come una funzione del valore d'ingresso dell'aria e di un fattore  $b$  collegato alla tessitura del terreno:

$$S_r = \left(\frac{s_b}{s}\right)^{1/b}$$

*Equazione 9*

Come emerge dall'equazione, l'unica differenza di quest'ultimo modello rispetto quello di Brooks & Corey consiste nell'imporre un valore nullo al parametro di contenuto d'acqua residua.

- Van Genuchten:

Il modello di van Genuchten è il modello probabilmente più utilizzato in letteratura negli ultimi anni. Il successo di questo modello è dovuto alla sua capacità di ottenere in modo relativamente semplice delle soluzioni analitiche in forma chiusa a partire da un numero molto basso di parametri. In particolare, il contenuto d'acqua viene espresso come una funzione della suzione di matrice:

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

Equazione 10

Dove  $\alpha, n$  e  $m (=1-1/n)$  sono coefficienti positivi della curva, mentre  $s$  è la suzione di matrice. Il modello di van Genuchten ha la caratteristica di fornire una curva continua nel dominio  $s \geq 0$  e per questo è spesso preferita rispetto ai modelli citati in precedenza.

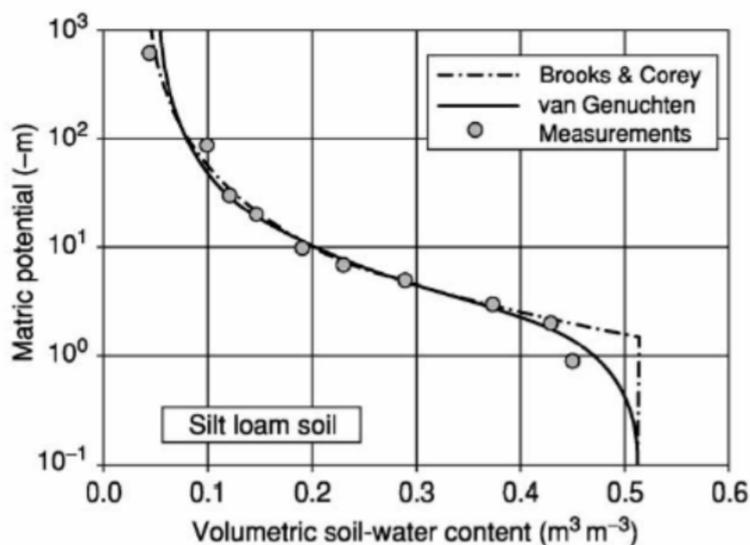


Figura 5: Modello di curva di ritenzione (Tuller e Or, 2005)

Inoltre, i terreni possono essere studiati come mezzi a doppia porosità, riferite alla macrostruttura e alla microstruttura. Per questi, è possibile ripetere i ragionamenti fatti fino ad ora tenendo conto che il grado di saturazione totale può essere espresso come una combinazione lineare dei gradi di saturazione riferiti alla microstruttura e alla

macrostruttura. È possibile ricavare la curva di ritenzione e il risultato sarà una via intermedia tra le curve che si otterrebbero per le due strutture.

A tal proposito, Gallipoli et al. (2003) presentano una relazione migliorata per la variazione del grado di saturazione di un terreno non saturo, proponendo un'evoluzione dell'equazione di van Genuchten.

In primo luogo, gli autori sottolineano la non univocità della relazione tra grado di saturazione e suzione per due motivi:

1. In un terreno deformabile, la variazione dell'indice dei vuoti  $e$  e la variazione nella dimensione dei pori e delle interconnessioni tra di essi a cui corrispondono variazioni nella curva di ritenzione;
2. Esiste il fenomeno dell'isteresi per cui si hanno due percorsi ideali di essiccamento e di imbibizione.

La loro relazione è stata verificata attraverso prove sperimentali, in particolare tenendo conto del primo aspetto. In secondo luogo, scelgono il volume specifico  $v$  come seconda variabile e si soffermano sulle semplificazioni che questo implica:

- Viene ignorata l'influenza delle deformazioni di taglio che potrebbe causare delle variazioni nella geometria dei pori e delle loro interconnessioni;
- Non viene fatta alcuna distinzione tra l'influenza delle deformazioni volumetriche elastiche e plastiche, mentre in realtà esse sono generate da due diversi processi fisici e di conseguenza possono produrre variazioni diverse nella geometria dei pori.

Gallipoli et al. (2003) modificano la relazione di van Genuchten proponendo la seguente forma per il parametro  $\alpha$

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

*Equazione 11*

in cui  $\varphi$  e  $\beta$  sono costanti caratteristiche di un terreno. L'equazione di van Genuchten risulta quindi variata come segue

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

*Equazione 12*

## 1.2 Potenziale di matrice e altri potenziali

Finora, la curva di ritenzione è stata presentata come relazione tra la pressione capillare e la saturazione. Abbiamo esposto che la nozione microscopica di pressione capillare è associata al diametro dei menischi all'interno del mezzo poroso. Sebbene abbiamo ripetutamente menzionato la presenza di film e l'interazione tra il fluido e il solido alle loro comuni interfacce, non abbiamo mostrato come questo fenomeno interessa la curva di ritenzione. Come nella teoria termodinamica, il potenziale è definito a livello microscopico e poi la sua controparte macroscopica è ottenuta dalla media.

Ogni specie chimica in una fase acquosa, inclusa l'acqua stessa, è attivata da varie forze. Specificamente le molecole d'acqua sono attivate da forze che agiscono sotto la gravità, da interazione con altre molecole d'acqua, dall'interazione con molecole di altre specie chimiche presenti nell'acqua, dall'interazione con molecole di matrice solida. Sebbene questa assunzione sia valida per ogni fluido, dobbiamo continuare ad utilizzare l'acqua come esempio, perché è il principale fluido di interesse in una zona insatura. Il lavoro è stato espresso in modo da cambiare lo stato del sistema considerato in una direzione che è opposta alla risultante delle forze menzionate sopra. Il potenziale esprime il lavoro reversibile che è stato speso in modo da trasformare il sistema dato da alcuni stati di riferimento specifici a quelli attuali. Questa quantità di lavoro equivale all'incremento di energia del sistema.

Data le differenti nature delle varie forze, essendo alcune non meccaniche, è molto conveniente definire un numero di potenziali, ognuno corrispondente ad una specifica forza, o ad una combinazione di forze.

### 1.2.1 Potenziale totale

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

1. Potenziale matriciale, associato all'assorbimento dell'acqua nella superficie solida;
2. Potenziale di soluto (o potenziale osmotico), associato con la concentrazione delle specie in soluzione;
3. Potenziale gravitazionale, che esprime il cambiamento nell'energia potenziale associato incremento di altezza del punto considerato sopra il serbatoio di riferimento;

4. Potenziale termico, che esprime il cambiamento dell'energia libera associato alla temperatura del punto considerato sopra quello prevalente nel serbatoio di riferimento.

La somma dei primi due è chiamata potenziale dell'acqua. Si noti che, l'energia cinetica, che è proporzionale al quadrato della velocità dell'acqua, non è menzionata perché nei terreni la velocità dell'acqua è trascurabile.

### 1.2.2 Potenziale matriciale

In un punto, il potenziale matriciale è definito come la somma del lavoro reversibile che è stato speso in modo da muovere ogni componente individuale comprimendo la fase, da un serbatoio alla stessa altezza, temperatura, pressione del gas esterno e composizione al punto considerato. Il potenziale matriciale macroscopico di una fase è la media del potenziale matriciale microscopico. Il potenziale matriciale spesso usato nella geotecnica, quando si tratta di zone di terreno non sature, è una conseguenza dei due fenomeni:

- Forze non bilanciate attraverso le interfacce aria acqua (menischi), manifestate come tensione superficiale;
- Attrazione di molecole nella fase alla superficie solida. Questo effetto è significativo solo nella vicinanza della superficie del solido, quindi questo effetto è manifestato come un film sottile che riveste il solido.

La presenza dell'interfaccia aria acqua dà origine al fenomeno di pressione capillare, il salto di pressione attraverso l'interfaccia microscopica aria acqua dentro lo spazio vuoto. Nel modello semplificato di un menisco curvo, con uno strato sufficientemente spesso di fluido su entrambi i lati, il concetto di tensione superficiale è valido e mette in relazione il raggio di curvatura dei menischi alla pressione capillare microscopica. Questa formula però non tiene in conto della pressione capillare a bassi livelli di saturazione cioè quando si hanno anelli pendolari e film sottili di rivestimento della parte solida. La definizione di potenziale matriciale incorpora anche gli effetti delle forze attive su questi film. Il potenziale matriciale, quindi, non è uguale al potenziale capillare che è associato solo alle forze capillari.

Il potenziale matriciale è, poi, uguale al potenziale capillare, se definiamo il potenziale matriciale per unità di volume d'acqua, per un certo range di saturazione questo sarà uguale alla pressione capillare.

L'effetto dei film diventa molto significativo quando il solido è drenato e la saturazione d'acqua raggiunge il valore irriducibile. Quando l'acqua è ulteriormente rimossa, per mezzo dell'evaporazione, al di sotto del valore irriducibile, l'effetto dei film d'acqua adsorbiti e il suo contributo al potenziale matriciale, diventa ancora più significativo. Ad alcuni bassi valori di saturazione dell'acqua, l'acqua negli spazi vuoti può essere presente solo come film che riveste i grani (e anelli pendolari al punto di contatto tra i grani). Questi diventano più sottili quando l'acqua è rimossa per evaporazione. In questo range, il comportamento è dominato non dalla tensione superficiale aria acqua, ma dall'interazione tra le molecole solide.

Quando espresso per unità di volume dell'acqua, il potenziale matriciale a saturazioni sufficientemente alte è uguale alla pressione nell'acqua,  $u_w$ . È positivo (sopra la pressione atmosferica di riferimento) nella zona satura e negativo (sotto la pressione atmosferica di riferimento) nella zona non satura. Quando la fase gassosa nello spazio vuoto è alla pressione  $u_g$  il potenziale matriciale per unità di volume di acqua è espresso dalla differenza  $u_w - u_g$ . Il potenziale di matrice per unità di volume di acqua è quindi espresso da

$$(u_w - u_g) / \rho_w G$$

*Equazione 13*

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

Il potenziale matriciale è la quantità termodinamica più appropriata per descrivere il fenomeno nelle zone insature della pressione capillare, incorpora sia gli effetti della capillarità che dell'interazione fluido solido. Per ottenere la relazione tra il potenziale matriciale e la saturazione, conduciamo un esperimento in cui l'acqua è rimossa da un provino, non con drenaggio per gravità, ma per evaporazione. In questo esperimento, il vapore contenuto nella fase gassosa e l'acqua contenuta nello spazio dei pori, sono portati all'equilibrio a differenti livelli di saturazione dell'acqua. Otteniamo la tipica curva di potenziale matriciale mostrata in Figura 6.

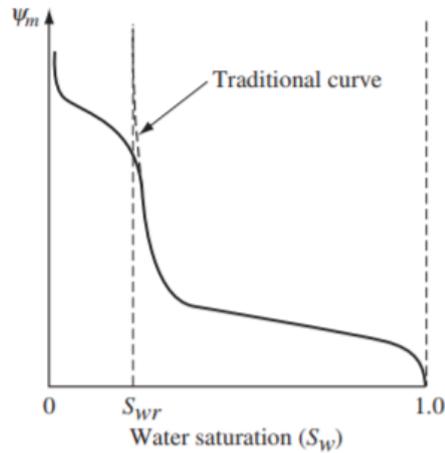


Figura 6: Curva del potenziale matriciale (Bear e Cheng, 2010)

Questa curva solleva la domanda “qual è il significato del termine saturazione d’acqua irriducibile?”. Dobbiamo interpretare questo termine come indicatore di saturazione a cui l’acqua diventa discontinua.

Gli esperimenti mostrano che il valore di saturazione irriducibile è asintotico quando l’acqua è drenata dal provino. Tuttavia, se l’evaporazione e/o il flusso dei film continuano a rimuovere acqua dal provino, la saturazione può essere ulteriormente ridotta, finché è praticamente zero. Il metodo di assorbimento del vapore è una tecnica di drenaggio utilizzata per descrivere il fenomeno. Controllando il contenuto di vapore nel gas, aspettando che ad ogni stadio si raggiunga l’equilibrio tra la pressione di vapore nel gas e la pressione nel liquido, la saturazione di quest’ultima è gradualmente diminuita, con il liquido rimanente nei pori più piccoli isolati come anelli pendolari o film sul solido. L’incremento graduale del potenziale matriciale nell’acqua quando il terreno si asciuga, può essere calcolato con la legge di Kelvin

$$p'_c = -\frac{\rho_\omega RT}{M_\omega} \ln \frac{p^v}{p^{v_0}} \quad \text{oppure} \quad \psi = \frac{RT}{gM_\omega} \ln RH$$

Equazione 14

e disegnato come una funzione del decremento di saturazione.

Il primo termine rappresenta la pressione di vapore controllata dalla soluzione, che è leggermente affetta dalla pressione esercitata su un liquido da un gas inerte esterno. Il secondo termine rappresenta la pressione di vapore saturata di un solvente che dipende dalla temperatura.

In questa equazione R è la costante universale dei gas, T è la temperatura,  $M_\omega$  è il peso molecolare dell’acqua,  $p^v/p^{v_0} \leq 1$  è il rapporto tra la pressione parziale dell’acqua nella

fase gassosa e la pressione parziale dell'acqua in assenza di effetti d'interfaccia,  $RH$  è la pressione di vapore relativo o umidità relativa.

### 1.3 Il fenomeno di isteresi

Facendo riferimento alle due modalità di misura della curva di ritenzione descritti in precedenza, si evidenzia che questi due percorsi permettono di ricavare due curve che, nella maggior parte dei casi, non sono identiche; in particolare si osserva che il contenuto d'acqua in una curva di drenaggio è maggiore, a parità di suzione applicata, rispetto a quello rilevato nella curva di imbibizione. Questo fenomeno è detto isteresi e indica che la curva di ritenzione dipende dalla storia di saturazione del campione.

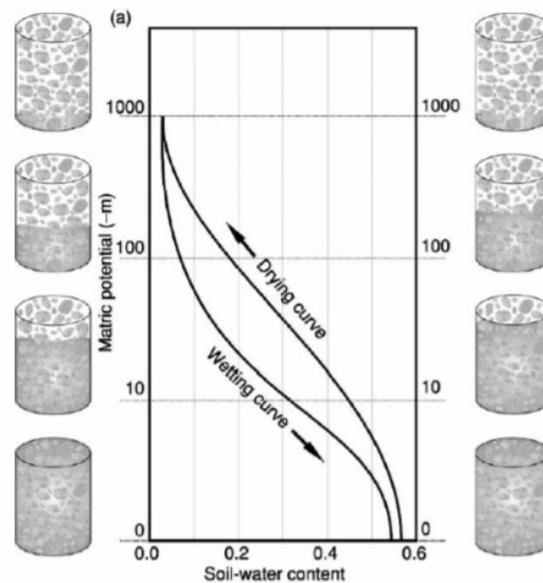


Figura 7: Fenomeno di isteresi (Tuller e Or, 2005)

Quando i processi di imbibizione o di essiccazione vengono interrotti ad un certo punto, il comportamento del terreno segue dei cicli di isteresi intermedi contenuto all'interno di quello principale descritto in precedenza.

L'isteresi delle curve di ritenzione può essere spiegata facendo riferimento ai seguenti fenomeni:

- L'effetto "ink bottle", dovuto alla non uniformità di forma e dimensioni dei pori interconnessi nel terreno, in particolare il drenaggio è maggiormente influenzato dai pori di diametro minore mentre l'imbibizione è funzione dei pori di diametro maggiore.

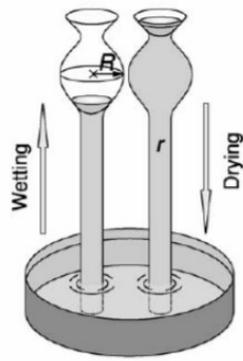


Figura 8: Effetto ink bottle (Tuller e Or, 2005)

- L'effetto goccia di pioggia dovuto al fatto che l'angolo di contatto è più elevato all'avanzamento dell'interfaccia aria acqua su un solido, dovuto a sua volta alle impurità e alla possibile variazione dei minerali che compongono la superficie, alla rugosità del solido e alla gravità. Anche se il fluido è polare, come nel caso dell'acqua, l'angolo di contatto varia se la superficie del solido è stata preventivamente umidificata dal fluido oppure no.

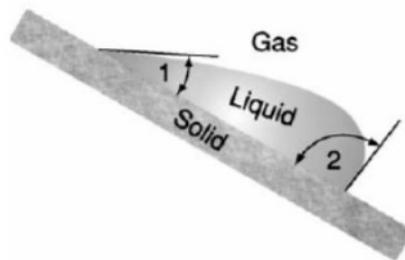


Figura 9: Effetto goccia di pioggia (Tuller e Or, 2005)

- Presenza di aria intrappolata nei pori di un terreno recentemente saturato.
- Fenomeni di rigonfiamento e ritiro del terreno durante il drenaggio e l'imbibizione.

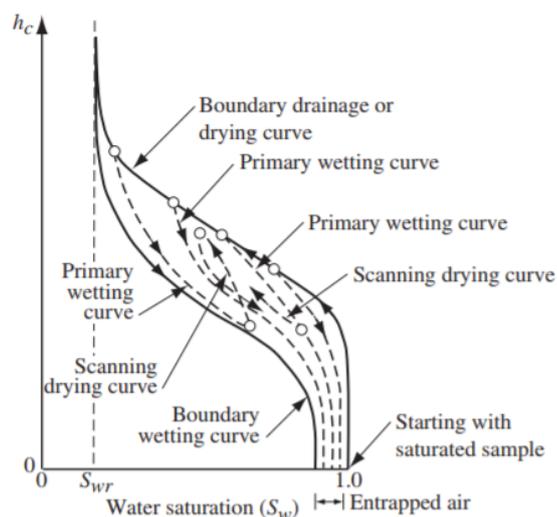


Figura 10: Effetti dell'aria intrappolata (Bear e Cheng, 2010)

La Figura 10 mostra gli effetti dell'aria intrappolata sulla relazione di pressione capillare. Partendo da un punto sul contorno della curva di drenaggio, è possibile seguire il processo di imbibizione ed osservare una curva di scanning wetting. Le curve di scanning drying sono ottenute dal drenaggio del provino da un punto iniziale che si trova sulle curve di imbibizione. Le curve di scanning sono mostrate come linee tratteggiate sulla figura, in questo modo, la relazione macroscopica tra la pressione capillare e la saturazione, espressa dalla curva di pressione capillare, dipende anche dalla storia di umidificazione e deumidificazione del provino preso in considerazione.

Come un provino è stato riumidificato alla pressione capillare zero, l'aria residua di saturazione  $S_{ar}$ , rimane nel provino. Possiamo notare che il valore di  $S_{ar}$  dipende anche dalla storia di drenaggio-imbibizione. Per esempio, quando un provino saturo è drenato e ad un certo punto l'imbibizione inizia, continuando a diminuire la pressione capillare la quantità di aria intrappolata è più piccola di quando l'imbibizione è partita da uno stato più secco. La curva che inizia al 100% della saturazione dell'acqua e procede verso la saturazione residua dell'acqua ad alte pressioni capillari è nota come curva principale di drenaggio o "main drying". La curva che inizia alla saturazione di acqua residua e procede verso più alte saturazioni, terminando alla pressione capillare zero, è detta curva principale di imbibizione o "main wetting". Le due curve definiscono l'involuppo isteretico che comprende un infinito numero di curve di scanning. Una curva di imbibizione che inizia ad un punto di inversione, dove la saturazione inverte la direzione lungo la principale curva di drenaggio, è riferita alla curva di scanning-wetting primaria. Una curva di drenaggio che parte dal principale ramo di imbibizione è riferita ad una curva di scanning-

drying primaria. Le curve di scanning secondarie possono iniziare ad un punto di inversione su un percorso primario di scanning.

Per tener conto degli effetti dell'aria intrappolata durante l'imbibizione d'acqua, dobbiamo impiegare il concetto di saturazione apparente come un surrogato macroscopico per tracciare la posizione dell'interfaccia tra la porzione continua dell'aria e della fase acquosa. Definiamo la saturazione apparente,  $\hat{S}_\omega$ , come:

$$\hat{S}_\omega = S_{\text{eff}} + \tilde{S}_{\text{at}}$$

*Equazione 15*

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

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

*Equazione 16*

e  $\tilde{S}_{\text{at}}$  è l'effettiva saturazione d'acqua intrappolata definita da:

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

*Equazione 17*

In cui  $S_{\text{at}}$  è l'attuale saturazione di aria intrappolata. Si noti che per la curva principale di drenaggio, la saturazione apparente e quella efficace sono uguali, perché non c'è aria intrappolata lungo questo percorso.



## 2. Tecniche di laboratorio

### 2.1 Colonna d'acqua sospesa

Buckingham fu uno dei primi studiosi che misurò le relazioni tra il potenziale capillare e il contenuto d'acqua e le espresse come una funzione continua usando la tecnica della colonna d'acqua sospesa. L'estremità superiore della colonna era chiusa per prevenire l'evaporazione. L'energia potenziale gravitazionale dell'acqua ad ogni altezza sopra l'altezza di riferimento del serbatoio, dopo il raggiungimento delle condizioni di equilibrio, era riferita al potenziale capillare.

Richards semplificò e raffinò questa tecnica e propose una procedura sperimentale per la determinazione delle curve di ritenzione usando sottili provini ed un serbatoio d'acqua connesso ad una cisterna vuota. Il livello dell'acqua era mantenuto costante, ma non era possibile monitorare il cambiamento di volume dell'acqua.

Haines modificò l'apparato ad imbuto introducendo il concetto di tecnica della colonna d'acqua che può essere misurata per curve di ritenzione di terreni a grana grossa. La pressione nell'acqua sotto il piatto poroso può essere ridotta al livello subatmosferico incrementando la differenza tra l'altezza del provino e l'altezza del serbatoio.

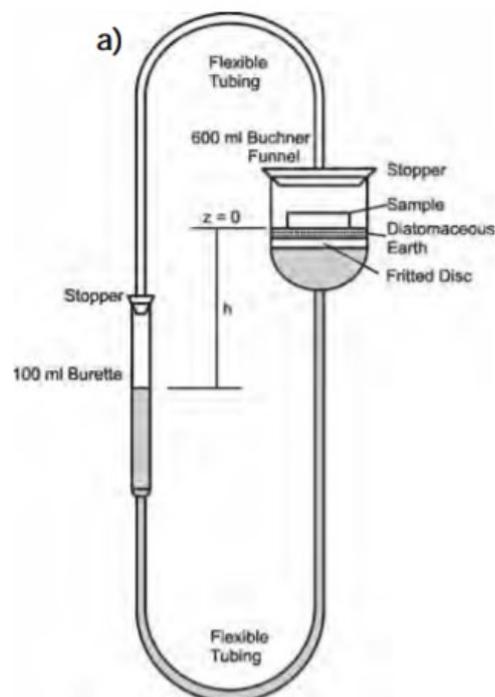


Figura 11: Apparato di Buchner-Haines (Tarantino, 2008)

Più recentemente, Sharma e Mohamed usarono l'apparato ad imbuto per investigare la migrazione di contaminanti in sabbie sature e non sature per determinare la curva di ritenzione. Tipicamente nell'apparato ad imbuto i provini sono preparati versando sabbia da un'altezza fissata, nell'imbuto riempito d'acqua, tenendo il livello dell'acqua sempre sopra il livello della sabbia. I provini completamente saturi sono poi soggetti ad un incremento di tensione capillare abbassando la buretta ad un'altezza data per ottenere la curva principale di drenaggio. Le curve di imbibizione e scanning sono ottenute estendendo questa tecnica. La parziale riumidificazione della curva di drenaggio, riducendo la suzione e permettendo al provino di imbibire umidità, è definita come la curva di scanning.

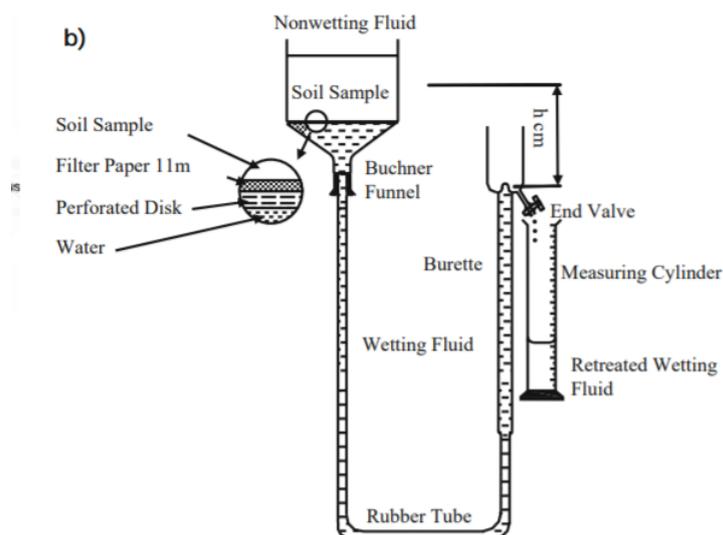


Figura 12: Apparato di Buchner (Tarantino, 2008)

Facendo riferimento alla Figura 13, il metodo di Dane e Hopmans può essere utilizzato per dimostrare l'approccio di Haines in cui la suzione di matrice può essere regolata variando il livello  $z_1$ . Nella colonna sospesa il livello  $z_1$  può essere regolato con una precisione di 1 mm e quindi la suzione può essere controllata con una precisione di 0,01 kPa.

Nell'apparato di Haines la suzione è controllata tramite una tecnica di colonna d'acqua sospesa che usa il controllo del vuoto. Nella tecnica di Richards, la suzione può essere regolata controllando la pressione del gas  $P_g$  mentre nell'apparato combinato la suzione può essere regolata variando il livello di  $z_1$  o controllando la pressione del gas  $P_g$ . Nella tecnica della colonna d'acqua sospesa il valore di  $P_g$  è mantenuto costante e quindi non ci sono problemi legati alla diffusione dell'aria nel piatto poroso dovuto al sistema di drenaggio. La massima suzione che può essere raggiunta dal metodo della colonna

d'acqua sospesa è di 20-30 kPa dovuta alle limitazioni pratiche di raggiungere pressioni elevate regolando l'altezza del provino e il livello dell'acqua nella colonna.

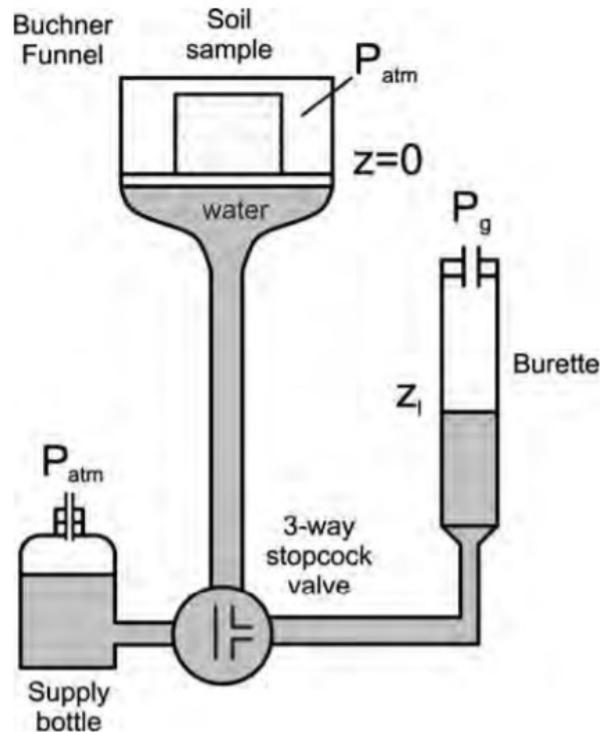


Figura 13: Schema della classica colonna d'acqua sospesa (Tarantino 2008)

Tipicamente la colonna sospesa è usata per investigare la ritenzione dell'acqua in terreni a grana grossa, con piccole quantità di materiale fine, che drenano prontamente a bassi valori di suzione. Valori più alti di suzione possono essere ottenuti da tecniche a "colonne multiple".

La tecnica controllo del vuoto può misurare suzioni nel range di 0-80 kPa ma richiede dispositivi sofisticati. Nell'apparato di Haines l'equilibrio è stabilito monitorando il livello dell'acqua; il principale difetto di questo metodo è dovuto alla posizione della burette che dovrebbe essere continuamente regolata in modo da mantenere la differenza di altezza costante. Un'ulteriore colonna d'acqua dovrebbe essere impostata senza il provino per misurare l'evaporazione dell'acqua nel sistema. Tuttavia le condizioni di equilibrio non possono essere valutate misurando l'afflusso e il deflusso dell'acqua dal provino, per misurare il contenuto d'acqua è necessario rimuovere il provino dall'apparecchiatura. Il contenuto d'acqua misurato è un valore medio a cui corrisponde un valore di suzione.

Questa assunzione è ragionevole per terreni a grana fine con graduale cambiamento della dimensione dei pori, la stessa assunzione non può essere estesa a terreni a grana grossa. La suzione varia linearmente con l'altezza del provino e perciò il contenuto d'acqua

cambia lungo l'altezza del provino, questa variazione è importante nei terreni a grana grossa e quindi alcune correzioni devono essere introdotte misurando la curva di ritenzione per bassi livelli di suzione.

Un altro tipo di colonna d'acqua sospesa è quella presentata nel modello ASTM. L'apparato consiste in una camera con provino, un tubo misuratore di deflusso e un manometro. I volumi d'acqua fluiscono dentro e fuori il provino durante il test e sono misurati usando un tubo capillare connesso alla fine della camera con provino. L'altra parte del tubo capillare è connessa ad un sistema di controllo del vuoto costituito da due serbatoi. L'altezza relativa di questi due serbatoi è regolata a mantenere una pressione subatmosferica dell'acqua dentro il tubo. Il tubo capillare è disposto orizzontalmente alla stessa altezza del fondo del provino perciò la suzione applicata è registrata con un manometro. Il principale vantaggio di questa versione consiste nel fatto che l'equilibrio è stabilito quando l'acqua smette di fluire dentro e fuori il provino senza necessità di continue regolazioni all'altezza relativa del serbatoio, in modo da mantenere una suzione costante.

## 2.2 Tecnica della traslazione degli assi

Questa procedura coinvolge la traslazione della pressione dell'aria nei pori, attraverso l'incremento artificiale della pressione atmosferica in cui il terreno è immerso. Conseguentemente la pressione negativa dell'acqua incrementa di uguale quantità, se assumiamo le particelle del terreno e l'acqua incomprimibili.

Si possono applicare due procedure a questo metodo, una chiamata sovrappressione dell'aria e una sottopressione dell'acqua. Il primo metodo trasla la pressione dell'acqua nel campo positivo, ma regola la suzione sotto una pressione d'aria costante e pressione dell'acqua variabile. D'altra parte, applicando il secondo metodo, la suzione è impostata mantenendo costante la pressione dell'acqua. La prima applicazione della traslazione degli assi utilizza il secondo metodo, mantenendo la pressione dell'acqua sotto condizioni atmosferiche, tuttavia la pressione dell'aria aumentata a elevati gradi di saturazione può indurre disposizioni irreversibili dello scheletro solido dovuto alla compressione del fluido nei pori (bolle d'aria).

Due tipi di interfacce di pressione differenziale possono essere usate per applicare la traslazione degli assi: membrane di cellulosa acetata o alti valori di aria in entrata (HAEV) nel disco ceramico. I maggiori problemi nell'applicazione della traslazione degli assi sono associati all'accumulo di aria sotto il disco ceramico e al controllo dell'umidità relativa nel

sistema aperto delle linee di pressione dell'aria. Il primo fenomeno può indurre la perdita progressiva di continuità tra l'acqua nei pori e l'acqua nel sistema di misurazione. Questo abbassamento del trasferimento di fase liquida può portare a restringimento causato dall'evaporazione dell'acqua nel terreno. Abbiamo bisogno di un dispositivo per sciacquare le bolle d'aria al di sotto del disco. La pressione d'aria applicata ha un effetto significativo sulle misurazioni di scambio d'acqua, per questo motivo il valore della diffusione dell'aria dovrebbe essere misurato per ogni apparato di traslazione degli assi. Per tenere conto dei cambiamenti del contenuto d'acqua nel provino durante tutto il test, il volume d'aria diffusa deve essere misurato e deve essere fatta una correzione al cambiamento di volume d'acqua. Questo compito è realizzato da acqua fluente fuori dal disco di ceramica in una buretta, dove il volume d'aria causa cambiamento nel livello d'acqua che può essere misurato.

La suzione in due provini (chiamiamoli A e B) può essere diversa da uno all'altro nonostante abbiano la stessa densità secca, volume totale e contenuto d'acqua. Questo può essere attribuito all'arrangiamento delle particelle e alla quantità di bolle d'aria che può essere diverso tra i provini poiché dipende dal grado di compattazione. La fase acquosa può essere discontinua dovuta alla presenza di bolle d'aria (A). L'aria intrappolata dentro le bolle può non essere effettiva e quindi il contenuto di acqua di A può essere basso e può portare ad una suzione sovrastimata rispetto al provino senza bolle (B). La diffusione dell'aria attraverso i pori impone anche un limite pratico alla durata del test. Ci sono tre processi chiave legati alla diffusione dell'aria:

1. Valutare la quantità di aria dissolta nell'acqua nei pori del terreno mediante la legge di Henry.
2. Calcolare l'aria dissolta attraverso i pori d'acqua nel disco attraverso la legge di Fick.
3. Valutare l'aria uscita dalla soluzione nelle linee d'acqua drenate.

Incrementare la pressione dell'acqua è un modo efficiente per ridurre i valori di aria diffusa per una data configurazione di elementi d'interfaccia e per specifiche suzioni. Per quanto riguarda il secondo fenomeno di vapore trasferito tra il terreno e la linea di pressione dell'aria (sistema aperto a vapore), può essere controllato con una trappola di vapore che mantiene un'alta umidità relativa nella camera. I flussi evaporativi sono originati dalla differenza in pressione di vapore tra i vuoti del terreno e l'aria in questa camera, come rappresentato in Figura 14.

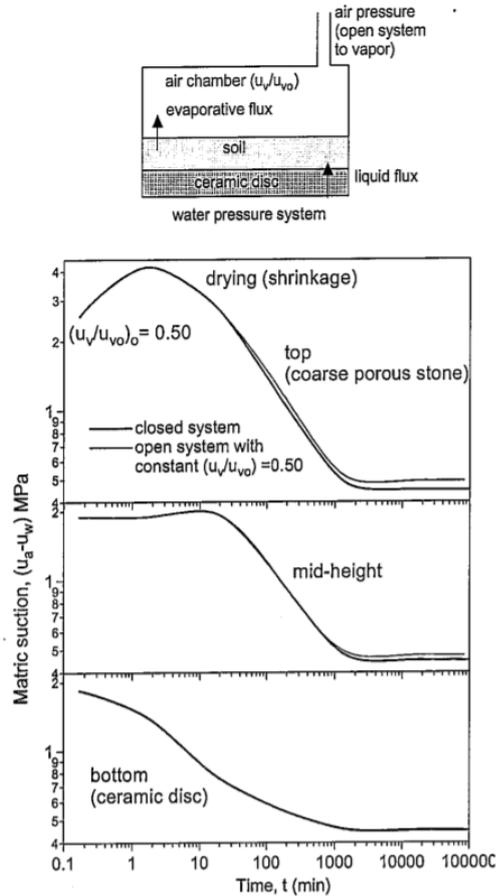


Figura 14: Andamento della suzione nel tempo durante un percorso di imbibizione (Romero, 1999)

Una serie di analisi idrauliche 1D furono effettuate da Romero et al. (2001) per simulare i flussi evaporativi e l'evoluzione della suzione in un'argilla durante un percorso umido in configurazione aperta e chiusa. Le analisi prendevano in considerazione il flusso di fase liquida con la legge di Darcy e la diffusione di vapore con la legge di Fick. La simulazione fu fatta anche con un codice agli elementi finiti.

La Figura 14 mostra l'evoluzione nel tempo della suzione durante un percorso di imbibizione per tre punti rappresentativi del provino, in cima a metà e in fondo a contatto con il disco di ceramica.

Il principale obiettivo delle simulazioni era verificare il livellamento della suzione applicata attraverso l'altezza del provino, sia in condizioni di sistema chiuso che aperto. Due differenti flussi d'acqua sono coinvolti nel processo: innanzitutto un flusso evaporativo che secca l'argilla dipendente sia dalle proprietà del terreno che dalle condizioni al contorno, secondariamente un flusso liquido attraverso il disco di ceramica che è dipendente dal terreno e dalla permeabilità del disco di ceramica. In accordo con la Figura 14 l'evaporazione dell'acqua causerà un iniziale essiccamento della superficie superiore

dell'argilla, questo scenderà progressivamente. Dall'altra parte la riduzione di suzione è registrata al fondo del provino.

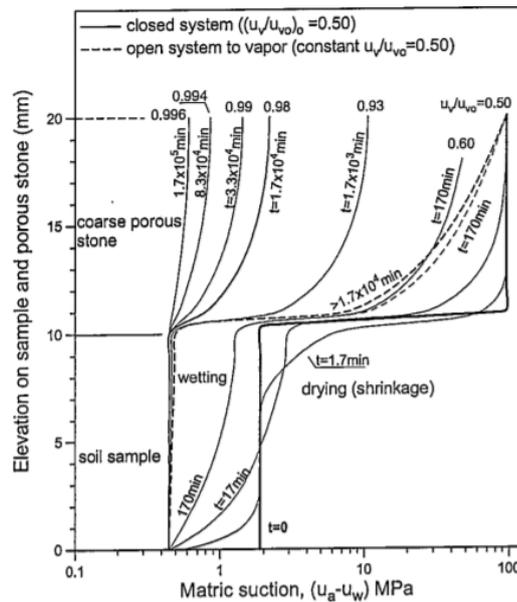


Figura 15: Isocrone di suzione (Romero, 1999)

La Figura 15 mostra le isocrone di suzione ottenute da un'analisi numerica a 8 diversi istanti. Sono rappresentate le simulazioni sia del sistema chiuso che aperto. Raggiunto il valore di umidità relativa sul bordo superiore, nella simulazione a sistema chiuso ai differenti istanti, sono indicati in Figura 15.

Come osservato in Figura 14 e Figura 15, alla fine del percorso di imbibizione la suzione si eguaglia per tutta l'altezza del provino ma non nel sistema aperto. Questo perché è importante garantire un elevato valore di umidità relativa, nel sistema di pressione d'aria, in modo da raggiungere questa uguaglianza. Gli stessi risultati possono essere ottenuti controllando il flusso evaporativo misurato sotto condizioni di stato costante con l'indicatore di cambiamento di volume d'acqua connesso al circuito di pressione dell'acqua. Flussi evaporativi più alti di  $1 \times 10^{-6} \frac{\text{mm}^3/\text{s}}{\text{mm}^2}$  sono probabilmente associati con valori inaccettabili di trasferimento di vapore che impedisce livellazione di suzione per tutta l'altezza del provino. Tuttavia è importante considerare che questo valore può cambiare poiché i flussi evaporativi si riducono con l'aumentare della suzione, con l'aumentare dell'umidità relativa nell'aria della camera e con minore porosità del terreno.

In un terreno non saturo la suzione di matrice corrisponde alla differenza tra la pressione dell'aria (tipicamente zero) e la pressione dell'acqua (di solito negativa rispetto alla

pressione atmosferica). La tecnica di traslazione degli assi può misurare suzioni di matrice molto più grandi di 100 kPa in laboratorio senza problemi di cavitazione.

## 2.3 Tecnica dell'equilibrio di vapore

Due principali metodi sono indicati di seguito:

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

La prima tecnica è implementata controllando l'umidità relativa di un sistema chiuso, a massa costante, rispetto al vapore. In questo modo, il potenziale acquoso del terreno è applicato tramite la migrazione di molecole d'acqua attraverso la fase di vapore da un sistema di riferimento di potenziale noto ai pori del terreno, finché l'equilibrio è raggiunto. La relazione termodinamica tra la suzione totale dell'umidità del terreno e l'umidità relativa di un sistema di vapore di riferimento,  $u_v/u_w$ , è data dalla legge psicrometrica, Equazione 14.

L'umidità relativa può essere controllata variando il potenziale chimico di differenti soluzioni acquose, sia non volatili (sali e soluzioni basiche) sia volatili (soluzioni acide). Queste due procedure possono essere eseguite per il graduale cambiamento della suzione totale, nominalmente usando differenti soluzioni saline o selezionando un tipo di soluzione acquosa a cui la quantità di soluto è progressivamente variata in modo da raggiungere il valore di umidità relativa predeterminato.

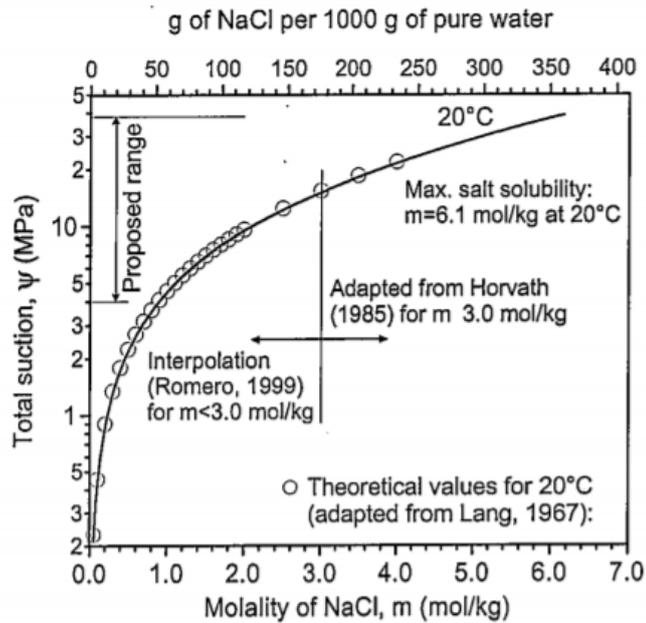


Figura 16: Relazione tra suzione totale e concentrazione di NaCl in soluzione acquosa (Romero, 2001)

La Figura 16 mostra la relazione tra la suzione totale  $\psi$  e la concentrazione di NaCl in soluzione acquosa. 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:

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

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

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

Equazione 18

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 indurre cambiamenti di suzione totale dovuti all'effetto della temperatura sulla pressione di vapore e la prossimità al punto di rugiada.

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

Equazione 19

L'equazione sopra riportata mostra il cambiamento della suzione totale dovuto all'effetto della pressione di vapore. Nell'equazione R è la costante di gas molare, T la temperatura

assoluta del sistema di riferimento,  $M_w$  la massa molecolare dell'acqua,  $\rho_w$  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  $\pm 1,8\text{MPa}$ , dovuto agli effetti della temperatura sulla pressione di vapore.

Compound	T (°C)	A (%)	B (K)	$u_v/u_{v0}$ (%) a 25 °C	$\psi$ (MPa) a 25 °C	Solubility (g/100 g H <sub>2</sub> O) 30 °C
NaOH·H <sub>2</sub> O	15-60	5.48	27	6	386	113
LiBr·2H <sub>2</sub> O	10-30	0.23	996	6	386	193
ZnBr <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	5-30	1.69	455	8	347	529
KOH·2H <sub>2</sub> O	5-30	0.014	1924	9	330	128
LiCl·H <sub>2</sub> O	20-65	14.53	-75	11	303	86
CaBr <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	11-22	0.17	1360	16	251	170*
LiI·3H <sub>2</sub> O	15-65	0.15	1424	18	235	170
CaCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	15-25	0.11	1653	29	170	97*
MgCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5-45	29.26	34	33	152	57*
NaI·2H <sub>2</sub> O	5-45	3.62	702	38	133	192
K <sub>2</sub> CO <sub>3</sub> ·2H <sub>2</sub> O	20			44	112	113
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	10-30	1.89	981	51	92	156
Mg(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5-35	25.28	220	53	87	74*
NaBr·2H <sub>2</sub> O	0-35	20.49	308	58	75	98
NaNO <sub>2</sub>	20			66	57	88
KI	5-30	29.35	254	69	51	153
SrCl <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	5-30	31.58	241	71	47	57*
NaNO <sub>3</sub>	10-40	26.94	302	74	41	95
NaCl	10-40	69.20	25	75	39	36
NH <sub>4</sub> Cl	10-40	35.67	235	79	32	41
KBr	5-25	40.98	203	81	29	71
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	10-40	62.06	79	81	29	78
KCl	5-25	49.38	159	84	24	37
Sr(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	5-25	28.34	328	85	22	89
BaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	5-25	69.99	75	90	14	38
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	20			91	13	62*
CaI	5-25	70.77	75	91	13	95
KNO <sub>3</sub>	0-50	43.22	225	92	11	46
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	20			97	4	24*
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	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. La solubilità è definita come la concentrazione di un composto in una soluzione che è in equilibrio con la fase cristallina più stabile alla specifica temperatura. Tuttavia, i cambiamenti di solubilità avvengono quando la fase solida cambia da una fase idratata ad un'altra.

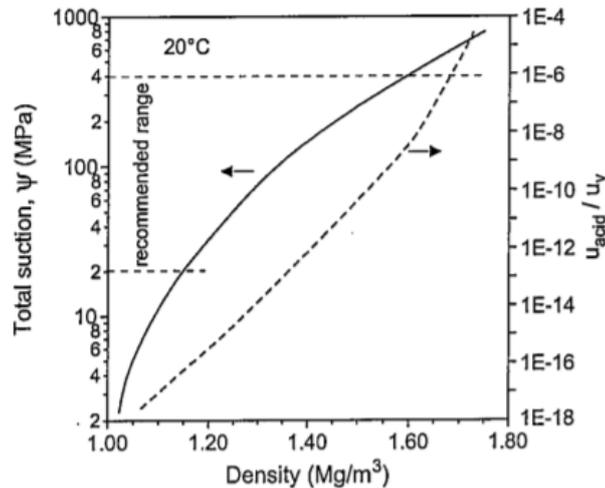


Figura 18: Relazione tra suzione totale e densità (Romero, 2001)

La Figura 18 mostra la relazione tra la suzione totale  $\psi$  e la densità della soluzione totale a 20°C. I valori di umidità relativa più alti di 0,86 sono difficili da controllare tramite la regolazione della densità della soluzione, che è il metodo usato per controllare la concentrazione. Dall'altra parte valori di  $u_v/u_w < 0,05$  originano pressioni di vapore del solvente relative a pressioni di vapore del soluto più alte di  $1 \times 10^{-6}$  a temperatura ambiente, che può comportare interazione con la struttura del terreno.

Il vapore può essere trasportato per semplice diffusione o usando un circuito di convezione forzata con una pompa d'aria. Nella semplice diffusione o metodo statico, il campione è piazzato in un essiccatore con la soluzione di concentrazione nota a temperatura costante. Un limite di questo metodo è il tempo di raggiungimento di equilibrio tra provino e soluzione. L'assorbimento/deassorbimento dell'acqua avviene in un periodo di 3 settimane (per terreni argillosi con distanze di drenaggio di 10 mm). D'altra parte il trasporto di vapore di convezione forzata, guidata da una pompa ad aria e controllata da un flussometro, è la tecnica più efficiente. Le due procedure possono essere effettuate, anche passando lungo i bordi del campione o attraversando il provino. Quest'ultima procedura, di attraversamento del campione, è meno dispendiosa in termini di tempo, ma è limitata a terreni che presentano continuità d'aria associati con gradi di saturazione  $< 0,90$ .

## 2.4 Tecnica della carta da filtro

### 2.4.1 Cenni Storici

Shull fu probabilmente il primo ricercatore ad utilizzare il fenomeno dell'assorbimento come strumento per misurare la suzione. Sulla base della scoperta di membrane semipermeabili sui semi di Brown e Schröder, Shull aveva usato semi appositamente selezionati come materiale assorbente. La sua intenzione era di misurare "la forza con cui le particelle di terreno di varia finezza trattengono l'umidità a diversi gradi di secchezza." Shull sottolinea che la caratteristica semipermeabile del seme non è importante. Per i semi con una membrana semipermeabile, la calibrazione è stata eseguita per mezzo osmotico e per semi senza la membrana semipermeabile, è stato utilizzato il metodo di pressione del vapore.

La calibrazione dei semi consisteva essenzialmente nella misurazione del contenuto di acqua di equilibrio dei semi essiccati all'aria su diverse concentrazioni di acido solforico. Shull enfatizzò che lo spazio d'aria rimasto nel sistema per essere portato in equilibrio con la pressione del vapore della soluzione era molto piccolo, e sembrava che tutto il sistema di liquido, aria e seme raggiungesse un equilibrio nel periodo dell'esperimento (15 giorni), tranne forse nel caso di acqua pura. Durante la misurazione di suzione, dopo i semi, il terreno aveva raggiunto l'equilibrio, i semi erano pesati e il contenuto d'acqua determinato. Utilizzando una curva di calibrazione, che ha correlato il contenuto di acqua dei semi alla pressione di vapore, era possibile ottenere la suzione del terreno in particolari condizioni. La fonte principale di errore si è conclusa per evaporazione durante la manipolazione dei semi dopo aver raggiunto l'equilibrio.

Usando il concetto di assorbimento, Hansen fece uso del filtro di carta per ottenere la suzione del terreno. Le carte da filtro sature con soluzioni di zucchero e pressione del vapore precedentemente determinata sono state inserite in un ambiente chiuso con il campione di terreno, ma senza contatto con esso. Dopo aver lasciato il tempo per raggiungere l'equilibrio, la carta da filtro era pesata e a seconda che la carta perda o aumenti di peso, la suzione era superiore o inferiore alla corrispondente pressione di vapore della soluzione zuccherina utilizzata. Il metodo non ha tenuto conto dell'effetto capillare nella carta da filtro e ha assunto solo che la tensione di vapore della soluzione, misurata con una soluzione d'aria d'interfaccia piatta, ha dato la corrispondente suzione. La tecnica usata da Hansen non richiede una calibrazione della carta da filtro, poiché la soluzione zuccherina è il riferimento.

Gardner fu probabilmente il primo ricercatore a usare la carta da filtro come materiale assorbente, senza alcuna soluzione precedentemente assorbita. Il metodo adottato da Gardner era essenzialmente come quello usato da Shull. L'uso di carta da filtro come materiale assorbente ha dato più affidabilità alla misurazione, dal momento che il processo industriale coinvolto nella produzione della carta garantisce che le caratteristiche di assorbimento della carta da filtro siano essenzialmente le stesse e siano indipendenti dalla scatola o dal lotto utilizzato.

## 2.4.2 Metodo

Tra tutti i metodi noti di misurazione della suzione, la tecnica della carta filtro è l'unico metodo dalla quale sia la suzione totale che quella matriciale possono essere dedotte. Utilizzando il metodo della carta da filtro, il campione di terreno e anche la carta da filtro vengono portati all'equilibrio dell'umidità in contatto (suzione matriciale) o non in contatto diretto (suzione totale) in un ambiente a temperatura costante (Figura 19).

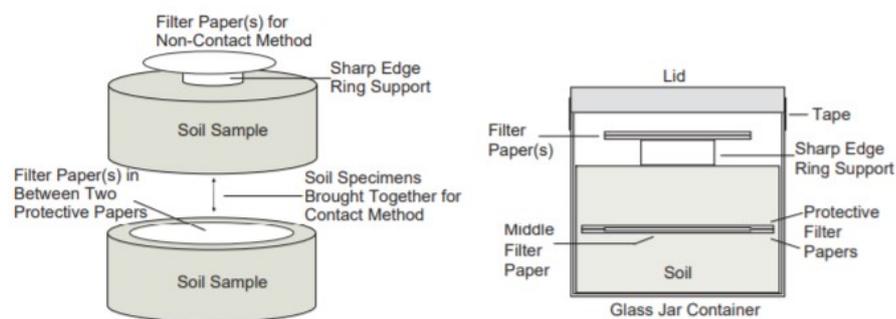


Figura 19: Metodo della carta da filtro (Bulut e Leong, 2008)

Il contatto diretto tra la carta da filtro e il terreno permette all'acqua nella fase liquida e ai soluti di scambiarsi liberamente, mentre la separazione tra il filtro di carta e il terreno, da una barriera al vapore, scambia solo con la fase vapore e previene il movimento del soluto. Le misure di suzione di matrice, usando il metodo della carta da filtro, sono simili alle misurazioni di suzione totale tranne che per il contatto intimo che deve essere fornito tra la carta da filtro e il terreno, Figura 19. Dopo che è stato stabilito l'equilibrio tra la carta da filtro e il terreno, il contenuto di acqua della carta da filtro viene misurato. Quindi, utilizzando la carta filtro con appropriata curva di calibrazione, viene stimata la suzione del terreno. Le curve di calibrazione sono generalmente ottenute da processi di imbibizione e essiccazione delle carte da filtro attraverso il trasferimento del vapore (soluzioni saline) e essiccazione e imbibizione delle carte da filtro attraverso il

trasferimento di liquidi. Ci sono ancora molte preoccupazioni riguardo all'affidabilità del metodo della carta da filtro. La carta da filtro è una tecnica semplice e può essere affidabile se i principi di base del metodo sono rigorosamente praticati e attentamente seguiti.

Quando il terreno umido viene posto a contatto 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. Se la suzione contro la relazione del contenuto d'acqua è determinata per il materiale poroso, la suzione del terreno può essere ottenuta facendo riferimento alla curva di calibrazione.

Tutte le tecniche di misurazione della suzione richiedono uno scambio di acqua tra il terreno e il sistema di misurazione. Il sistema può assorbire l'acqua dal terreno o perdere acqua nel terreno. Di solito il metodo della carta da filtro viene utilizzato con l'acqua che è assorbita dalla carta. L'assorbimento di acqua dalla carta da filtro può avvenire in due modi: a flusso di vapore o flusso di liquido (Figura 20, Marinho e Oliveira (2006)).

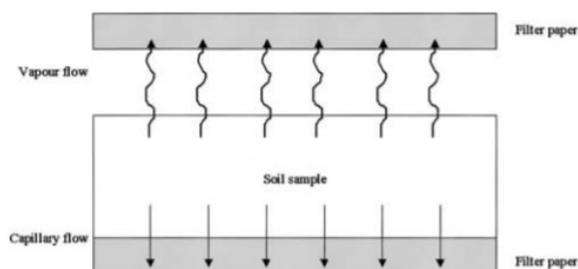


Figura 20: Flusso di vapore attraverso il provino, Marinho e Oliveira (2006)

Nella situazione del flusso di vapore, le molecole d'acqua devono evaporare dal terreno superando la suzione matriciale nel terreno e anche l'eventuale suzione osmotica 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. Il flusso di liquido avviene attraverso le particelle del terreno e filtra le fibre di carta, senza che l'acqua rompa la sua continuità. Il flusso capillare implica un'interazione tra la carta da filtro e i pori d'acqua del terreno cioè con sali, ecc.

Se il flusso si verifica solo per trasferimento di vapore, la carta filtro misura la 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.

È comune quando si misura la suzione totale posizionare il filtro di carta su un disco inerte perforato o una maglia di materiale inerte per evitare il contatto con l'acqua del terreno o con qualsiasi altra soluzione o soluto. Il flusso di vapore attraverso i fori è studiato dai biologi che sono interessati alla diffusione attraverso i pori delle piante.

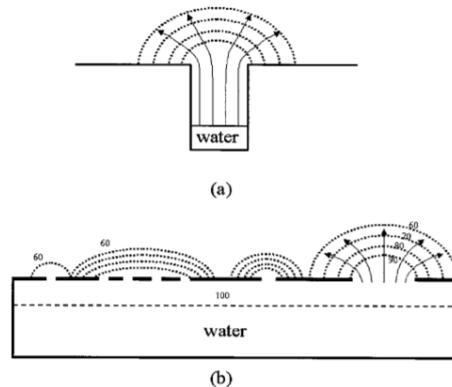


Figura 21: Rappresentazione schematica del flusso attraverso i fori, Marinho e Oliveira (2006)

La Figura 21 mostra una rappresentazione schematica del flusso di vapore attraverso i fori. In Figura 21a le linee di flusso indicate dalle frecce intersecano le superfici di uguale concentrazione di vapore acqueo. Il modello mostrato in Figura 21a è simile a quello del vapore che esce dai pori del terreno. Nel particolare caso di un disco perforato, con diverse dimensioni del foro, il modello è più complicato, come mostrato in Figura 21b da Coult (1973). La distanza tra il disco e una linea di uguale concentrazione di vapore acqueo aumenta con l'aumentare della dimensione del foro per un sistema aperto. Se si considera il sistema chiuso, le linee di umidità iso-relativa dovrebbero inizialmente seguire lo stesso schema del sistema aperto, l'umidità relativa è solitamente bassa all'interno del sistema di equilibrio e in seguito l'iso-linea dell'umidità relativa dovrebbe tendere ad essere in equilibrio nel tempo. Questo periodo di tempo dipenderà da fattori come il volume dell'ambiente, l'umidità relativa iniziale, e la temperatura. Quando la durata è inferiore al tempo di equilibrio per l'intero ambiente, il contenuto di acqua della carta filtro dipenderà dalla sua distanza dalla fonte di vapore. Marinho (1994) ha mostrato che aumentando la distanza tra il filtro di carta e la superficie dell'acqua da 12 a 62 mm si riduce il contenuto d'acqua, per lo stesso periodo di misurazione, di circa il 5%.

### 2.4.3 Calibrazione della carta da filtro

Lo stato di equilibrio fornisce la stessa suzione sia nel terreno che nel materiale poroso ma diverso contenuto di acqua. Il tempo di equilibrio è molto importante per ottenere una misurazione corretta. La carta da filtro dovrebbe essere usata direttamente dalla scatola. Lo standard ASTM per il metodo di carta da filtro D 5298-92 suggerisce che la carta da filtro debba essere asciugata nel forno per almeno 16 h prima dell'uso. Questa procedura può influire sulle caratteristiche di assorbimento della carta, che potrebbe richiedere una calibrazione appropriata. Marinho Oliveira (2006).

Le equazioni di calibrazione dovrebbero essere sviluppate per la carta da filtro specifica utilizzata. Le carte filtranti più usate sono Whatman n.42 e Schleicher & Schuell No. 589.

Numerosi ricercatori hanno studiato le tecniche di calibrazione per il metodo della carta filtro a partire da Houston et al., 1994, Bulut et al. 2001 e Leong et al. 2002.

Fino a Houston et al. (1994) tutte le misurazioni di suzione erano basate su un'unica curva di calibrazione. Houston et al. (1994) hanno sviluppato due curve di calibrazione per filtro Fisher (9.54 A), una per suzione totale e una per suzione matriciale, e hanno asserito che le curve erano diverse. Bulut et al. (2001) hanno sviluppato due curve di calibrazione per carte da filtro tipo Schleicher & Schuell No. 589-WH: uno dal processo di imbibizione, dal filtro inizialmente asciutto, attraverso il flusso di vapore usando soluzioni di NaCl. Uno dal processo di essiccazione, da inizialmente saturo, filtrando le carte attraverso il flusso del fluido usando piastre di pressione e membrane. Leong et al. (2002) hanno sviluppato diverse curve di calibrazione per suzione totale e di matrice per carte da filtro tipo Whatman n. 42 e Schleicher & Schuell No. 589-WH da inizialmente asciutte, filtrando le carte usando soluzioni NaCl e piastra di pressione.

Le curve di calibrazione costruite da Leong et al.(2002) e Bulut and Wray (2005) sono date in Figura 22. In uno studio più recente, Bulut e Wray (2005) hanno rivalutato il metodo della carta filtro basato su una nuova curva di calibrazione.

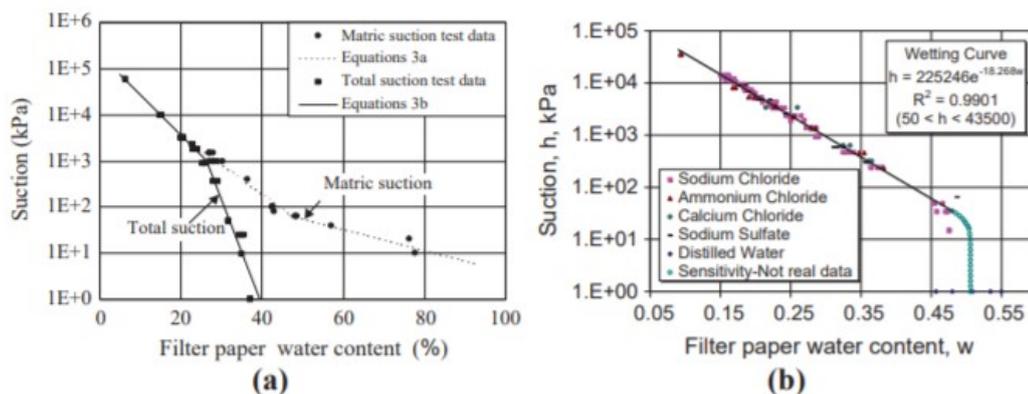


Figura 22: curve di calibrazione con suzione totale e di matrice per filtro Whatman n.42 (Leong et. al 2002) e Schleicher & Schuell n. 589 (Bulut and Wray 2005)

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. Diversi metodi possono essere utilizzati per generare la suzione per la calibrazione.

Technique	Range Used for Filter Paper Calibration	Comments
Suction Plate	0–0.1 MPa	Direct negative pore water pressure generation.
Field Samples	0–2 MPa	Uses the ability of plastic soils to sustain the equivalent mean effective stress when unloaded under undrained conditions. The matric suction is assumed to be numerically equal to the mean effective stress of the sample in the ground. It is necessary to assume a value for $K_0$ .
Oedometer Samples	1 MPa–2 MPa	Assumes truly one-dimensional and undrained unloading. The average effective consolidation stress applied should be numerically equal to the matric suction in the unloaded sample. It is necessary to assume a value for $K_0$ .
Pressure Plate	0–1.5 MPa	Uses the axis translation technique.
Desiccator	0.5 MPa–30 MPa	A salt solution, with a known vapor pressure, is used. The filter paper is placed in a closed environment with the solution. The transference of water is by vapor. The equilibrium is reached when the affinity for water of the salt solution used and the filter paper are equalized.

Figura 23: Tecniche utilizzate per il metodo della carta filtro, Marinho e Oliveira (2006)

Le tecniche principali e la loro gamma abituale di suzione sono presentate nella Figura 23. Dai metodi presentati in Figura 23, l'unico in cui l'acqua viene trasferita alla carta da filtro dal vapore è il metodo dell'essiccatore. La principale conseguenza di questo metodo è legata al tempo di equilibrio, come verrà mostrato. L'idea alla base della tecnica è generare umidità relativa in ambiente chiuso in cui è posizionata la carta da filtro.

Dal momento che l'umidità relativa è nota, la suzione totale generata può essere ottenuta usando la legge di Kelvin (Equazione 14).

Qualsiasi materiale nello stesso ambiente chiuso stabilirà un equilibrio di energia libera. In altre parole, ci sarà uno scambio di umidità dall'aria al materiale o viceversa, fino al raggiungimento dell'equilibrio. La maggior parte dei dispositivi per misurare la suzione del terreno richiedono uno scambio d'acqua tra il campione e lo strumento. Questo è il caso per il tensiometro, blocco di gesso e carta da filtro. In tutte queste tecniche, il terreno e lo strumento devono raggiungere qualche tipo di equilibrio. Lo scambio di acqua tra il terreno e il sensore deve essere ridotto al minimo, affinché la misurazione sia considerata adeguata.

Questo equilibrio è un riferimento per qualsiasi calibrazione. Tutte le condizioni utilizzate durante la calibrazione devono essere seguite durante la misurazione, incluso il tempo di equilibrio. La procedura di calibrazione per la carta da filtro consiste nel consentirle di raggiungere l'equilibrio con una suzione nota. Dopo aver raggiunto questo equilibrio, la carta da filtro viene pesata e asciugata in forno. Il contenuto d'acqua viene quindi ottenuto e correlato alla suzione generata. Sono necessarie diverse misurazioni per coprire l'intervallo necessario di suzione. La scelta del metodo per generare la suzione dipende dal livello di suzione richiesto. La maggior parte delle curve di calibrazione per la carta filtro consistono in due parti e sono chiaramente identificate sulla curva di calibrazione. Fawcett e CollisGeorge (1967) hanno presentato i risultati della calibrazione della carta da filtro di Whatman No.42. Nel loro lavoro, i filtri sono stati trattati con Soluzione di  $HgCl_2$  con l'intenzione di fermare la crescita di funghi e batteri. Le carte da filtro sono state calibrate da una condizione di aria secca e, quindi, è stato usato il percorso di imbibizione.

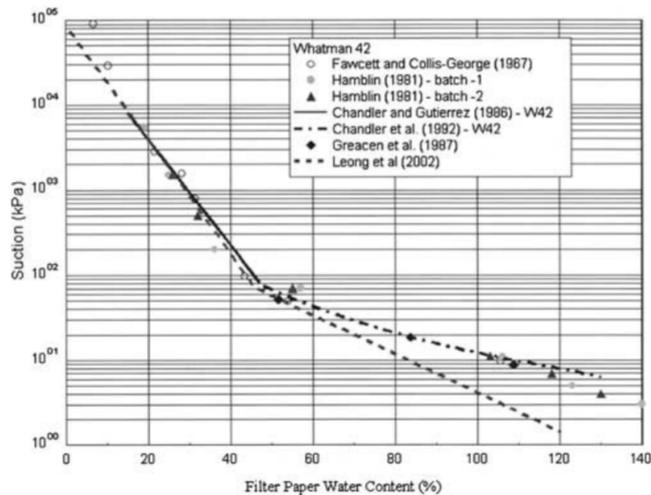


Figura 24: Curva di calibrazione per la carta filtro tipo Whatman No. 42, Marinho e Oliveira (2006)

La Figura 24 presenta i punti di calibrazione ottenuti da Fawcett e Collis-George. Si può notare che la relazione è di tipo non lineare e che una relazione bi-lineare può essere adottata. Sono state analizzate le carte da filtro di diversi lotti ed è stata osservata una ragionevole coerenza nei risultati.

Hamblin (1981) ha eseguito le calibrazioni su due lotti di carta da filtro Whatman No. 42. Uno dei lotti è stato trattato contro la decomposizione biologica e l'altro lotto, ottenuto due anni dopo, non è stato trattato. La calibrazione è stata eseguita utilizzando la piastra di suzione fino a 7 kPa, piastra di pressione fino a 70 kPa, membrana di pressione verso l'alto a 1,5 MPa e essiccatore per suzioni superiori a 5 MPa. Il tempo massimo di equilibrio riportato da Hamblin era 36 h per i punti ottenuti usando l'essiccatore. Non ci sono state differenze nella calibrazione tra i lotti. Come si può vedere in figura 20, i risultati ottenuti da Hamblin erano in accordo con la calibrazione eseguita da Fawcett e Collis-George.

Chandler e Gutierrez (1986) hanno presentato una curva di calibrazione per carta da filtro Whatman No. 42 che includeva i propri risultati e anche quelli di Fawcett e Collis-George e Hamblin. La tecnica utilizzata per generare i loro dati era consolidare i campioni di terreno nell'edometro a uno stress efficace noto e scaricarli in condizioni non drenate. La suzione matriciale si è ipotizzata uguale allo stress effettivo medio. La gamma di suzione generata con questo metodo era compresa tra circa 6 kPa e 2000 kPa. Tuttavia, allo scopo di determinare la curva di calibrazione, erano presenti solo valori superiori a 80 kPa. A quel punto hanno concluso che i loro risultati hanno mostrato considerevole variabilità a valori inferiori a 80 kPa e il metodo utilizzato era inaffidabile per tensioni più basse. Più tardi, una curva di calibrazione per suzioni inferiori a 80 kPa è stata presentata da Chandler et al. (1992). Le curve di calibrazione sono mostrate in figura 20.

Questa calibrazione è stata ottenuta utilizzando una piastra di pressione, campioni triassiali, campioni di edometro e, nel limite, immergendo la carta da filtro in acqua distillata.

La calibrazione includeva anche punti ottenuti da Fawcett e Collis-George e Hamblin. Considerando che tutti i dati utilizzati da Chandler e Gutierrez sono da molti lotti diversi, si può concludere che le carte da filtro usate avevano un comportamento coerente e ripetibile. Leong et al. (2002) hanno presentato due curve di calibrazione per la carta da filtro Whatman No. 42. Uno è stato ottenuto utilizzando la piastra di pressione e l'altro utilizzando soluzioni saline come fonte di suzione generate tramite umidità relativa. I tempi di equilibratura usati per ottenere i punti di calibrazione sono stati: da 2 a 5 giorni per la piastra di pressione e fino a 14 giorni per la soluzione salina. La figura 20 presenta la curva di calibrazione ottenuta da Leong et al. (2002) utilizzando la piastra di pressione, quindi la carta filtro era in contatto con la suzione matriciale generata.

La calibrazione della carta da filtro utilizzata per lo studio condotto da Marinho e Oliveira (2006) ha una regola base per la distanza tra la carta da filtro e la fonte d'acqua e il tempo di equilibrio consentito. Va sottolineato che la misurazione del tempo di equilibrio della suzione totale è superiore a quello della misurazione della suzione matriciale. I punti di calibrazione sono stati ottenuti utilizzando la piastra di suzione del trasferimento del fluido e la piastra di pressione del trasferimento del vapore mediante soluzione salina. Per valutare il tempo di equilibrio richiesto per la misurazione di suzione totale, sono stati eseguiti una serie di test con soluzione salina e acqua pura. Il sistema consisteva in un contenitore in PVC con una scatola isolante circostante. Il contenitore in PVC è stato inserito all'interno della scatola isolante i cui lati erano 20 cm di fogli di polistirene che erano coperti di legno. L'intero sistema è stato inserito in un ambiente con controllo della temperatura di  $\pm 5^\circ \text{C}$ . La carta da filtro era posta sopra un disco perforato e lo spazio tra la carta filtro e la fonte di vapore era di 8 mm. Marinho (1994) ha mostrato che la distanza alla quale viene posizionata la carta da filtro influisce sull'umidità in un dato momento. È necessario associare il divario e il tempo di equilibrio utilizzati. La suzione generata per l'assorbimento del vapore era 469 kPa, 206 kPa, 115 kPa e 0 kPa. I tempi di equilibrio per le misurazioni della suzione totale sono riportati in Figura 25.

Total Suction Range (kPa)	Equilibration Time Suggested
0–100	Not determined, but certainly more than 30 days
100–250	30 days
250–1000	15 days
1000–30000	7 days

*Figura 25: Tempi di equilibrio per il raggiungimento della suzione nelle carte da filtro tipo Whatman No. 42, Marinho e Oliveira (2006)*

A causa delle difficoltà nel mantenere costante la temperatura, la tecnica di equilibrio del vapore dovrebbe essere usata solo per il disidratatore per suzioni superiori a 1 MPa. A questo livello di suzione, il tempo di equilibrio è solitamente più breve rispetto a valori più bassi. Sebbene la tecnica di non contatto che utilizza la soluzione salina per la calibrazione non sia solitamente utilizzata per una bassa suzione, è importante comprendere i fenomeni coinvolti, in modo da essere in grado di interpretare la misurazione della suzione totale a bassi livelli. Uno dei punti più importanti per ottenere una buona misura di suzione è quella di assicurare che la carta da filtro, dopo l'equilibrio, sia rimossa dall'ambiente chiuso senza perdere troppa umidità. La procedura utilizzata da Marinho e Oliveira (2006) ha seguito il suggerimento presentato da Schreiner (1988), dove erano usati i sacchetti di plastica piatti per pesare la carta da filtro dopo averla rimossa dall'ambiente del terreno, anche quando si pesa la carta dal forno. Questa procedura ridurrebbe al minimo la perdita di umidità durante il processo di pesatura. Tuttavia, occorre prestare attenzione per evitare effetti elettrostatici sulle bilance elettroniche dovute al sacchetto di plastica.

In tutte le calibrazioni, è necessario conoscere la grandezza che è stata applicata e, nelle calibrazioni su carta filtro, è fondamentale conoscere l'effettiva suzione generata per correlarla con il contenuto di acqua filtrante della carta.

Duran (1986), indagando l'effetto di non avere un buon contatto tra la carta da filtro e i campioni dell'argilla di Londra, ha presentato alcuni risultati in cui i campioni sono stati consolidati nell'edometro e scaricati in condizioni non drenate. Una carta da filtro è stata quindi posizionata, senza contatto con il terreno, per assorbire l'acqua con il trasferimento del vapore, quindi misurare la suzione totale. Il tempo di equilibrio usato da Duran era di sette giorni. Il contenuto di acqua nella carta ottenuto da Duran senza contatto, quindi la misurazione della suzione totale, è stato direttamente confrontato con la sforzo effettivo applicato nella suzione matriciale in un campione saturo. Tuttavia, è chiaro che la suzione misurata con la carta da filtro fuori contatto con il terreno non può essere correlata allo sforzo efficace applicato nell'edometro. Lo sforzo efficace corrisponde alla suzione

matriciale generata quando il campione è scaricato e non considera alcun componente osmotico possibile. Le misurazioni fatte da Marinho (1994) hanno confermato che la suzione osmotica per le argille di Londra variava da 200 kPa a 500 kPa. Assumendo un valore costante di suzione osmotica per l'argilla di Londra ad esempio 250 kPa e aggiungendolo alla suzione matriciale generata, i risultati concordano ragionevolmente con la curva di calibrazione ottenuta da Chandler e Gutierrez, come si può vedere in Figura 26.

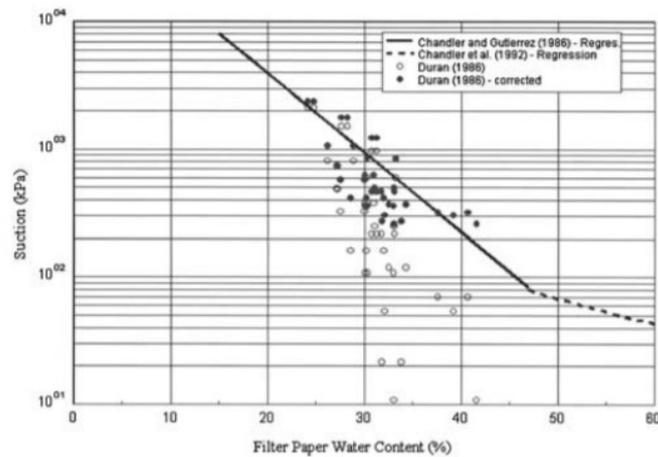


Figura 26: Interpretazione dei dati per la calibrazione della carta filtro, Duran (1986)

È importante sottolineare che per l'uso di campioni di terreno per scopi di calibrazione non è consigliabile utilizzare una tecnica senza contatto, poiché il componente osmotico è solitamente sconosciuto. Questa interpretazione indica che le differenze riscontrate non sono dovute alla curva di calibrazione, ma a causa di un fraintendimento della suzione generata. Per alcuni punti, il tempo di equilibratura usato da Duran per il livello di suzioni totali misurati era più breve di quello suggerito. Va sottolineato che L'ASTM D 5298-92 menzionava un minimo di sette giorni per l'equilibrio senza riferirsi al livello o al tipo di suzione. Molti ricercatori hanno presentato la calibrazione della carta filtro come una relazione unica tra la suzione e l'acqua della carta filtro. Tuttavia, sulla base dei propri dati e anche utilizzando i dati dalla letteratura, ad esempio, Duran, El-Ehwany e Houston, Lee e Wray, Houston et al., Leong et al. hanno suggerito che la curva di calibrazione per la suzione totale dovrebbe essere diversa dalla curva di calibrazione per la suzione matriciale. Bulut et al. (2001) hanno osservato un calo nella curva di calibrazione quando viene utilizzata la generazione di suzione senza contatto, ma per le suzioni inferiori a 30 kPa. La carta da filtro utilizzata era Schleicher & Schuell No. 589. La curva di calibrazione per la carta da filtro è stata ottenuta utilizzando la soluzione di NaCl e il tempo di equilibrio utilizzato è stato di due settimane. Marinho ha effettuato alcuni test con la carta da filtro

Whatman No 42 per indagare sul tempo di equilibrio richiesto per la tecnica senza contatto. È stato costruito un contenitore in PVC per accogliere la carta da filtro sopra la soluzione, con intorno una scatola isolante. Per minimizzare l'effetto della temperatura, il contenitore in PVC è stato collocato all'interno della scatola isolante, che aveva lati di 20 cm realizzato con fogli di polistirolo ricoperti di legno. Lo spazio tra la carta filtro e la fonte di vapore era di 8 mm. Il volume di liquido utilizzato era sempre 500 ml. È stata utilizzata solo una carta filtro per il test; la suzione è stata generata utilizzando soluzioni di NaCl.

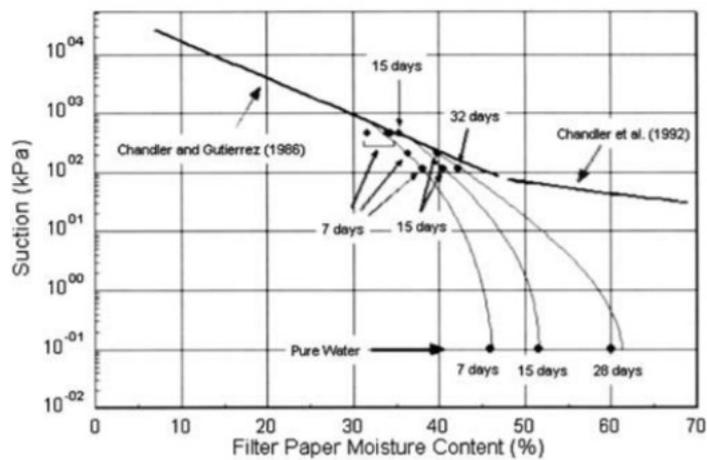


Figura 27: Effetto dei tempi di equilibrio sulle curve di calibrazione, Marinho (1994)

La Figura 27 mostra i risultati dei test eseguiti, mostrando la tendenza del contenuto d'acqua della carta da filtro con l'aumento del tempo di equilibrio. La conclusione di questi risultati è duplice: esiste una sola curva di calibrazione per la carta da filtro indipendentemente dal tipo di suzione e potrebbe non essere pratico misurare suzioni totali inferiori a 100 kPa.

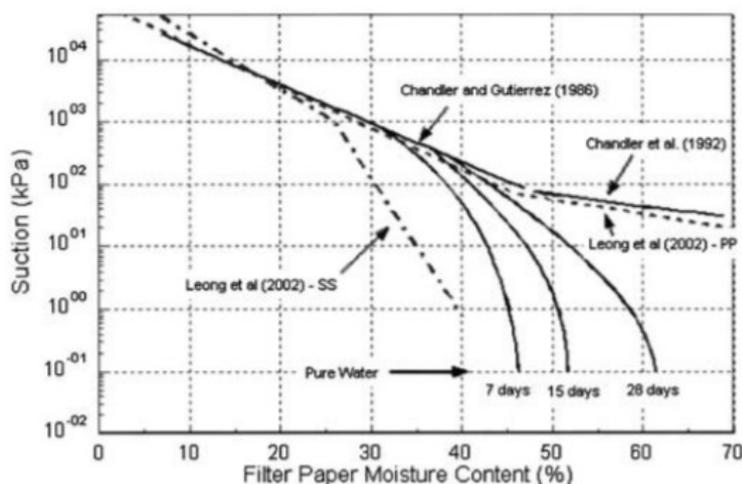


Figura 28: Effetti del tempo di equilibrio e della distanza dalla fonte d'acqua, Marinho e Oliveira (2006)

La Figura 28 presenta le curve di calibrazione ottenute da Chandler e Gutierrez, Chandler et al. e Leong et al., e mostra anche le linee di diverse curve per diversi tempi di equilibrio. Leong et al. presentano due curve di calibrazione; una ottenuta utilizzando l'apparato di piastra a pressione e l'altro dove sono state utilizzate le soluzioni saline. Si può vedere che la curva SS suggerisce che il tempo di equilibrio sta controllando la limitazione dell'assorbimento di acqua da parte della carta filtro. Houston et al. (1994) presentano una calibrazione per carta da filtro quantitativa grossolana. Sono state utilizzate due procedure: una utilizzando la soluzione salina e l'altro in cui sono stati utilizzati una piastra di pressione e un tensiometro per ottenere la curva di calibrazione. Le due procedure sono state trattate separatamente e si presumeva che sarebbero state rappresentative della calibrazione per suzioni totali e matriciali. Il tempo di equilibrio per la procedura usando la soluzione salina era sette giorni. Le due curve di calibrazione presentate da Houston et al. non differiscono in modo significativo per suzioni maggiori di 1 MPa. Dovrebbe essere sottolineato che la minima suzione generata utilizzando il sale, soluzione utilizzata da Houston et al. era 3 MPa e il più basso valore di suzione generata che è stata utilizzata per la calibrazione senza contatto è stato zero, usando l'acqua. Per il caso di suzione zero, il tempo di equilibrio era sette giorni, che era molto meno del suggerito tempo di equilibrio.

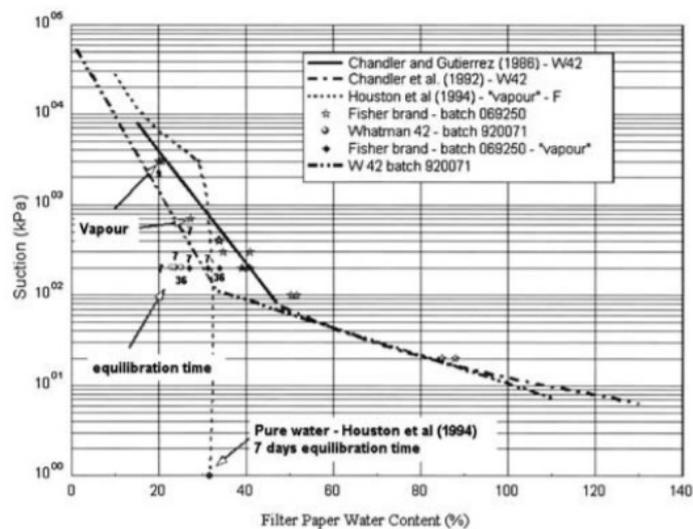
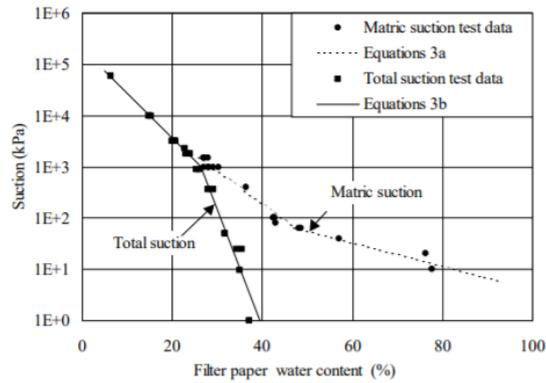


Figura 29: Curve di calibrazione per la carta da filtro Fisher, Marinho e Oliveira (2006)

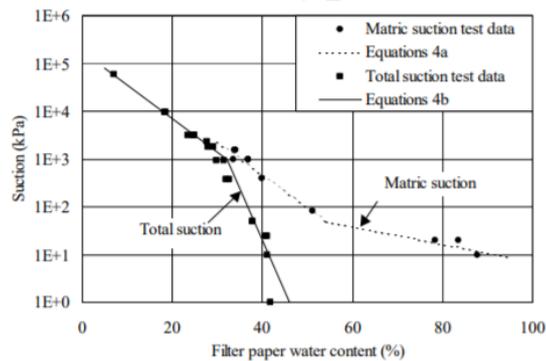
La Figura 29 mostra i punti di calibrazione per il filtro marca Fisher che sono stati ottenuti per questo studio. I risultati hanno suggerito che la curva di calibrazione è simile alla curva per Whatman No. 42. Sono stati ottenuti tre punti usando la tecnica senza contatto due a 3 MPa e uno a 700 kPa. Il tempo di equilibrio usato era sette giorni e il divario tra la carta da filtro e la superficie della soluzione era di 8 mm. Come dimostrato da Marinho non c'è differenza tra le curve di calibrazione per la suzione totale o matriciale.

#### 2.4.4 I fattori che influenzano il metodo della carta da filtro per suzioni totali e matriciali

I dati di suzione totali sono stati ottenuti calibrando inizialmente il filtro di carta a secco sopra soluzioni saline di varie concentrazioni in essiccatori sotto vuoto. Per la suzione matriciale, i dati per carte da filtro, inizialmente asciutte, sono stati ottenuti utilizzando l'apparato a piastra di pressione.



(a) Whatman No. 42 filter paper



(b) S&S 589 filter paper

Figura 30: Calibrazione della carta filtro tipo Whatman No. 42 e S&S 589, Leong (2002)

I dati di calibrazione mostrati in Figura 30 indicano che le risposte della carta da filtro sono diverse per la totale e la matriciale come anche osservato da Houston et al. (1994) e Harrison e Blight (1998). I dati di suzione totale indicano che per le suzioni inferiori a 1000 kPa, il contenuto di acqua della carta da filtro è meno sensibile al livello di suzione rispetto ai dati di suzione matriciale. Oltre 1000 kPa, i dati di suzione totale e matriciale sembrano convergere. Houston et al. hanno scoperto che la carta da filtro sepolta in un terreno ha essenzialmente lo stesso contenuto di acqua di una sospensione carta da filtro per valori di suzione di circa 98,1 MPa. Fredlund (1992) e Al-Khafaf e Hanks (1974) riportarono anche che le curve di suzione matriciali erano essenzialmente le stesse della suzione totale per valori di suzione elevati. Raadt et al. (1987) hanno mostrato che la carta da filtro utilizzata nei metodi di contatto e non di contatto erano simili per suzioni superiori a 1000 kPa ma erano diverse per suzioni inferiori a 1000 kPa (Figura 31).

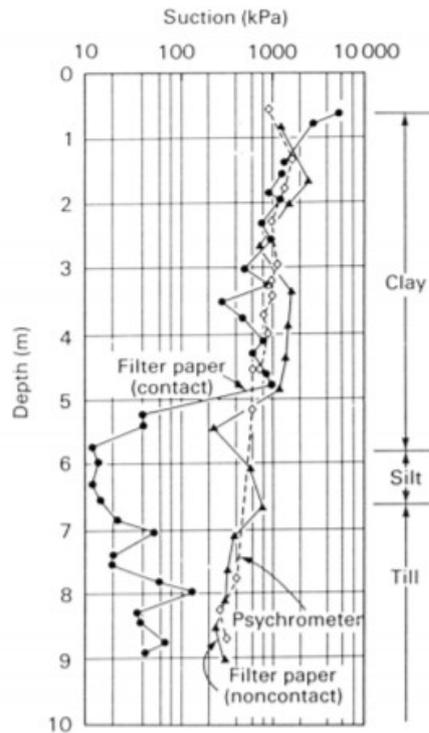


Figura 31: Profilo di suzione in funzione della profondità, van der Raadt et al. (1987)

Questi studi suggeriscono che ad alte suzioni superiori a 1000 kPa la maggior parte dei movimenti dell'umidità avvengono tramite il trasferimento del vapore piuttosto che il trasferimento capillare. Quindi fino a suzioni di 1000 kPa, il metodo con carta a filtro a contatto può essere utilizzato per misurare la suzione di matrice affidabilmente mentre il metodo senza contatto può essere utilizzato per misurare la suzione totale. Oltre 1000 kPa, il metodo della carta filtro misura solo la suzione totale, indipendentemente se c'è il contatto. Un certo numero di equazioni è stato suggerito per le curve di calibrazione del filtro Whatman n. 42 e S & S 589 nel corso degli anni (Figura 32).

(a) Whatman No. 42 filter paper

References	Calibration Curves*
Hamblin (1981)	$\log \psi = 8.022 - 3.683 \log w_f$
Chandler and Gutierrez (1986)	$\log \psi = 4.84 - 0.0622 w_f$ $w_f < 47$
Chandler et al. (1992)	$\log \psi = 6.05 - 2.48 \log w_f$ $w_f \geq 47$
Greacen et al. (1987)	$\log \psi = 5.327 - 0.0779 w_f$ $w_f < 45.3$
ASTM (1997)	$\log \psi = 2.413 - 0.0135 w_f$ $w_f \geq 45.3$

(b) Scheicher & Schuell No. 589 filter paper

References	Calibration Curves*
McQueen and Miller (1968)	$\log \psi = 5.238 - 0.0723 w_f$ $w_f < 54$
	$\log \psi = 1.8966 - 0.01025 w_f$ $w_f \geq 54$
Al-Khafaf and Hanks (1974)	$\log \psi = 4.136 - 0.0337 w_f$ $w_f < 85$
	$\log \psi = 2.0021 - 0.009 w_f$ $w_f \geq 85$
McKeen (1980)	$\log \psi = 4.9 - 0.0624 w_f$ $w_f < 66$
	$\log \psi = 1.25 - 0.0069 w_f$ $w_f \geq 66$
Greacen et al. (1987)	$\log \psi = 5.056 - 0.0688 w_f$ $w_f < 54$
ASTM (1997)	$\log \psi = 1.882 - 0.0102 w_f$ $w_f \geq 54$

\*Note:  $\psi$  = suction in kPa,  $w_f$  = filter paper water content in %

Figura 32: Equazioni per le curve di calibrazione di carte da filtro tipo Whatman No. 42 e Schleicher & Schuell 589, Leong (2002)

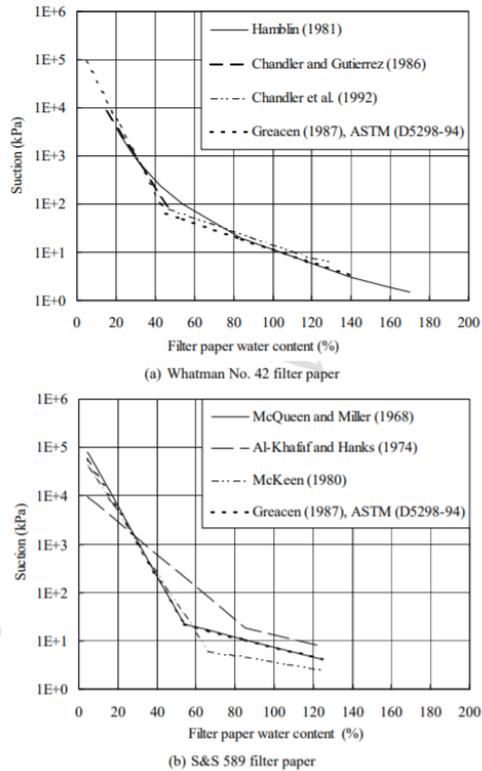


Figura 33: Curve di calibrazione per la carta da filtro, Leong (2002)

Il confronto tra le curve mostrate in Figura 33 indica che le curve per la carta da filtro Whatman No. 42 sono più coerenti rispetto a quelle della carta da filtro S & S 589. La curva di calibrazione è solitamente rappresentata da due equazioni che rappresentano sensibilità differenti della risposta della carta da filtro nel più alto e nel più basso intervallo. Tutte le equazioni presentate nella tabella 4, eccetto quella di Hamblin, hanno la forma

$$\log \psi = a - bw_f$$

Equazione 20

dove  $\log \psi$  è il logaritmo di suzione in base 10,  $a$  e  $b$  sono costanti e  $w_f$  è il contenuto di acqua percentuale del filtro. Hamblin usava un'equazione a doppio ceppo. Le prove sperimentali dalla letteratura e il lavoro degli autori indicano che dovrebbero essere equazioni separate utilizzate per la carta da filtro per i metodi di contatto e senza contatto. Il totale degli autori e i dati di calibrazione di suzione matriciale sono stati dotati di equazioni della forma dell'Equazione 20 mostrato in Figura 32:

Per Whatman No. 42:

Suzione matriciale

$$\log \psi = 2,909 - 0,0229w_f \quad w_f \geq 47$$

$$\log \psi = 4,945 - 0,0673w_f \quad w_f < 47$$

Suzione totale

$$\log\psi = 8,778 - 0,222w_f \quad w_f \geq 26$$

$$\log\psi = 5,31 - 0,0879w_f \quad w_f < 26$$

Per S&S 589:

Suzione matriciale

$$\log\psi = 2,659 - 0,018w_f \quad w_f \geq 54$$

$$\log\psi = 5,438 - 0,069w_f \quad w_f < 54$$

Suzione totale

$$\log\psi = 8,778 - 0,0191w_f \quad w_f \geq 32$$

$$\log\psi = 5,26 - 0,0705w_f \quad w_f < 32$$

L'uso di queste e di altre equazioni della forma dell'Equazione 20 richiede due equazioni per descrivere la variazione di sensibilità della carta da filtro su diversi intervalli di suzione. Le equazioni caratteristiche suggerite da Van Genuchten (1980) e Fredlund and Xing (1994) sono state utilizzate anche per adattare i dati di calibrazione di suzione totale e matriciale per fornire una singola equazione per l'uso su tutta la gamma di suzione.

Utilizzando l'equazione di Van Genuchten per la carta da filtro Whatman No. 42:

$$\text{Suzione matriciale} \quad \psi = 0,051 \left[ \left( \frac{248}{w_f} \right)^{9,615} - 1 \right]^{0,473}$$

$$\text{Suzione totale} \quad \psi = 56180 \left[ \left( \frac{37}{w_f} \right)^{0,44} - 1 \right]^{2,361}$$

Per S&S 589:

$$\text{Suzione matriciale} \quad \psi = 0,048 \left[ \left( \frac{251}{w_f} \right)^{5,621} - 1 \right]^{0,896}$$

$$\text{Suzione totale} \quad \psi = 64940 \left[ \left( \frac{44}{w_f} \right)^{0,464} - 1 \right]^{2,516}$$

Utilizzando l'equazione di Fredlund e Xing (1994) per la carta da filtro Whatman No. 42:

$$\text{Suzione matriciale} \quad \psi = 0,23 \left[ e^{\left( \frac{268}{w_f} \right)^{0,629}} - e \right]^{2,101}$$

$$\text{Suzione totale} \quad \psi = 18500 \left[ e^{\left( \frac{37}{w_f} \right)^{0,242}} - e \right]^{2,248}$$

Per S&S 589:

$$\text{Suzione matriciale} \quad \psi = 0,844 \left[ e^{\left(\frac{282}{w_f}\right)^{1,071}} - e \right]^{0,779}$$

$$\text{Suzione totale} \quad \psi = 20000 \left[ e^{\left(\frac{42}{w_f}\right)^{0,246}} - e \right]^{2,058}$$

## 3. Materiali

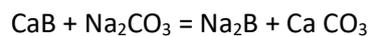
### 3.1 Bentonite

La bentonite è un tipo di materiale argilloso composto principalmente dal gruppo di minerali smectiti (Grim e Guven, 1978). Le caratteristiche tipiche del gruppo minerario di smectite comprendono capacità di scambio cationico, elevata proprietà di rigonfiamento e bassa permeabilità all'acqua (Gleason et al., 1997). La bentonite ha un'elevata compressibilità e l'iniziale grado di consolidamento tende ad essere basso, tuttavia esso aumenta nel tempo.

La maggior parte delle bentoniti sono sodiche, calciche o miste. Sodica o calcica, la bentonite esibisce proprietà diverse e quindi usi diversi.

Il tipo più comune di bentonite utilizzato nei progetti di costruzione di ingegneria civile in Europa è la bentonite sodica (Garvin and Hayles, 1999; Philip, 2000; Jefferis, 2012).

La bentonite sodica è bentonite di calcio trattata con carbonato di sodio, quindi definito come bentonite attivata con sodio. La reazione a cui la bentonite calcica viene trasformata in bentonite attivata da sodio è:



*Equazione 21*

La bentonite di sodio è comunemente più usata della bentonite di calcio perché presenta una maggiore dispersione, migliori proprietà plastiche e reologiche, maggiore rigonfiamento e minore conduttività idraulica rispetto alla bentonite di calcio.

Garner (1982) ha affermato che la bentonite attivata dal sodio di solito si espande da 10 a 15 volte rispetto al suo volume originale, mentre Lin e Benson (2000) hanno riferito che la bentonite sodica può gonfiarsi fino a circa 8-10 volte il suo volume originale. Il motivo per il potenziale elevato di riduzione di volume-rigonfiamento è dovuto a un'area superficiale specifica elevata, legami intermedi deboli e una elevata capacità di scambio cationico della bentonite di sodio. 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). I cationi dell'acqua e quelli scambiabili possono facilmente entrare e separare gli strati, facendo rigonfiare la montmorillonite. Inoltre, i cationi di

sodio inizialmente esistente tra gli strati di bentonite sono facilmente sostituibili da cationi multivalenti (ad esempio,  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ).

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.

### 3.1.1 Limiti di Atterberg

I limiti di Atterberg sono i valori del contenuto d'acqua corrispondenti alle fasi di transizione da uno stato di consistenza ad un altro. In particolare, si fa riferimento al limite liquido che indica lo stato di transizione tra la fase plastica e la fase liquida, viene misurato con un apposito strumento chiamato cucchiaio di Casagrande.

Il limite plastico, invece, si riferisce al contenuto d'acqua del materiale quando questo passa da uno stato plastico ad uno stato semisolido, ovvero inizia a perdere le caratteristiche di plasticità e si fessura. Viene valutato su dei bastoncini di 3,2 mm di diametro all'inizio della loro fessurazione. Ottenuti i limiti di Atterberg si può calcolare l'indice di plasticità, ovvero il campo in cui il materiale conserva le sue caratteristiche plastiche:

$$IP = w_L - w_P$$

*Equazione 22*

In cui  $w_L$  è il limite liquido e  $w_P$  il limite plastico.

Di seguito si riportano i valori ottenuti per la bentonite

<b>LIMITI DI ATTERBERG</b>	
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*

## 3.2 Cemento Portland 32,5

Il presente cemento contiene una percentuale di Clinker Portland compresa tra 65% e 79%, una percentuale di calcare (LL) compresa tra 21 e 35% ed eventuali costituenti secondari in quantità non superiore al 5%. Il calcare LL contiene un tenore di carbonio organico totale (TOC)  $\leq 0,20\%$ .

La composizione non tiene conto dell'aggiunta di solfato di calcio in qualità di regolatore del processo di presa.

Il cemento è conforme alla norma europea armonizzata UNI EN 197/1 ed è dotato di marchio come previsto dalla direttiva comunitaria 89/106.

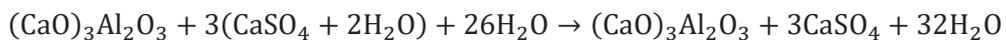
Per ogni classe di resistenza normalizzata si definiscono due classi di resistenza iniziale (2-7 gg):

- La prima con resistenza iniziale ordinaria contrassegnata con la lettera N;
- La seconda con resistenza iniziale elevata contrassegnata con la lettera R.

Pertanto, secondo le UNI EN 197/1 esistono le seguenti classi di resistenza del cemento:

- Classe 32,5N: resistenza a compressione iniziale a 7 giorni  $\geq 16$ ; resistenza a compressione standard a 28 giorni  $\geq 32,5 \leq 52,5$ ;
- Classe 32,5R: resistenza a compressione iniziale a 2 giorni  $\geq 10$ ; resistenza a compressione standard a 28 giorni  $\geq 32,5 \leq 52,5$ .

Il gesso viene solitamente aggiunto ai *clinker* per regolare la presa. La sua presenza fa in modo che l'inizio della presa sia maggiore di 75 minuti per le classi di resistenza a compressione 32,5 N/mm<sup>2</sup>. Il gesso reagisce con l'alluminato tricalcico per formare un sale espansivo chiamato ettringite (ettringite primaria). La velocità di reazione tra il Ca<sub>3</sub>Al e il CaSO<sub>4</sub> è elevatissima, rallenta velocemente a causa della formazione di strati protettivi sulla superficie del C<sub>3</sub>A. La cinetica della reazione dipende anche dalla temperatura, dalla superficie di reazione, e dal rapporto acqua/solido.



*Equazione 23*

I cementi a norma UNI EN 197 devono contenere a seconda della classe di resistenza una quantità di solfati espressa come SO<sub>3</sub>  $\leq 3,5\%$  per le classi 32,5 e 32,5 R.



## 4. Apparecchiature utilizzate

### 4.1 Psicrometro a condensazione WP4C

Il potenziale d'acqua è definito come l'energia potenziale per unità di volume dell'acqua nel campione. Il potenziale di acqua totale del campione è la somma di quattro potenziali: gravitazionale, matriciale, osmotico, e di pressione. Il potenziale gravitazionale dipende dalla posizione dell'acqua nel terreno. Il potenziale matriciale dipende dalle forze di assorbimento dell'acqua che rivestono i grani. Il potenziale osmotico dipende dalla concentrazione di sostanze dissolte in acqua. Il potenziale di pressione dipende dalla pressione idrostatica dell'acqua.



Figura 34: Psicrometro a condensazione WP4C

Il WP4C misura la somma del potenziale osmotico e matriciale in un campione. Spesso uno di questi due potenziali è il fattore dominante nella determinazione del potenziale totale. Per esempio, soluzioni come KCl hanno solo un componente osmotico. I grani di terra si legano con l'acqua principalmente attraverso forze matriciali, perciò hanno un componente matriciale.

Il potenziale d'acqua di un solido o un liquido può essere trovato mettendo in relazione il potenziale d'acqua del campione alla pressione di vapore dell'aria in equilibrio con il provino. La relazione tra il potenziale d'acqua del campione ( $\psi$ ) e la pressione di vapore dell'aria è:

$$\psi = \frac{RT}{M} \ln \frac{p^v}{p^{v0}}$$

*Equazione 24*

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 piazzato in un contenitore, che è sigillato contro il blocco del sensore. Dentro il blocco del sensore ci sono: 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 il termometro ad infrarossi misura la temperatura del campione.

Da queste misure, il WP4C computa la pressione di vapore dell'aria nello spazio come la pressione di saturazione del vapore alla temperatura del punto di rugiada. Quando il potenziale d'acqua del campione e lo spazio d'aria sono in equilibrio, la misura della pressione di vapore dello spazio e la temperatura del campione (da cui la pressione di saturazione del vapore è calcolata) dà il potenziale d'acqua del campione.

La temperatura gioca un ruolo fondamentale nella determinazione del potenziale d'acqua. La più critica è la misura della differenza tra campione temperatura del punto di rugiada. Se questa differenza di temperatura ha un errore di 1 °C, si avrà un errore di 8 MPa. Affinché le misure siano accurate, con una tolleranza di 0,05 MPa, la differenza di temperatura deve essere di 0,006 °C.

Il termometro ad infrarossi del WP4C misura la differenza di temperatura tra il campione e il blocco. È accuratamente calibrato per minimizzare gli errori di temperatura, ma raggiungendo 0,006 °C l'accuratezza risulta difficile quando le differenze di temperature

sono ampie. La miglior accuratezza è perciò ottenuta quando il campione è vicino alla temperatura della camera.

Un altro effetto della temperatura sul potenziale d'acqua avviene con campioni che sono vicini alla saturazione (come molti campioni di terreno). Un campione che è vicino a 0,00 MPa ed è solo leggermente più tiepido del blocco del sensore condenserà entro il blocco. Questo causerà errori nella misurazione e nelle successive misurazioni finché la condensa sparirà. La funzione  $T_s - T_b$  aiuta l'utente ad essere certo che il campione non condenserà nel blocco del sensore.



Figura 35: Differenza di temperatura registrata allo psicrometro

Il WP4C misura la somma del potenziale matriciale e osmotico. Un valore approssimativo per il potenziale osmotico può essere trovato misurando la conduttività elettrica (EC) della saturazione estratta del terreno in condizioni sature. Il potenziale osmotico della saturazione estratta è computata da:

$$\psi_{os}(\text{MPa}) = -0,036\text{EC} \left( \frac{\text{dS}}{\text{m}} \right)$$

Equazione 25

La componente osmotica del potenziale d'acqua è poi computato da:

$$\psi = \psi_{os} \left( \frac{\theta_s}{\theta} \right)$$

Equazione 26

Dove  $\theta$  è il contenuto d'acqua volumetrico del campione e  $\theta_s$  è il contenuto d'acqua volumetrico alla saturazione. Il potenziale matriciale è il potenziale totale meno quello osmotico.

## 4.2 Edometro a suzione controllata

L'edometro a suzione controllata utilizza la tecnica della traslazione degli assi descritta nel capitolo 2.2, ma può essere implementata anche la tecnica di equilibrio di vapore. Per quanto riguarda la caratterizzazione dei provini, viene utilizzato per definire i parametri idraulici, ma può essere utilizzato anche per definire le caratteristiche meccaniche.

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  $\mu\text{m}$ . Essa poggia direttamente sul provino quando la prova è in corso.

La cella di carico dell'edometro è separata dalla zona in cui è adagiato il provino tramite una membrana impermeabile, di spessore di un 1 mm, che consente di incrementare in maniera indipendente la pressione dell'aria ed il carico verticale agenti sul campione di terreno.

La tensione verticale netta ( $\sigma_v - u_a$ ) cui è sottoposto il campione, che si ottiene dalla contemporanea applicazione della tensione assiale  $\sigma_v$  e della pressione dell'aria  $u_a$ , può essere determinata analiticamente, facendo riferimento ad un equilibrio verticale, mediante la seguente espressione:

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

*Equazione 27*

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 è presente un disco di ceramica ad alto valore d'ingresso dell'aria con diametro di 50 mm ed un'altezza di 7.15 mm. Il provino di terreno, trattenuto lateralmente da un anello di acciaio, viene collocato sul disco di ceramica, che consente il controllo della pressione dell'acqua interstiziale presente nel terreno.



*Figura 36: Edometro a suzione controllata smontato*

Facendo riferimento alla Figura 36, un edometro a suzione controllata è composto dalle seguenti parti:

- Trasduttore LVDT (linear variable differential transformer) montato esternamente alla strumentazione: la sua funzione è quella 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 formata dai due componenti: 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 ceramioco. 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 (ad esempio 0,5 MPa) affinché inizi a drenare acqua.
- Punto di arrivo del circuito dell'acqua dove viene applicata la pressione dell'acqua. Attraverso la combinazione di 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. In tal modo, è possibile impostare le pressioni e di conseguenza la suzione. Al contrario, il sistema per il controllo del carico assiale avviene manualmente senza passare 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. 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 il provino rilascia acqua (si sta muovendo lungo la curva di essiccazione). Viceversa, quando si sta studiando un'imbibizione, 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;
- Una trappola per l'acqua collocata sulla linea dell'aria, per evitare che eventuali gocce d'acqua raggiungano, danneggiandolo, il regolatore di pressione dell'aria.

### 4.2.1 Taratura dei trasduttori LVDT

Per poter avere i risultati delle letture con unità di misura coerenti per l'interpretazione dei dati, bisogna stabilire una corrispondenza con le letture del software che sono in volt. A tal proposito si effettuano le tarature dei trasduttori di pressione, del sensore LVDT per la misura degli spostamenti verticali e del volumometro.

#### Taratura dei trasduttori di pressione

I trasduttori di pressione vengono tarati con uno strumento "Dead Weight Tester" unito ad una serie di piattelli con pesi diversi. Il peso del piattello  $G$  varia in base al valore di pressione dell'aria compressa che viene mandata in ingresso all'edometro. Nonostante la pressione esercitata sul piattello sia fornita dal costruttore, è possibile calcolarla attraverso l'espressione:

$$P = \frac{G}{S}$$

*Equazione 28*

In cui  $S$  è la superficie del pistone che si interpone tra l'aria compressa e il piattello e ruota trascurando le perdite per attrito.

Il piattello viene messo in rotazione con il pistone su cui poggia, contemporaneamente si fa variare la pressione fino a quando si raggiunge l'equilibrio e si nota che il pistone fluttua sull'aria compressa, il "Dead Weight Tester" misura il valore esatto della pressione.

#### Taratura del sensore LVDT per la misura degli spostamenti verticali

Per la taratura si monta il sensore LVDT su un apposito supporto e si posiziona un micrometro a contatto con il palpatore del trasduttore. Si inducono quindi degli spostamenti del palpatore che vengono misurati, seguendo un percorso di andata e uno di ritorno, sia con il micrometro che con il computer. La taratura, così come è avvenuto per i trasduttori di pressione, consiste nella regressione lineare tra i dati di spostamento misurati e le letture fatte dal PC.

#### 4.2.2 Determinazione dei parametri caratteristici della pietra porosa

Utilizzando il software Labview è possibile impostare le pressioni e controllare il volume d'acqua scambiato tra la pietra porosa e il volumometro. Questo permette di verificare i valori della pietra porosa e confrontarli con quelli forniti dal costruttore poiché la pietra potrebbe aver modificato le sue caratteristiche di permeabilità e valore d'ingresso dell'aria a seguito di prove precedenti. Entrambe le prove prevedono l'ingresso di fluidi e la saturazione della pietra con un fluido diretto dall'alto verso il basso.

##### Misura della permeabilità del disco in ceramica

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.

Nella cella vengono inserite due pietre porose ad alta permeabilità in modo che siano in contatto con il pistone di carico, questo carico servirà da contrasto per evitare sottopressioni elevate che possono causare danni al supporto che è incollato alla pietra.

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:

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

*Equazione 29*

dove  $\Delta V_w$  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,  $\gamma_w$  è il peso di volume dell'acqua,  $\Delta t$  è l'intervallo di tempo di riferimento,  $A$  è l'area del disco di ceramica e  $\Delta P$  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.

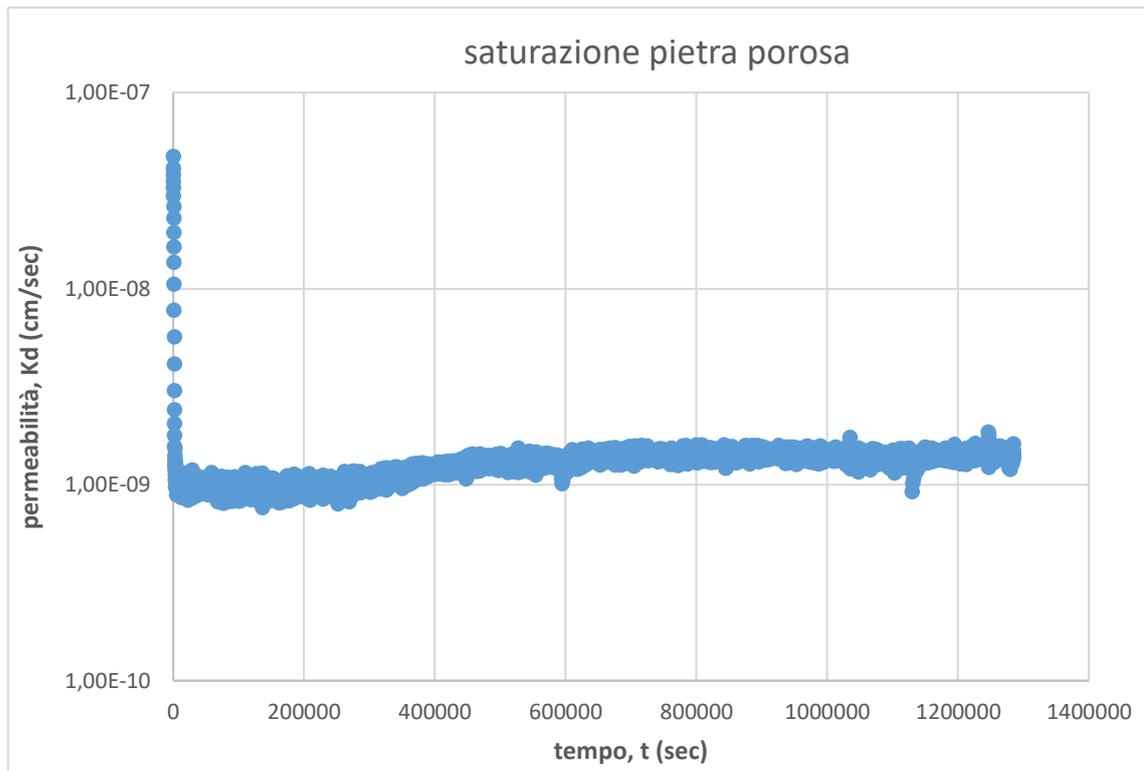


Figura 37: Andamento della permeabilità della pietra porosa nel tempo

Si evidenzia come il valore medio di permeabilità ottenuto, che risulta pari a  $1,36 \cdot 10^{-9} \text{ cm/s}$ , è di due ordini di grandezza inferiore rispetto al dato di targa riportato dal produttore che risulta pari a  $1,21 \cdot 10^{-7} \text{ cm/s}$  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.

#### Misura del valore di ingresso dell'aria

Dopo aver saturato il disco di ceramica si procede con la valutazione del valore di ingresso dell'aria. Tale procedura consiste nel riempire la cella edometrica con acqua distillata poi si applica una pressione dell'aria crescente. In questo modo si innesca un moto di filtrazione, una volta filtrata la quantità d'aria immessa i valori rimangono costanti fino al superamento del valore d'ingresso dell'aria. Per imporre una pressione d'aria crescente in maniera lineare si utilizza la funzione *rampe* del software Labview. Di seguito si riporta il grafico del valore di ingresso dell'aria.

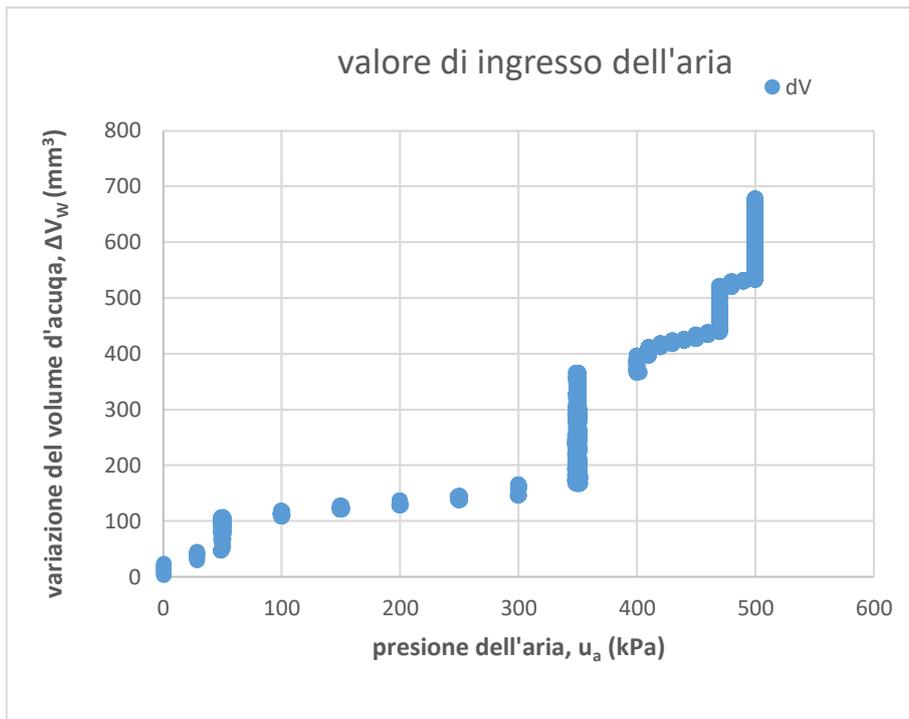


Figura 38: valore di ingresso dell'aria del disco di ceramica

## 5. Procedura di prova

### 5.1 Preparazione dei provini

Per la ricerca dei parametri meccanici ed idraulici del materiale, sono state indagate tre miscele con differenti contenuti di cemento. Le descrizioni delle composizioni di tali miscele sono riportate nella tabella seguente:

Classificazione	Acqua [g]	Bentonite [g]	Cemento [g]
M1	1800	100	400
M2	1800	100	500
M3	1800	100	600

*Tabella 2: Composizione in peso delle differenti miscele*

#### 5.1.1 Idratazione della bentonite

Come prima fase bisogna far idratare la bentonite. Per ottenere le miscele volute si è deciso di miscelare la bentonite con 18 volte l'acqua in termini di peso, indipendentemente dal tipo di miscela. La miscelazione è avvenuta con un miscelatore meccanico fino a quando non si è ottenuta una miscela uniforme e senza grumi di bentonite. Si riporta di seguito una fotografia della fase di miscelazione ed il risultato finale:



*Figura 39: Miscela di bentonite*

Successivamente il composto viene fatto riposare per 24 ore per garantire un'idratazione uniforme.

### 5.1.2 Aggiunta del cemento

L'aggiunta del cemento è stata eseguita manualmente in un secondo momento, ovvero a seguito dell'idratazione della bentonite. Durante il processo di miscelazione si è potuto assistere ad una prima fase di falsa presa della miscela, dovuta ad una prima idratazione del cemento, per poi ottenere una miscela fluida ed omogenea. Una volta ottenuto il composto finale, prima di colarlo negli stampi, è stata eseguita un'ulteriore miscelazione manale per eliminare le eventuali bolle d'aria presenti. Si riporta in seguito l'immagine del processo ultimato:



*Figura 40: Miscela di cemento e bentonite*

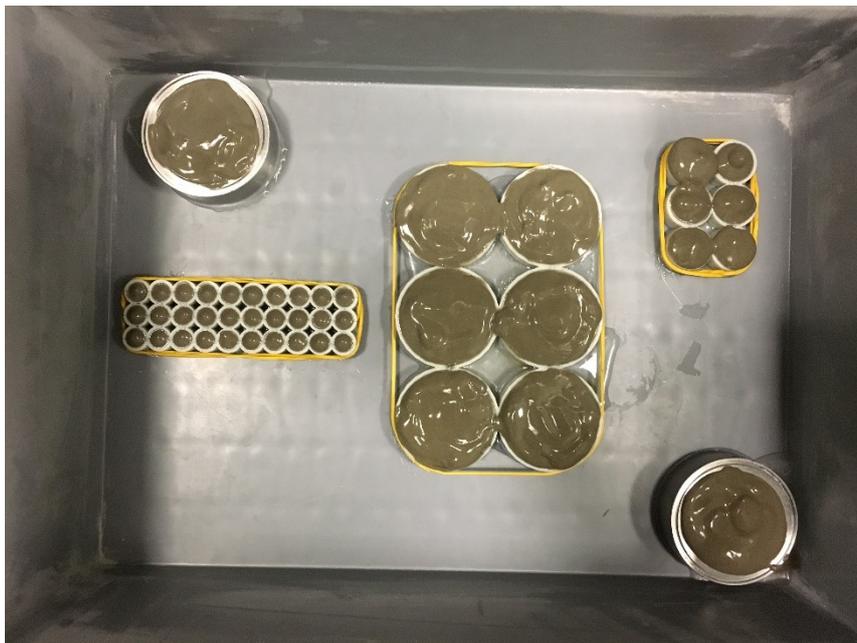
Una prima considerazione viene fatta sulla cromaticità della miscela. Il composto M1 risulta più fluido e quindi più facile da lavorare mentre mantiene un colore tendente al marrone dovuto alla prevalenza di bentonite nella miscela.

Per quanto riguarda la miscela M3, si è notata una forte predisposizione alla segregazione, per tale motivo è stata posta una particolare attenzione a questa miscela in fase di colata.

### 5.1.3 Colata negli stampi

Come prima operazione si sistemano delle carte da filtro delle dimensioni dei provini, queste serviranno per evitare che il materiale venga a contatto con la vasca, garantendo il flusso dell'acqua in eccesso durante la fase di presa. Successivamente bisogna idratare le carte da filtro in modo che siano aderenti al fondo del contenitore e non assorbano l'acqua della miscela. In seguito, si posizionano i casseri al di sopra, si bloccano con elastici e si fissano al fondo con gocce di colla a caldo.

La colatura viene fatta con attenzione, utilizzando una siringa privata dell'ago, per non inglobare bolle d'aria all'interno del provino. Poiché le miscele subiscono un ritiro considerevole a seguito della maturazione, gli stampi sono stati riempiti facendo traboccare il materiale per poi livellarlo ed ottenere un provino delle dimensioni necessarie. Una miscelazione aggiuntiva viene effettuata prima della colata per prevenire fenomeni di segregazione. Una volta riempiti tutti gli stampi, vengono sommersi abbondantemente con acqua di rubinetto, in modo da prevenirne l'evaporazione durante i 28 giorni di maturazione. Si riporta di seguito una foto esplicativa del processo:

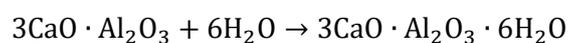


*Figura 41: Fine della fase di colatura dei provini negli stampi*

#### 5.1.4 Maturazione

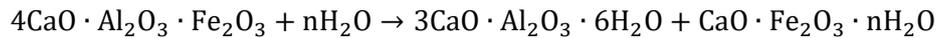
La fase di maturazione avviene in acqua, le condizioni di idratazione comportano due fasi distinte. Una prima fase di presa in cui la miscela risulta poco lavorabile e una fase a fine presa in cui è completamente rigida. Avvenuta la fase di presa il processo di idratazione continua, facendo in modo che il conglomerato indurisca ulteriormente.

Il processo più importante, tra le reazioni acqua cemento, è l'idratazione della celite con la formazione di una fase colloidale. In questo processo si distingue una prima fase, l'idratazione dell'alluminato tricalcico, in cui si sviluppa calore in tempi brevi secondo la reazione:



*Equazione 30*

E una seconda fase, scissione idrolitica dell'alluminato-ferrito tricalcico, che avviene con la reazione chimica di seguito riportata:



*Equazione 31*

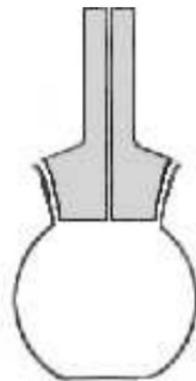
Dove con n si indica un numero imprecisato di molecole d'acqua.

Siccome le miscele sono utilizzate per studi sperimentali a 28 giorni di invecchiamento, la variabile tempo non è più determinante, ad ogni modo vari studi mostrano che con la stagionatura si ha un incremento delle proprietà meccaniche (rigidezza e resistenza a compressione) e una diminuzione della conducibilità idraulica.

### 5.1.5 Calcolo della massa specifica relativa

Una prima misurazione della massa specifica relativa di un corpo solido può essere ottenuta dalla misura del suo volume, usando un calibro, e della sua massa con la bilancia elettronica. Si otterrà così un primo risultato, con relative unità di misura ed incertezza, che potrà essere utilizzato nella stima a priori dell'incertezza sulla successiva misura e confrontato con il valore sperimentale finale, discutendone la compatibilità.

Un altro metodo per misurare la massa specifica relativa GS di un corpo solido è quello di utilizzare la bilancia elettronica di precisione ed un picnometro del tipo di quello mostrato in Figura 42.



*Figura 42: Picnometro*

Esso è essenzialmente costituito da una boccetta di vetro avente un tappo conico smerigliato che si adatta perfettamente al collo della boccetta e in cui è stata realizzata una scanalatura centrale (capillare) molto sottile per la regolazione fine, tramite un segno di affioramento, del livello del liquido al suo interno. Con tali strumenti a disposizione si possono individuare due diverse procedure di misure di massa con la bilancia che

permettono di determinare, indirettamente, la massa specifica relativa. La prima procedura prevede la seguente serie di misure di massa:

- Si pone sul piattello porta-oggetti il corpo di massa incognita e se ne misura la massa indicata con  $M_1$ ;
- Sul piattello porta-oggetti si aggiunge al corpo di massa incognita il picnometro riempito di acqua fino al segno di affioramento e se ne misura la massa indicata con  $M_2$ ;
- Si inserisce il corpo di massa incognita all'interno del picnometro e, dopo aver riportato il livello dell'acqua al segno di affioramento, lo si pone sul piattello della bilancia misurandone la massa indicata con  $M_3$ .

Dalla definizione di massa specifica relativa  $G_S$  segue immediatamente che:

$$G_S = \frac{M_1}{M_2 - M_3}$$

*Equazione 32*

- $M_1$ : massa del campione secco;
- $M_2$  massa del picnometro riempito d'acqua alla temperatura  $T$ ;
- $M_3$  massa del picnometro riempito con acqua e campione alla temperatura  $T$ ;

La seconda procedura prevede la seguente serie di misure di massa:

- Si pone sul piattello porta-oggetti il picnometro riempito di acqua fino al segno di affioramento e se ne misura la massa indicata con  $M_a$ ;
- Sul piattello porta-oggetti si aggiunge al picnometro riempito di acqua il corpo di massa incognita e si misura la massa indicata con  $M_b$  (coincidente con la massa  $M_2$  del primo metodo);
- Si inserisce il corpo di massa incognita all'interno del picnometro e, dopo aver riportato il livello dell'acqua al segno di affioramento, lo si pone sul piattello della bilancia misurandone la massa indicata con  $M_c$  (coincidente con la massa  $M_3$  del primo metodo).

Dalla definizione di massa specifica  $G_S$  segue immediatamente che:

$$G_S = \frac{M_b - M_a}{M_b - M_c}$$

*Equazione 33*

Essendo, sulla base delle misure,  $M_b - M_a$  la massa del corpo di massa incognita e  $M_b - M_c$  la massa di una quantità di acqua avente lo stesso volume del corpo.

Qualsiasi sia la procedura utilizzata, la massa specifica relativa così ottenuta è però riferita all'acqua a temperatura ambiente e non, all'acqua utilizzata a 3.98 °C. Bisogna quindi correggere il risultato per un fattore  $f(T)$  che tiene conto della variazione della massa dell'acqua con la temperatura  $T$ .

Il fattore correttivo  $f(T)$  è dato dalla massa relativa dell'acqua alla temperatura di misura, ovvero dal rapporto  $\delta_A(T)/\delta_A(3.98 \text{ °C})$ . Un ulteriore fattore correttivo  $f_{Arch}$  deve essere introdotto per tener conto delle spinte di Archimede e quindi la massa relativa del corpo sarà data da:

$$G_{S,corr} = G_S \cdot f(T) \cdot f_{Arch}$$

*Equazione 34*

Si deve tener conto delle correzioni solo nel caso in cui il loro contributo al risultato finale sia significativo rispetto all'incertezza relativa con cui si è misurato  $G_S$ . In caso contrario  $G_S$  è dato direttamente dall'Equazione 32 e dall'Equazione 33.

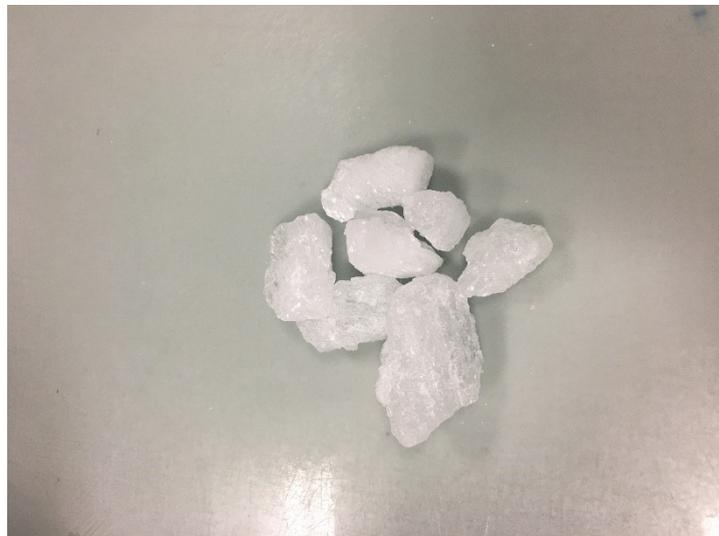
## 6. Elaborazione dei dati

### 6.1 Equilibrio di vapore

#### 6.1.1 Preparazione delle soluzioni saline

Facendo riferimento alla Figura 17, riportata nel capitolo 2.3, che rappresenta i valori di umidità relativa, suzione totale e solubilità di differenti soluzioni basiche/Sali non volatili, sono state scelte nove soluzioni saline con un ampio range al fine di ottenere una dispersione di dati più omogenea e distribuita.

Le soluzioni sono state preparate miscelando acqua e sale, nelle proporzioni riportate in Figura 17, mediante l'utilizzo di un miscelatore magnetico composto da una piastra che genera un campo magnetico e un'ancoretta polarizzata che ruota. Scegliendo diverse velocità è stato possibile miscelare anche sali con cristalli grossi, fino al completo scioglimento.



*Figura 43: Grossi cristalli di sale utilizzati per le soluzioni saline*

Successivamente, dopo la fase di miscelazione, è stata misurata l'effettiva suzione delle soluzioni saline mediante l'uso dello strumento WP4C. Siccome la temperatura gioca un ruolo fondamentale nella variazione di suzione le misure effettuate con lo psicrometro a 21,5 °C, e riportate di seguito, sono diverse da quelle citate da Romero (2001) e riportate in Figura 17.

SOLUZIONE	$\Psi$ [MPa]	T [°C]	M [n°moli/l]
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3,46	21,5	0,80
KNO <sub>3</sub>	8,95	21,5	4,60
BaCl <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> O	13,26	21,5	1,88
KCl	22,80	21,5	5,05
NH <sub>4</sub> Cl	34,15	21,5	7,78
NaCl	38,92	21,5	6,25
NaNO <sub>3</sub>	40,03	21,5	11,22
NaNO <sub>2</sub>	57,75	21,5	12,80
CaCl <sub>2</sub> 6H <sub>2</sub> O	159,00	21,5	7,41

Tabella 3: Suzione totale, Temperatura e Molarità ottenute per le varie soluzioni saline

### 6.1.2 Gestione dei dati sperimentali

Dopo aver confezionato i provini e aver atteso 28 giorni per la maturazione e il raggiungimento delle caratteristiche, i campioni sono stati posti in barattoli a chiusura stagna (Figura 44) contenenti a loro volta piccole quantità di soluzioni saline le quali generano, all'interno del contenitore, un'atmosfera contraddistinta da un'umidità relativa variabile in relazione alla soluzione salina. Poiché il campione è immerso in questa atmosfera protetta, esso tenderà con il passare del tempo ad essere caratterizzato dalla suzione propria delle soluzioni saline corrispondenti.

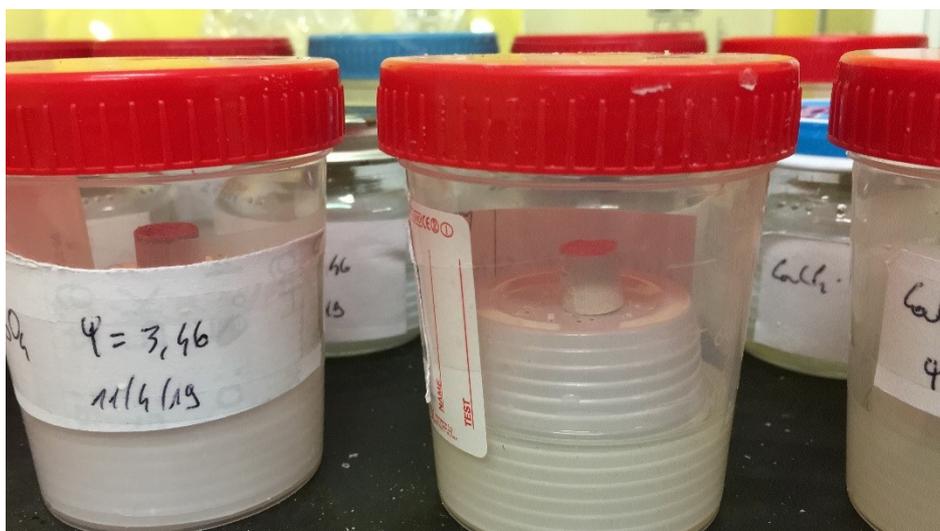


Figura 44: Prova con la tecnica dell'equilibrio di vapore

La procedura di prova è stata eseguita due volte. In un primo momento si è considerato un tempo di equilibrio pari a 21 giorni, in cui i provini sono rimasti chiusi nei barattoli ermetici e posizionati su un apposito supporto al fine di evitare il contatto con la soluzione salina presente.

Al termine dell'equilibrio si sono misurati i pesi prima e dopo l'essiccazione in forno a 105°C.

Successivamente sono stati preparati dei nuovi campioni e la prova è stata ripetuta allo stesso modo, con la differenza che i provini sono stati pesati una volta ogni due giorni in modo da monitorare la perdita di peso legata alla variazione del contenuto d'acqua. Queste misure transitorie ci permettono di ottenere un andamento del peso dei provini nel tempo, quando il grafico mostra un asintoto si può considerare raggiunto l'equilibrio. A questo punto si misura il peso umido e quello secco in modo da risalire al grado di saturazione e al contenuto d'acqua dei provini. Il risultato di ogni prova è rappresentato da un punto nel piano.

Di seguito sono riportati i dati delle prove, effettuate utilizzando l'equilibrio di vapore nei due metodi sopra descritti, per le tre miscele cemento-bentonite.

#### Prove con equilibrio a 21 giorni

La fase sperimentale condotta con la tecnica dell'equilibrio di vapore ha permesso di ottenere un'unica curva di ritenzione e per l'esattezza il tratto essiccazione.

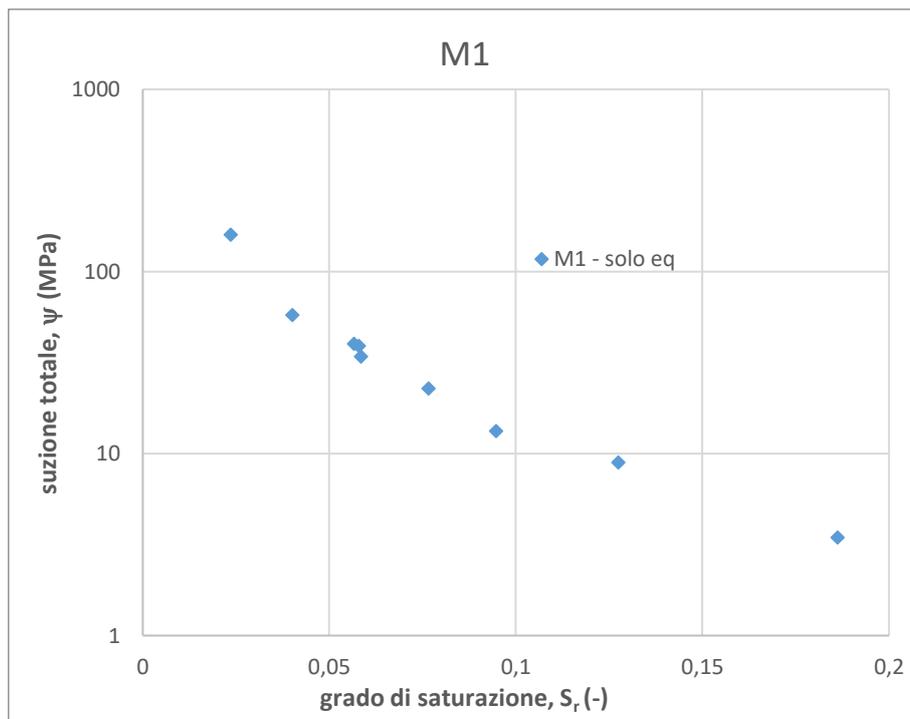


Figura 45: Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore sulla miscela M1

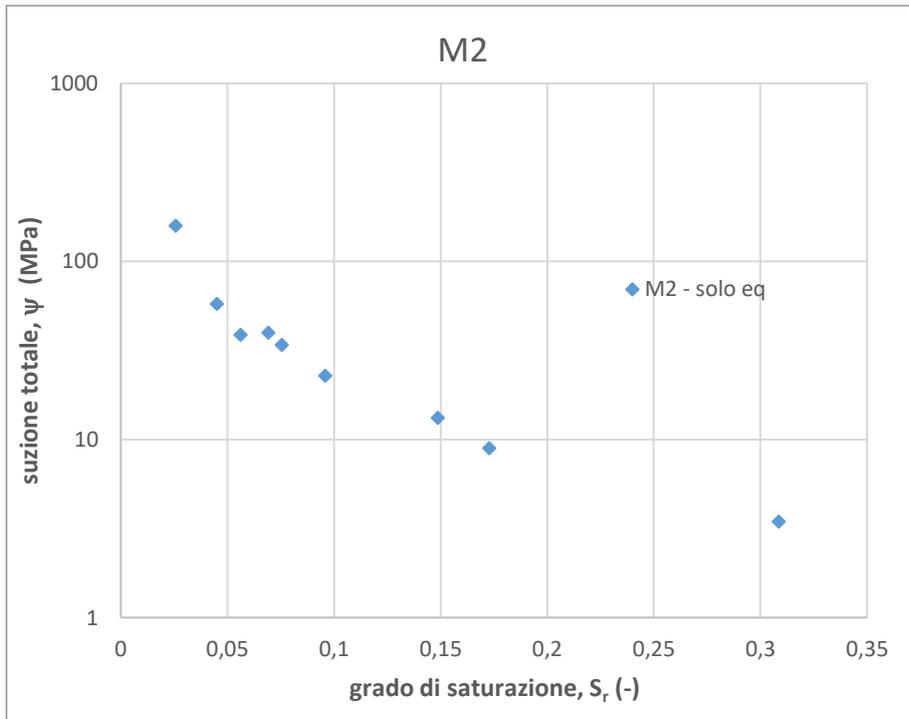


Figura 46: Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore sulla miscela M2

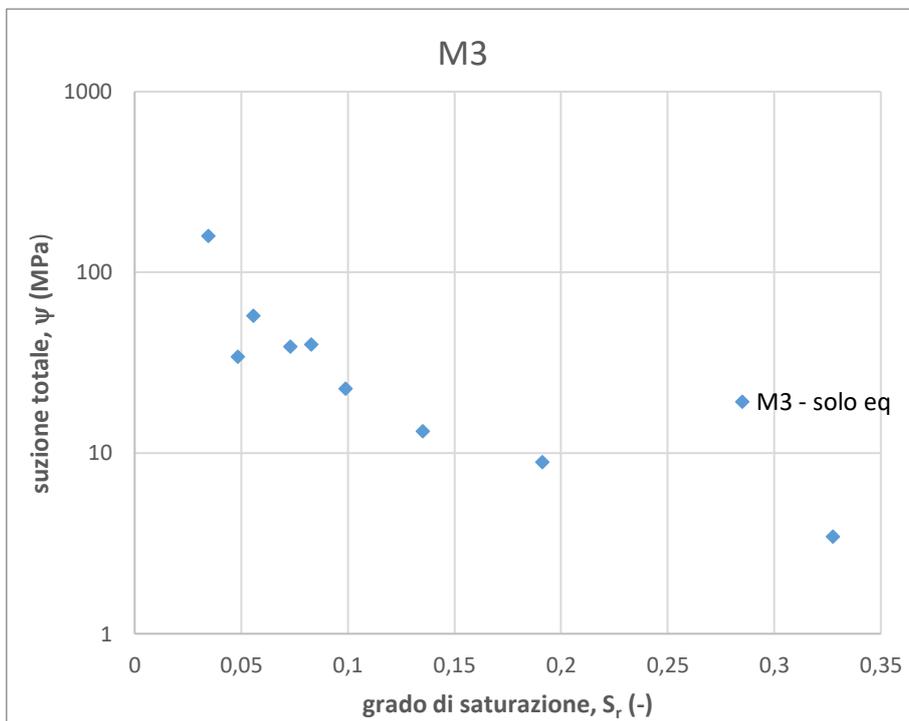


Figura 47: Dati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore sulla miscela M3

### Prove con misurazioni transitorie

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

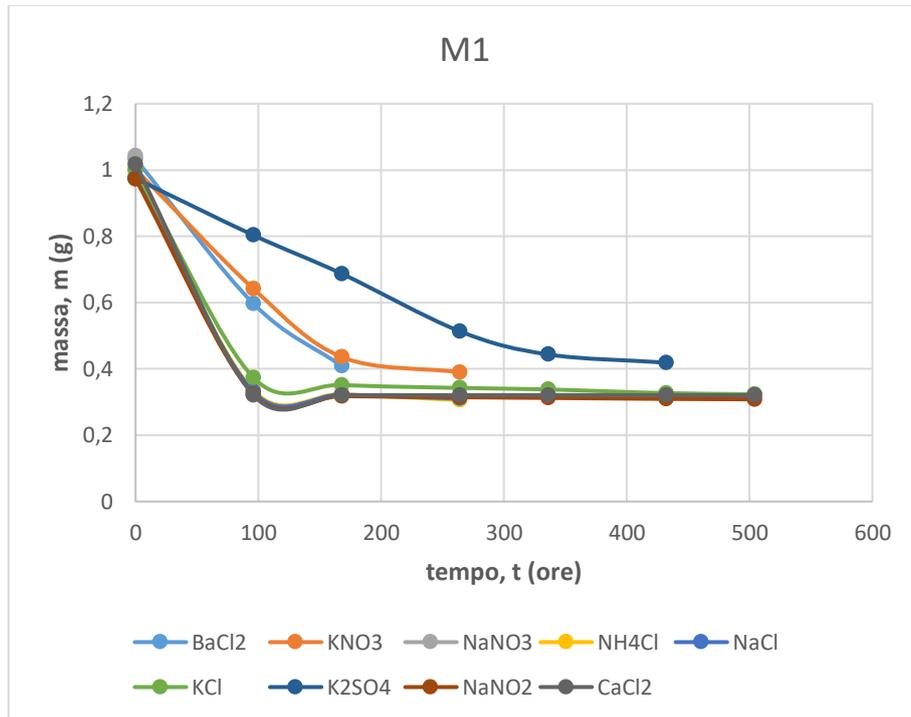


Figura 48: Andamento nel tempo delle masse dei provini della miscela M1

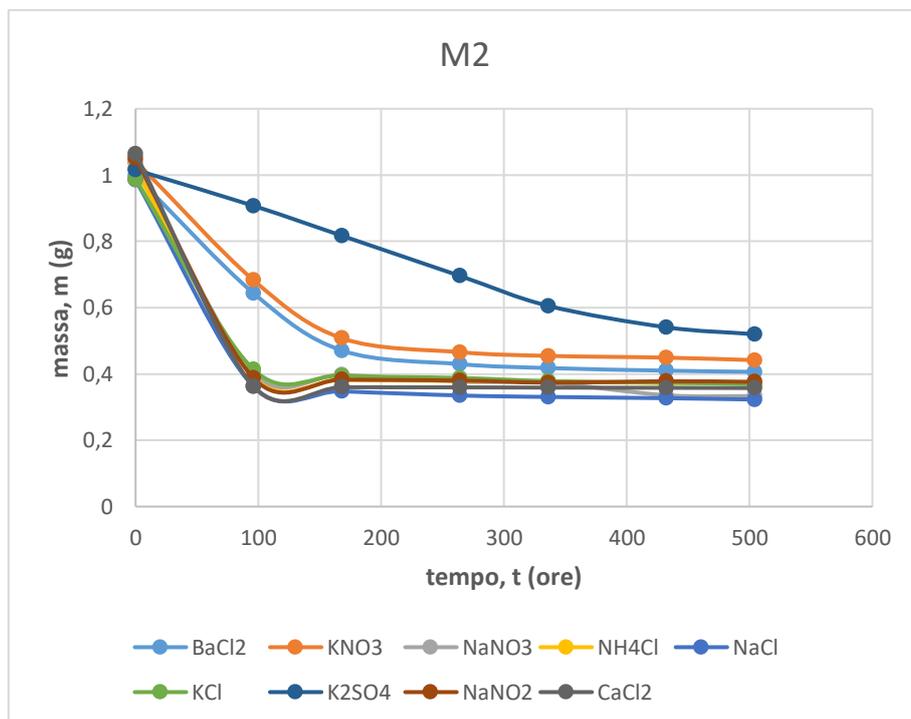


Figura 49: Andamento nel tempo delle masse dei provini della miscela M2

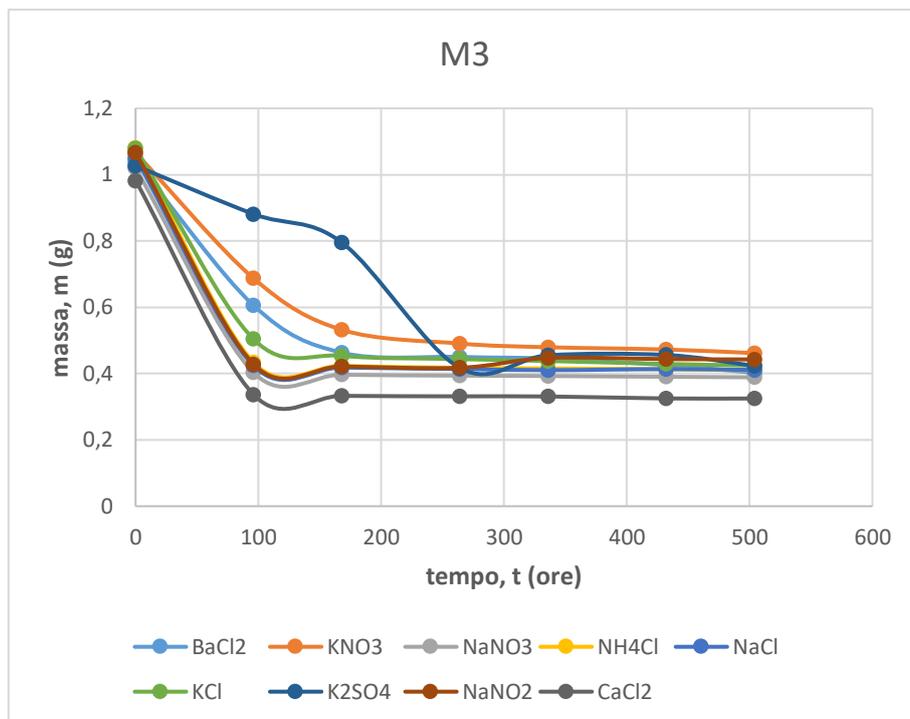


Figura 50: Andamento nel tempo delle masse dei provini della miscela M3

Dai risultati sperimentali è emerso che i campioni sottoposti alle suzioni più elevate, a differenza di quanto avviene per gli altri, presentano una repentina diminuzione del peso raggiungendo la condizione di equilibrio in un periodo relativamente breve.

Si evidenzia, inoltre, che anche per le soluzioni saline con suzioni più basse, il periodo prestabilito di 21 giorni è sufficiente al raggiungimento della condizione di equilibrio in termini di massa e contenuto d'acqua, tuttavia le misurazioni sono state condotte per 28 giorni.

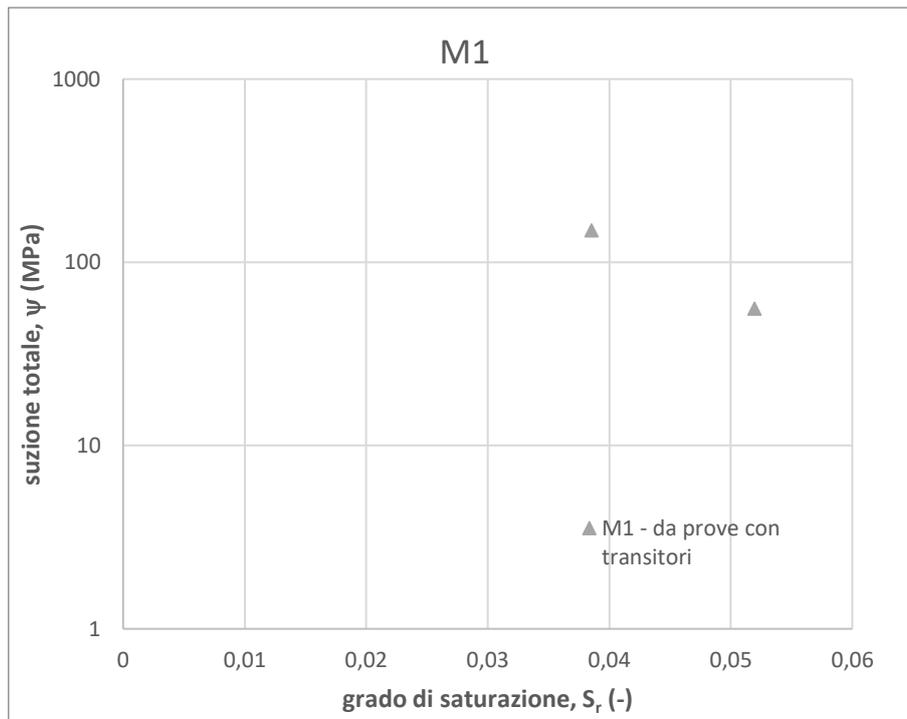


Figura 51: Risultati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela M1

Il fatto che questa prova presenti solamente due punti all'interno del piano è dovuto alla problematica riscontrata durante le misure nel periodo necessario al raggiungimento dell'equilibrio. Essendo molto fragili e soggetti a numerosi cicli di misurazione, i provini sono stati sottoposti a sollecitazioni, dovute alla pressione del calibro per la misurazione dell'altezza e del diametro. Questo ha portato ad una rottura e conseguentemente alla perdita dei dati utili a definire la curva di ritenzione.

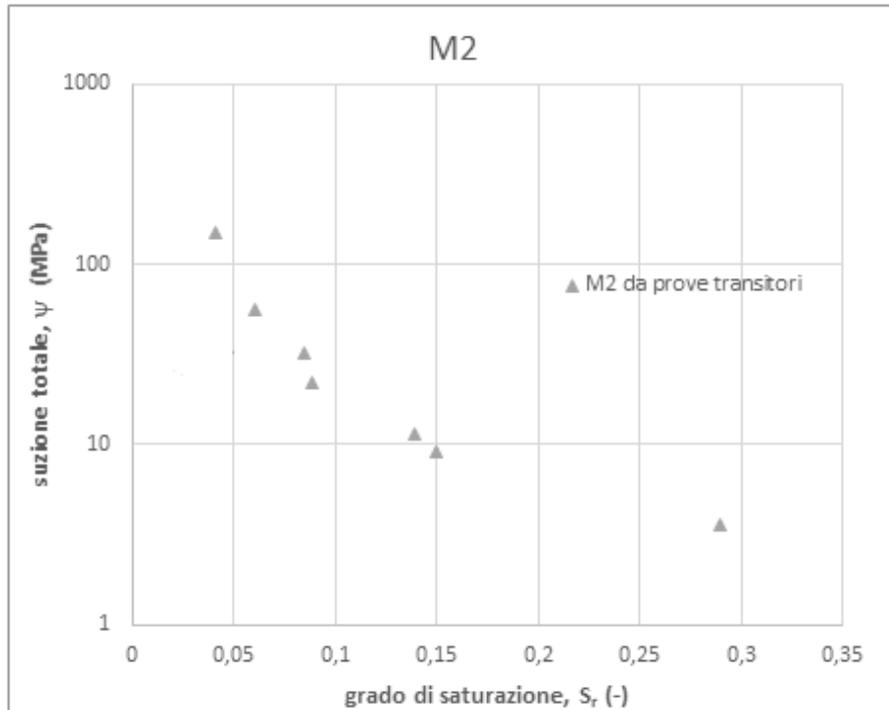


Figura 52: Risultati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela M2

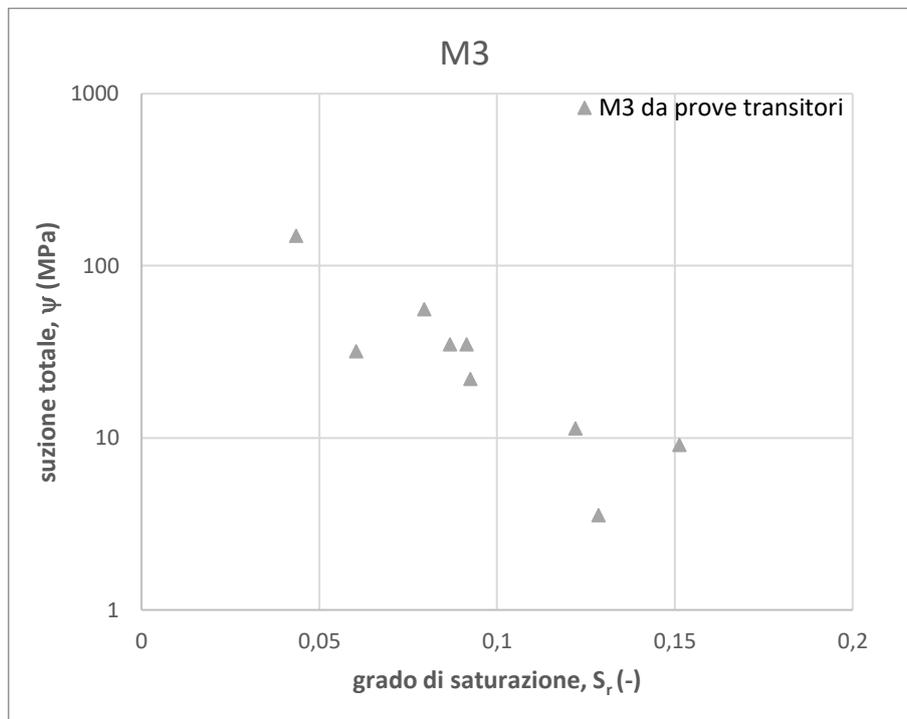


Figura 53: Risultati ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore per la miscela M3

## 6.2 Psicrometro a condensazione WP4C

### 6.2.1 Gestione dei dati sperimentali: Essiccazione

Le misure sono ottenute utilizzando la procedura descritta nel manuale del WP4C, lo strumento stesso viene inizialmente calibrato utilizzando i valori riportati nel manuale tecnico. Il campione viene posto all'interno della camera, dopo circa 10 minuti si legge la misura di suzione totale riportata a video. Per ogni miscela sono stati preparati due campioni su cui sono state effettuate le misure, la media delle due è il dato analizzato.

Una prima lettura, con lo strumento WP4C, viene eseguita a seguito del raggiungimento dell'equilibrio. Quest'ultimo viene raggiunto dopo 48 ore in un contenitore con acqua alla base al fine di ottenere un'omogeneità del contenuto d'acqua del campione, i dati ottenuti sono relativi alla suzione totale. Successivamente il provino viene lasciato asciugare all'aria in modo controllato, monitorando la perdita di peso in modo da avere una differenza di 0,5 grammi tra la prima e la seconda misura.

Alla fine del processo il campione viene pesato in modo da poter risalire al suo contenuto d'acqua, una volta terminata la prova si passa in forno il campione e si ricava la massa secca e il contenuto d'acqua iniziale.

Di seguito vengono riportati i grafici, delle tre miscele cemento bentonite, in termini di suzione totale diagrammate con il contenuto d'acqua e il grado di saturazione, tenendo separati i valori dei due provini al fine di interpretare i risultati.

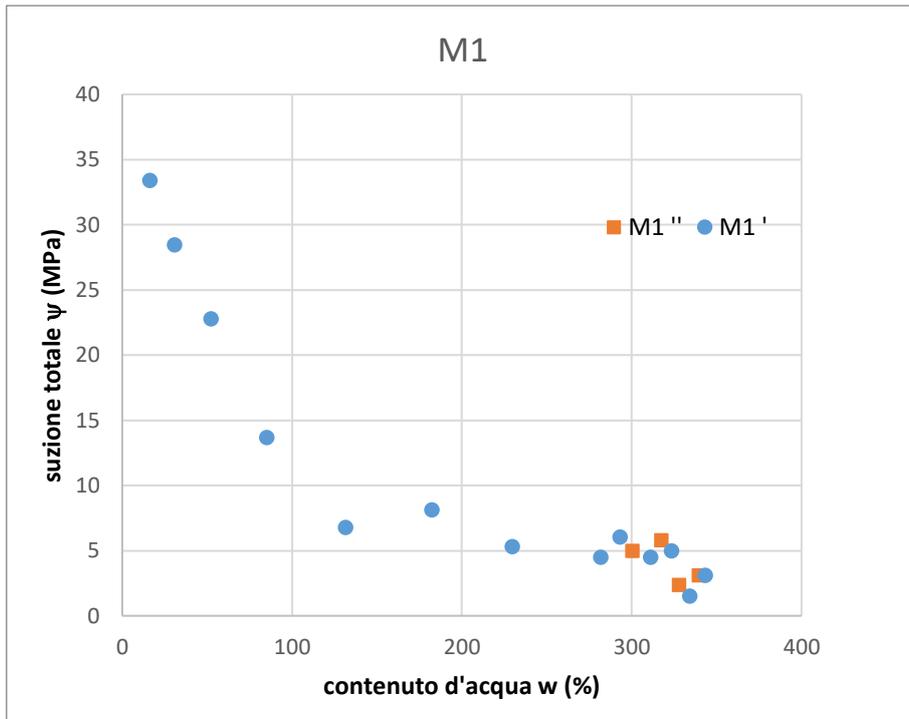


Figura 54: Risultati ottenuti con lo psicrometro WP4C per la miscela M1

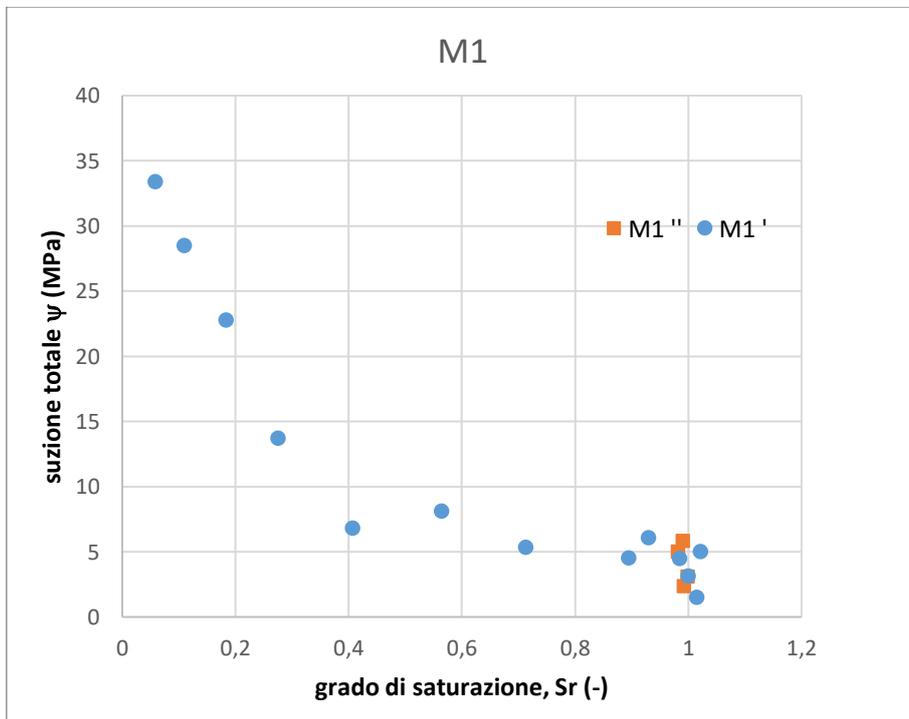


Figura 55: Risultati ottenuti con lo psicrometro WP4C per la miscela M1

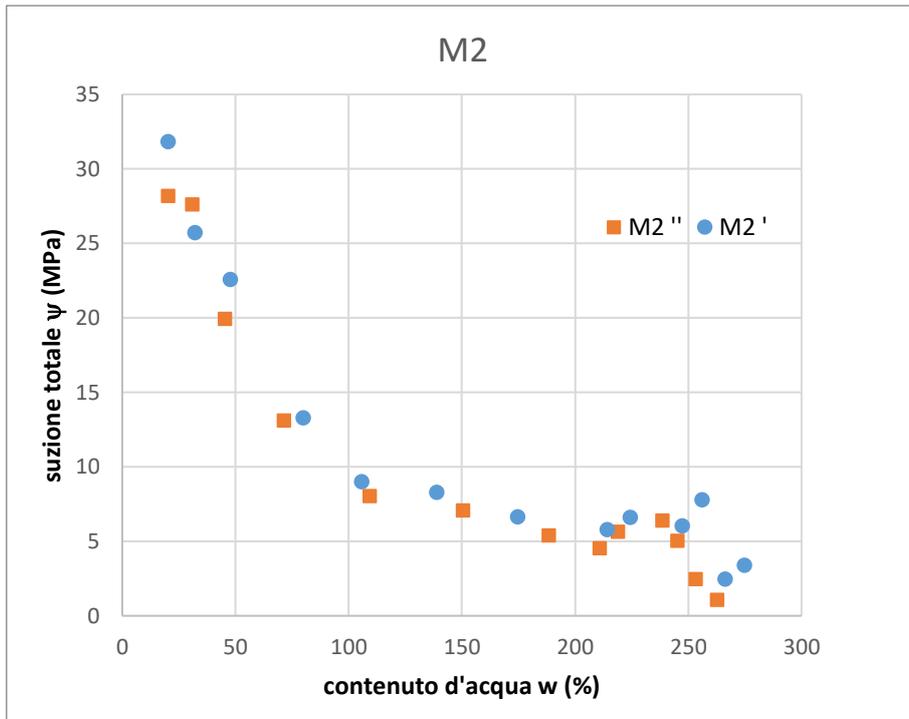


Figura 56: Risultati ottenuti con lo psicrometro WP4C per la miscela M2

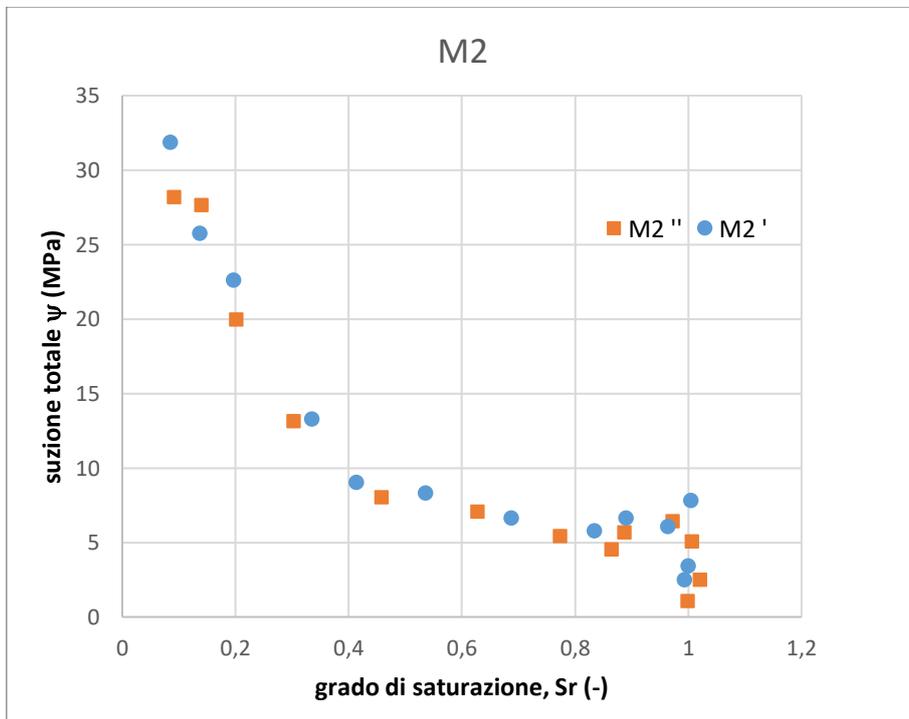


Figura 57: Risultati ottenuti con lo psicrometro WP4C per la miscela M1

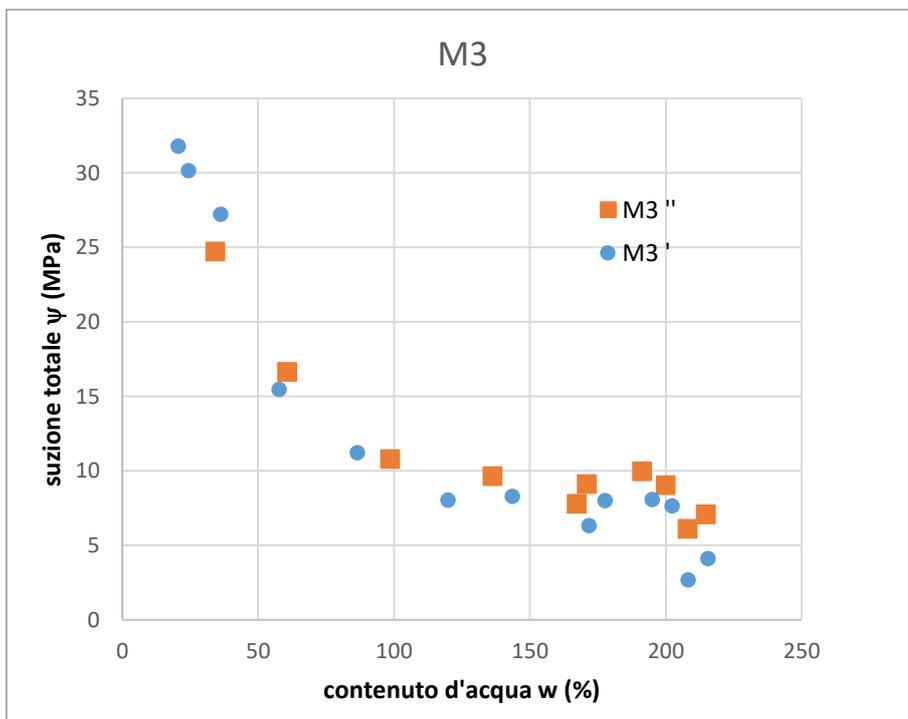


Figura 58: Risultati ottenuti con lo psicrometro WP4C per la miscela M3

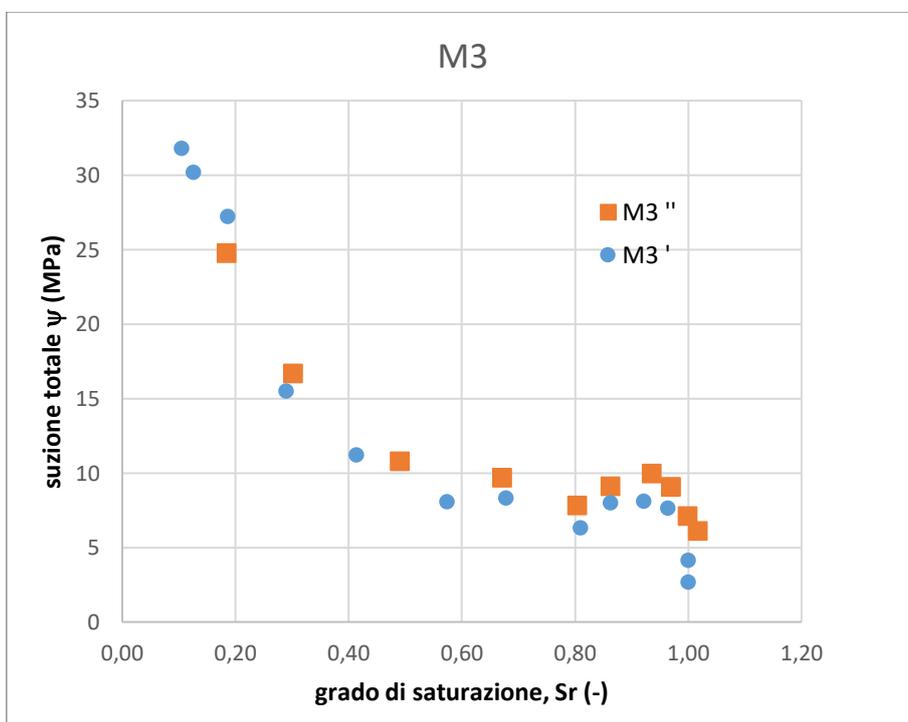


Figura 59: Risultati ottenuti con lo psicrometro WP4C per la miscela M3

Da una prima deduzione è emersa una buona concordanza tra i valori ottenuti dai due provini della stessa miscela. I grafici sembrano suggerire che per bassi valori di suzione i punti siano affetti da errori, tuttavia questo fenomeno è possibile che sia dovuto all'equilibrio termico poiché la temperatura varia in maniera regolare fino all'equilibrio nella camera di misurazione sigillata.

## 6.2.2 Gestione dei dati sperimentali: Imbibizione

Analogamente a quanto descritto nella procedura di essiccazione i provini vengono sottoposti a dei cicli di umidificazione e successiva misurazione della suzione.

Nella fase di imbibizione i provini sono stati umidificati in maniera forzata aggiungendo una goccia d'acqua per volta fino al raggiungimento del valore di contenuto d'acqua prestabilito. A questo punto i provini vengono fatti omogeneizzare nell'essiccatore ad acqua per due giorni avvolti e isolati con pellicola idrata di cellulosa, dopodiché si rivaluta il contenuto d'acqua, pesando i campioni. Si è notato in via sperimentale che l'evaporazione nei due giorni di equilibrio non è significativa e non varia sensibilmente il contenuto d'acqua.

I provini vengono posizionati nella camera di equilibrio all'interno dello strumento WP4 e la suzione riportata a video viene associata al contenuto d'acqua predeterminato.

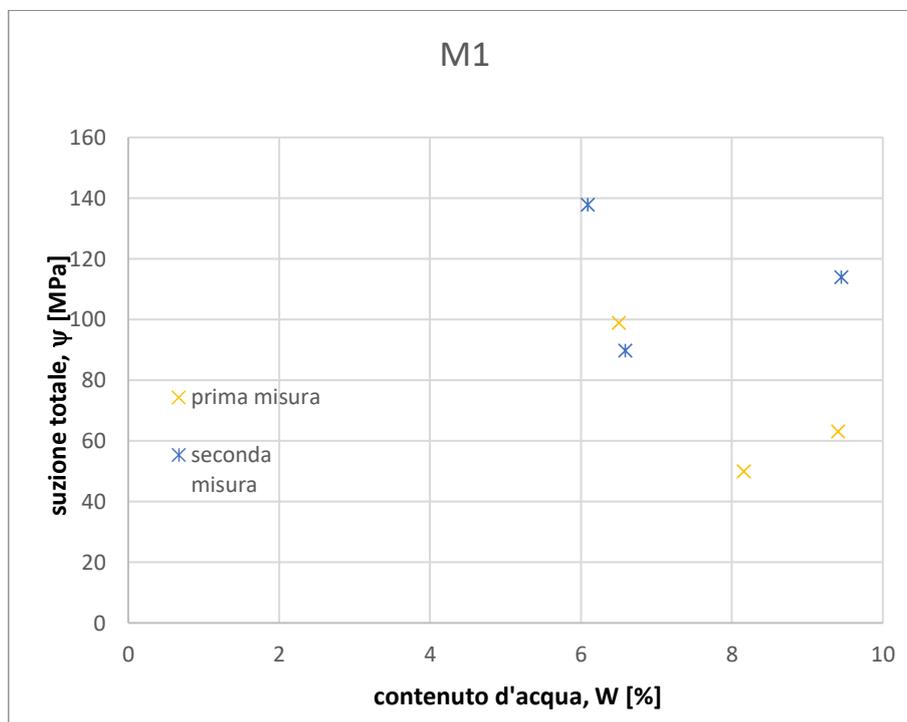


Figura 60: Risultati ottenuti con lo psicrometro WP4C per la miscela M1

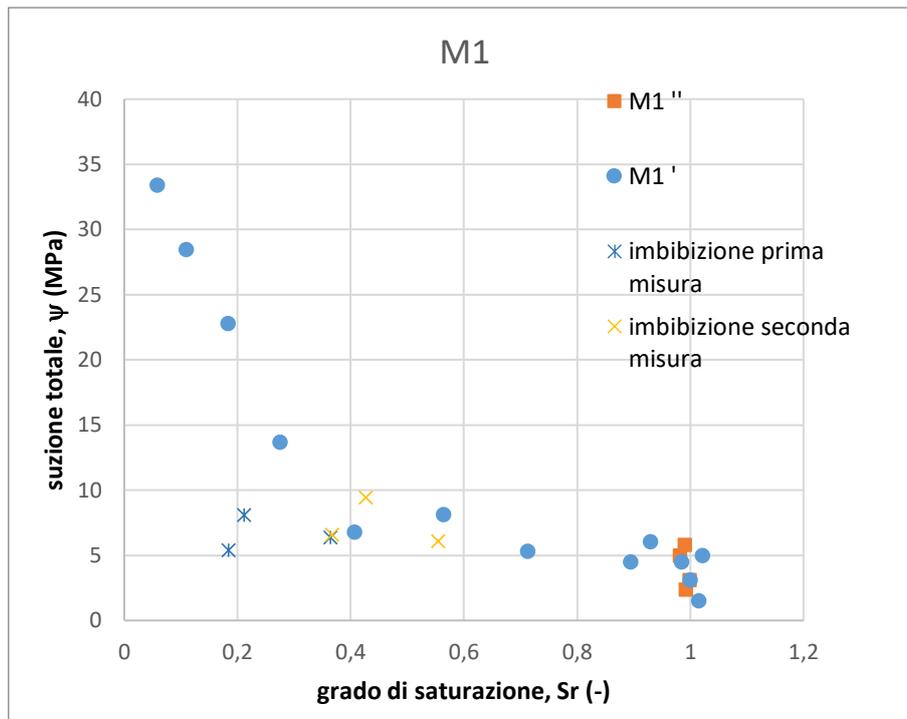


Figura 61: Tutti i dati ottenuti con lo psicrometro WP4C per la miscela M1

Infine si riportano tutti i dati ottenuti con lo strumento WP4 diagrammati nel grafico suzione-grado di saturazione (Figura 61) per poter definire un trend per le due curve rispettivamente di essiccazione e di imbibizione.

## 6.3 Carta da filtro

### 6.3.1 Calibrazione carta filtro

Per poter ottenere la curva di calibrazione in termini di suzione-contenuto d'acqua si è utilizzata la carta da filtro Scheicher & Schuell n.589. Partendo da questo tipo di carta filtro vengono ottenuti dei dischi di carta filtro con diametro 50 mm che, dopo essere stati passati idratati, vengono sigillati in contenitori stagni. All'interno di questi contenitori vi è uno scambio di umidità tra aria e carta filtro, al raggiungimento dell'equilibrio il disco di carta avrà la stessa suzione della soluzione salina compresente. Trascorsi 14 giorni, per poter raggiungere l'equilibrio, i dischi vengono pesati e, successivamente, passati in forno per ottenere la massa secca e quindi il contenuto d'acqua mediante la formula:

$$W = \frac{M_u - M_s}{M_s}$$

*Equazione 35*

È importante ricordare che tutte le condizioni adottate per la calibrazione della carta filtro devono essere utilizzate per le misurazioni, compreso il tempo di equilibrio.



*Figura 62: Calibrazione della carta da filtro*

Le soluzioni saline presenti sono state preparate come descritto precedentemente nel capitolo 6.1.1 dopodiché sono state misurate le suzioni con lo strumento WP4C in modo da poter correlare ad ognuna di esse un contenuto d'acqua della carta filtro.

Sale	$\Psi$ [MPa]	T [°C]	M [n° moli/l]
NaNO <sub>3</sub>	38,13	21,5	0,74
KNO <sub>3</sub>	9,59	21,3	4,89
KCl	22,76	21,5	1,90
NaCl	37,06	21,5	5
NaNO <sub>2</sub>	54,96	21,5	7,70
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	3,42	21,5	5,92
NH <sub>4</sub> Cl	33,99	21,5	10,65
BaCl <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> O	13,69	21,5	12,14

Tabella 4: Suzione totale, Temperatura, Molarità ottenute per le differenti soluzioni saline

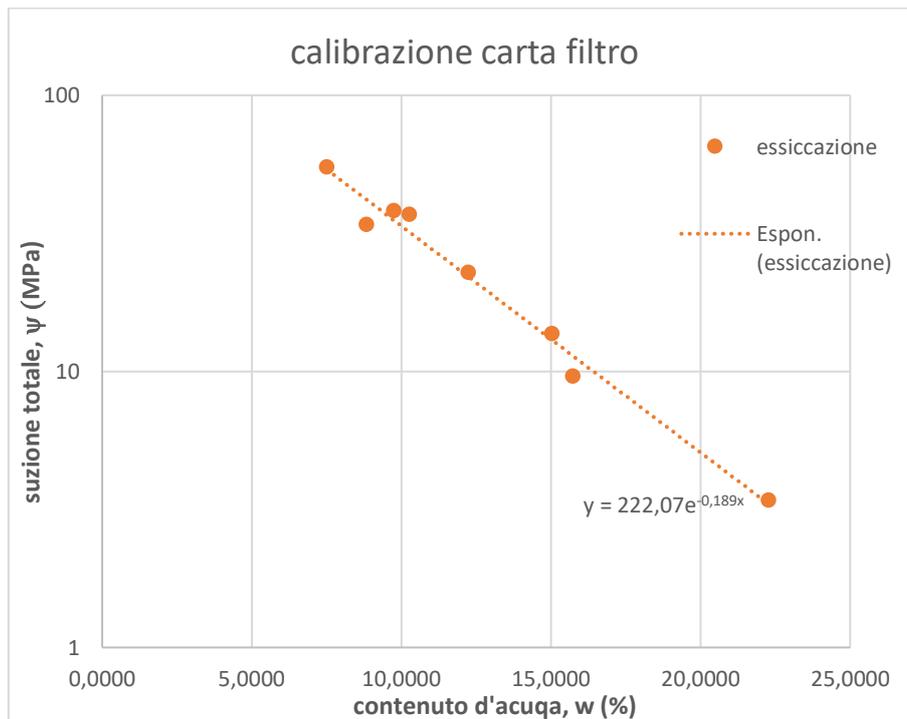


Figura 63: Valori ottenuti con la calibrazione della carta da filtro in essiccazione

Facendo riferimento alla Tabella 4 si è costruito un grafico suzione-contenuto d'acqua in cui i punti sperimentali sono ottenuti partendo dal contenuto d'acqua, misurato dalle carte da filtro oggetto di sperimentazione, e ricavando la suzione dalle diverse relazioni, riportate in Tabella 4, per i vari autori citati.

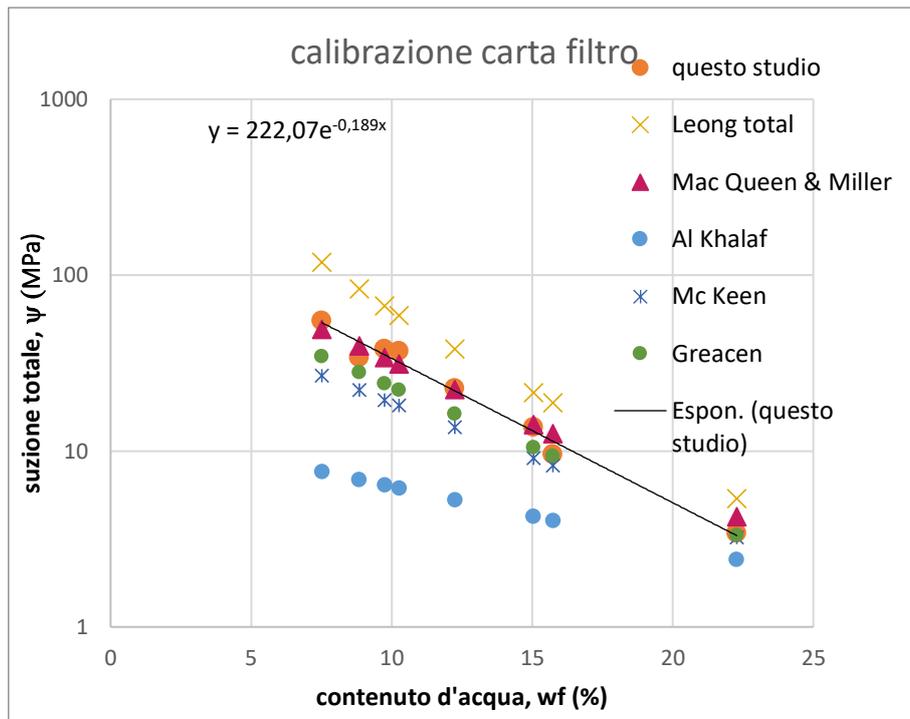
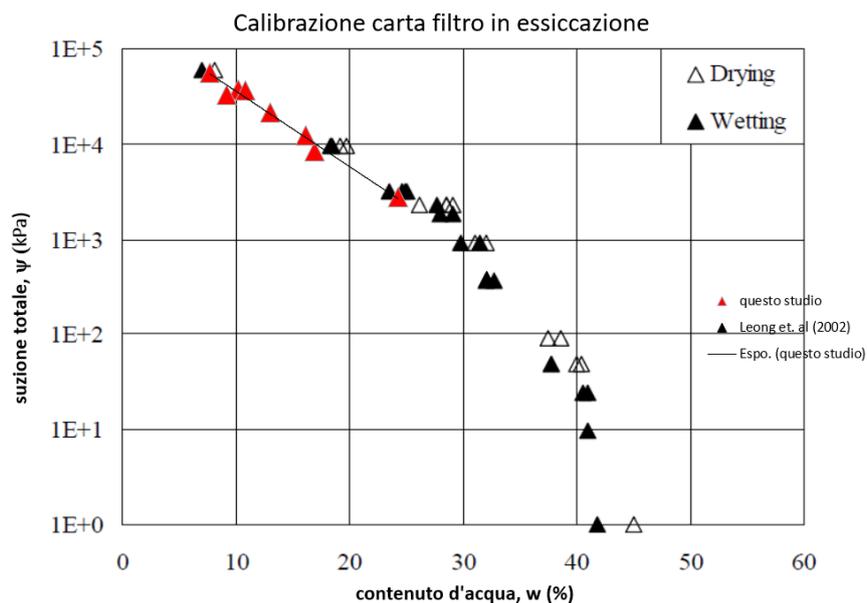


Figura 64: Confronto tra i valori ottenuti con la calibrazione della carta filtro e i valori proposti in letteratura

È possibile asserire che i valori sperimentali ottenuti con la tecnica dell'equilibrio di vapore sono coerenti con la letteratura, in particolare per suzioni elevate si adattano bene alla soluzione proposta da Mc Queen & Miller (1968) che prepararono campioni di carta da filtro S&S n.589 con una soluzione al 3% di pentaclorofenolo in etanolo. Alle suzioni più basse i valori tendono a ricalcare la soluzione proposta da Greacen et al. (1987).

Infine, è stata effettuata una sovrapposizione dei dati sperimentali con quelli ottenuti dagli autori Leong et. al (2002) per evidenziare il fenomeno di isteresi in cui i valori ottenuti in essiccazione e quelli sul percorso di imbibizione differiscono dell'1% a bassi valori di contenuto d'acqua fino ad un margine del 12% per valori più elevati.



Analogamente a quanto descritto in precedenza le carte da filtro vengono calibrate anche per la fase di imbibizione.

In questa fase si utilizzano carte da filtro S&S n589 inizialmente asciutte, precedentemente passate in forno per eliminare le impurità e successivamente lasciate equilibrare a temperatura costante all'interno di bustine ermetiche poste in un contenitore con umidità controllata.

Sale	$\Psi$ [MPa]	T [°C]	M [n°moli/l]
NaNO <sub>3</sub>	40,43	21,5	0,79
KNO <sub>3</sub>	14,44	21,5	7,36
KCl	24,65	21,5	2,06
NaCl	37,42	21,5	5,05
NaNO <sub>2</sub>	60,48	21,5	8,48
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	7,83	21,5	13,60
NH <sub>4</sub> Cl	35,38	21,6	11,13
BaCl <sub>2</sub> 2H <sub>2</sub> O	16,6	21,4	14,73

Tabella 5: Suzione totale, Temperatura, Molarità ottenute per le differenti soluzioni saline

Le carte da filtro vengono posizionate all'interno dei contenitori a chiusura stagna e in 14 giorni si equilibrano con l'umidità, presente all'interno del contenitore, assorbendo vapore e quindi è possibile associare il rispettivo valore di contenuto d'acqua al valore di suzione proposto in Tabella 5.

Di seguito si riportano i valori ottenuti con la relativa retta interpolante:

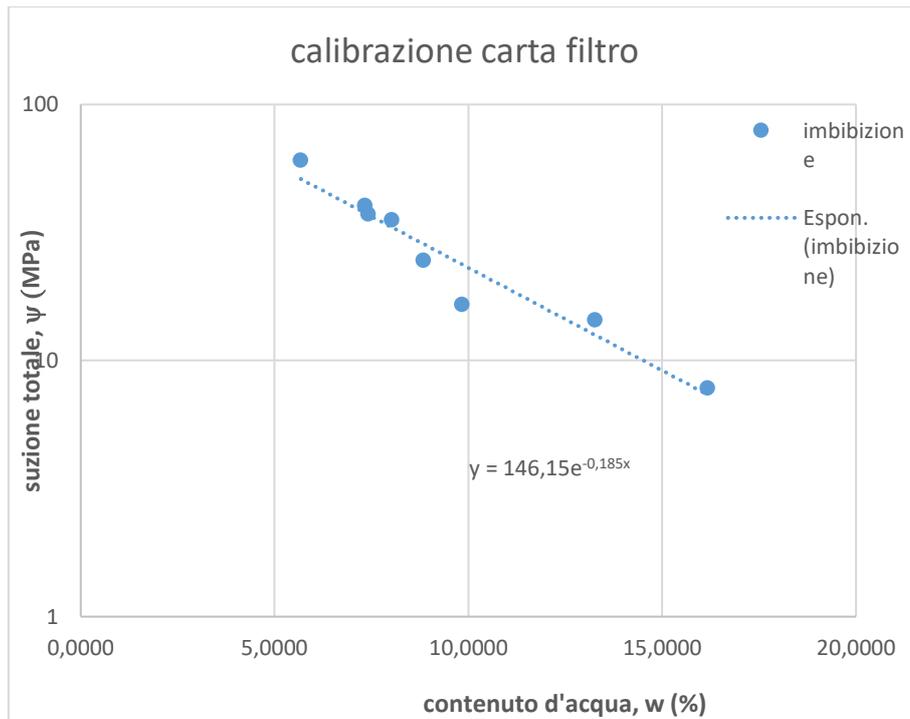


Figura 65: Valori ottenuti con la calibrazione della carta da filtro in imbibizione

### 6.3.2 Gestione dei dati sperimentali: Essiccazione

Per la prova eseguita con carta filtro sono stati preparati due provini, con le stesse caratteristiche, per ogni miscela, questo perché la prova consente nel determinare la suzione di matrice e la suzione totale.

I provini vengono assemblati uno sopra l'altro e in mezzo si dispongono tre dischi di carta filtro S&S n589. I due dischi più esterni, a contatto con i provini, servono per evitare che il disco centrale sia affetto da impurezze e di conseguenza riporti un valore di massa errato al momento della pesata. Il disco al centro, di diametro ridotto, varia il contenuto d'acqua essendo a contatto con i due provini, il valore corrispondente viene associato ad una suzione di matrice. Contemporaneamente al di sopra dei due provini si dispongono due carte da filtro tipo S&S n.589, queste assorbiranno umidità dall'aria all'interno dei contenitori ermetici in cui sono posti. Il contatto è evitato, mediante un separatore in plastica, affinché si possa associare il contenuto medio delle due carte da filtro con la suzione totale.

Infine, i campioni vengono rivestiti con nastro isolante e messi ad equilibrare per un periodo di 14 giorni conforme alla calibrazione.



*Figura 66: Provini con carta filtro per la misura della suzione di matrice*

Una volta ogni 14 giorni si ricavano i valori delle masse umide delle carte da filtro, poi si passano in forno a 50°C per tre ore in modo da renderle completamente asciutte, a questo punto è possibile ricavare il contenuto d'acqua. Ogni volta che questa operazione viene eseguita i provini di cemento bentonite vengono lasciati asciugare all'aria, a temperatura controllata, per circa tre ore, tempo utile affinché l'acqua presente nella miscela possa evaporare sufficientemente. Questa operazione permette di ottenere punti distanziati sulla curva di ritenzione poiché si riduce sensibilmente il contenuto d'acqua.

Interpolando il grafico della calibrazione della carta filtro riportato nel grafico 18 si ottiene un corrispondente valore di suzione, questo viene associato al contenuto d'acqua medio dei due provini e si costruiscono i grafici di seguito riportati.

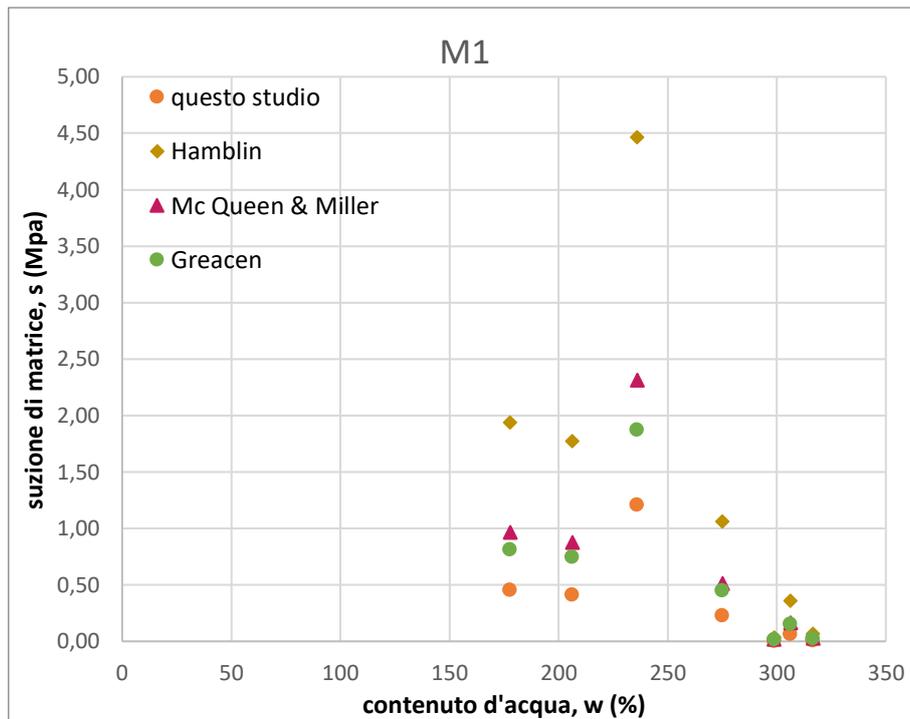


Figura 67: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M1 in essiccazione

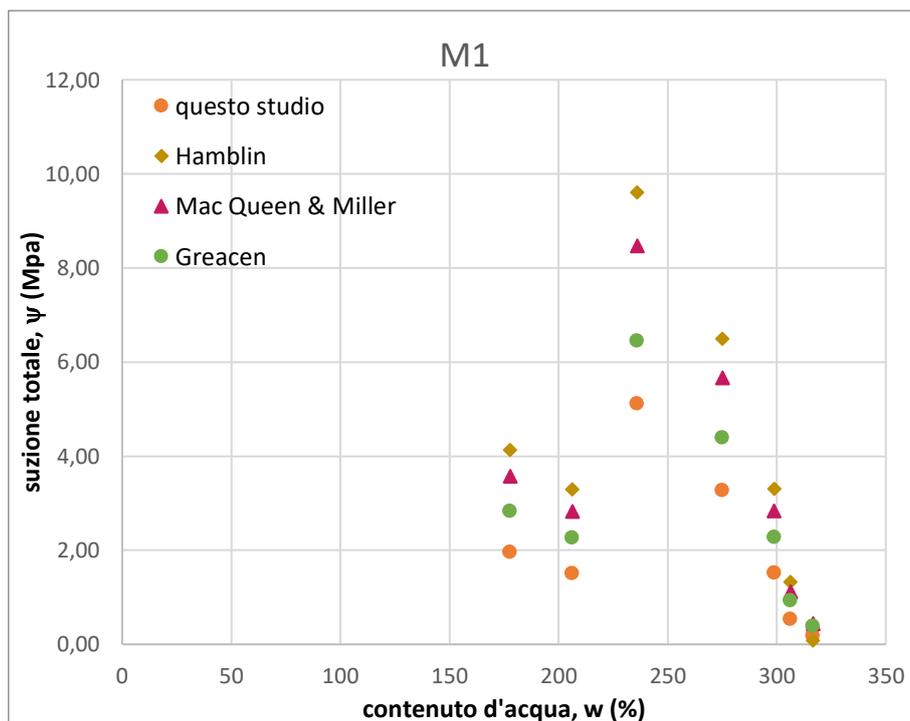


Figura 68: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M1 in essiccazione

I grafici riportano un confronto con i valori ottenuti dalla letteratura secondo Mc Queen & Miller (1968) calcolati con le formule in Figura 32 e Hamblin (1981) che utilizza un'equazione logaritmica a doppio ceppo (Equazione 20). Si può apprezzare come i valori abbiano lo stesso trend indipendentemente dal tipo di equazione o metodo utilizzato per

il calcolo della suzione, con la differenza che quelli misurati sperimentalmente, con la tecnica della carta filtro sopra descritta, riportano un valore più basso di suzione a parità di contenuto d'acqua.

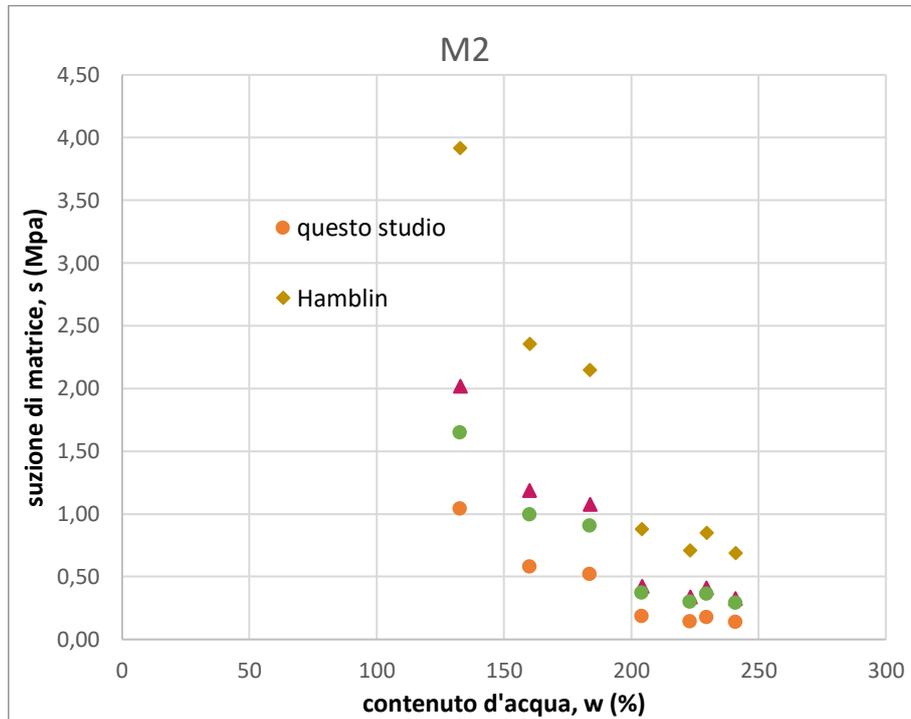


Figura 69: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M2 in essiccazione

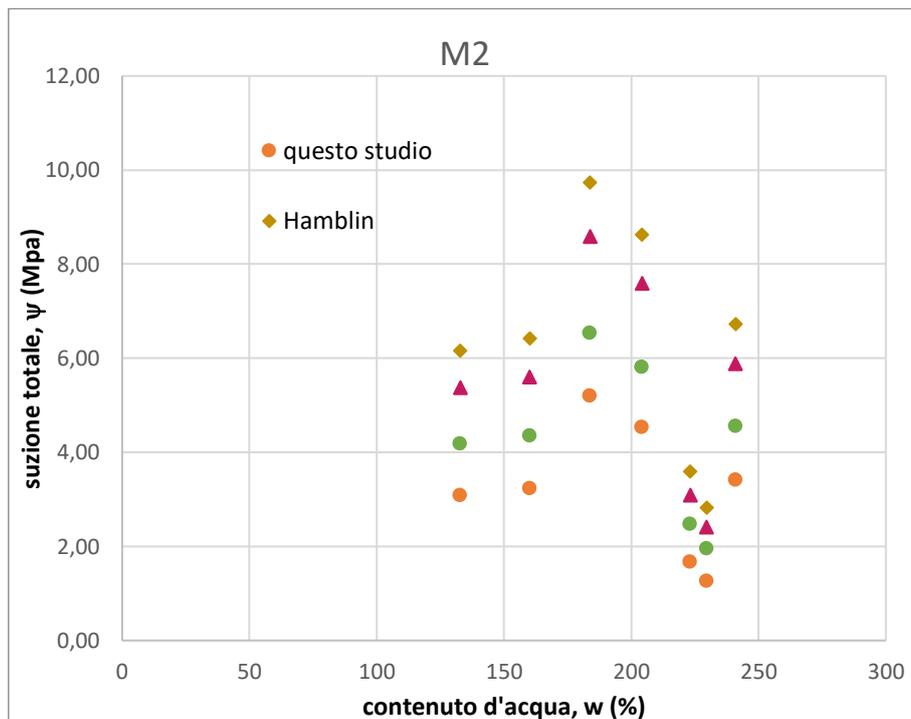


Figura 70: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M2 in essiccazione

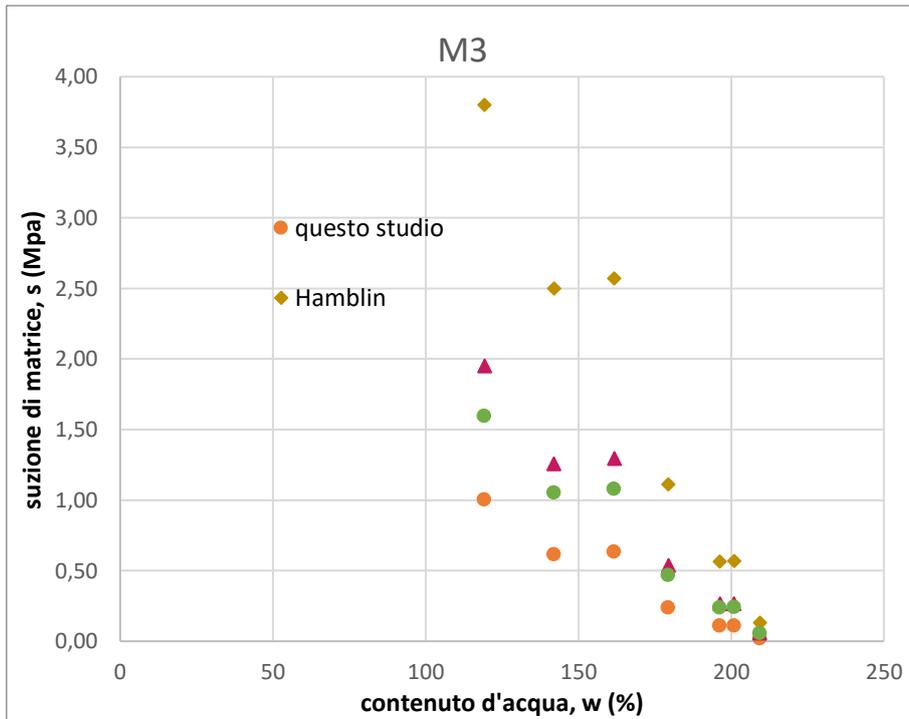


Figura 71: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M3 in essiccazione

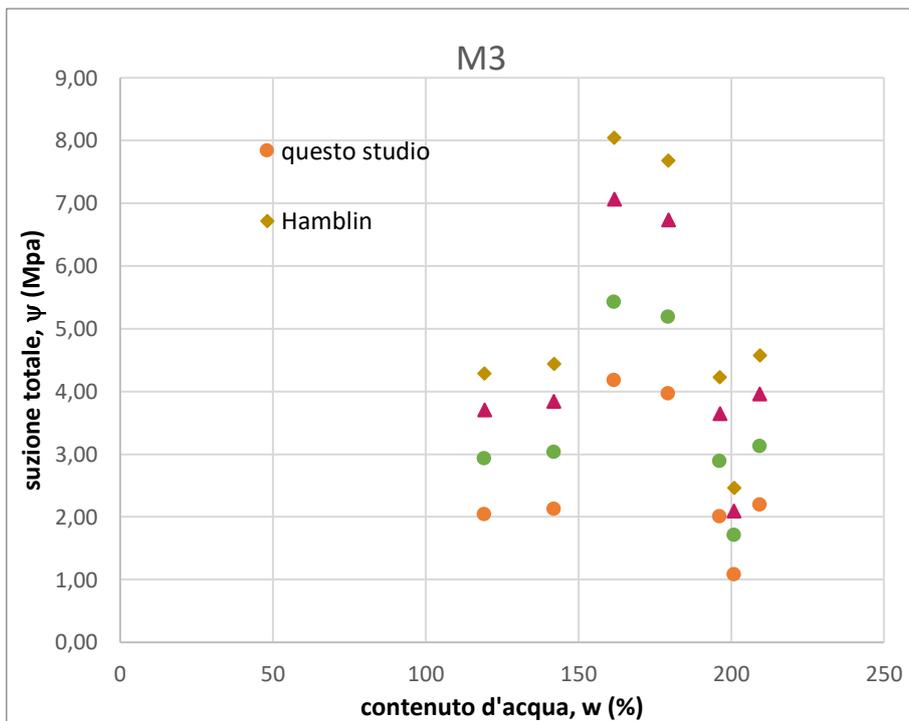


Figura 72: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M3 in essiccazione

Dopo aver misurato il peso e le dimensioni dei provini si esegue nuovamente la procedura della tecnica della carta filtro fino a quando, dopo 135 giorni, i provini vengono lasciati 7 giorni all'aria, a temperatura controllata, per lasciar evaporare tutta l'acqua ancora presente all'interno della miscela.

### 6.3.3 Gestione dei dati sperimentali: Imbibizione

Si procede con la prova di imbibizione in cui i provini vengono portati ad un contenuto d'acqua prestabilito. La procedura di prova è la stessa descritta precedentemente per la fase di essiccazione.

I valori di contenuto d'acqua, ai quali vengono portati i provini, sono rispettivamente 70% e 120% circa. La procedura di idratazione è eseguita mediante l'uso di una buretta graduata, l'acqua viene fatta gocciolare sui provini fino al raggiungimento della massa umida relativa al contenuto d'acqua predeterminato.

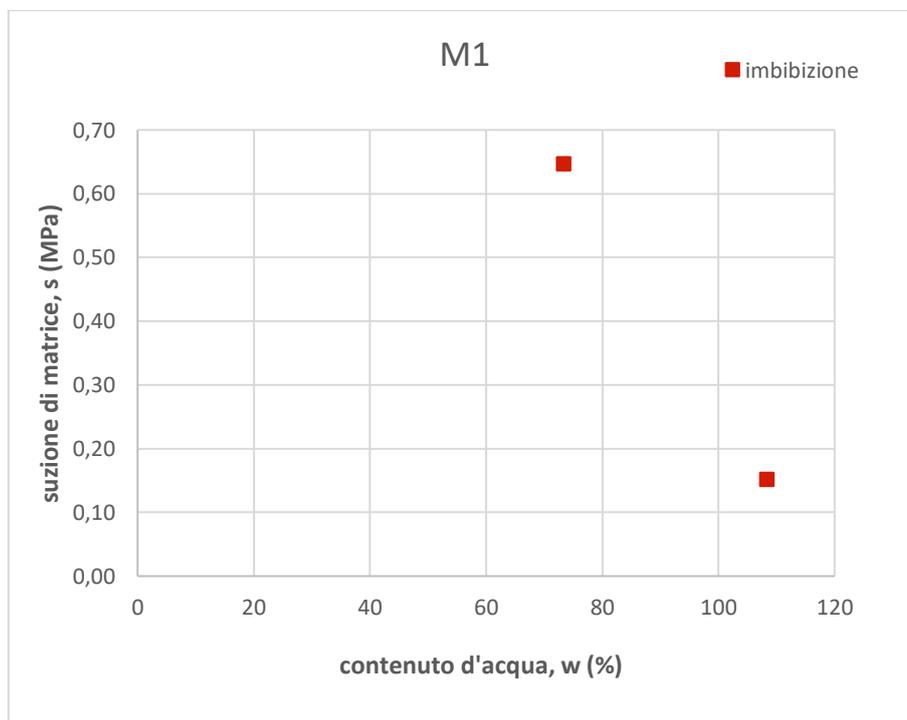


Figura 73: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M1 in imbibizione

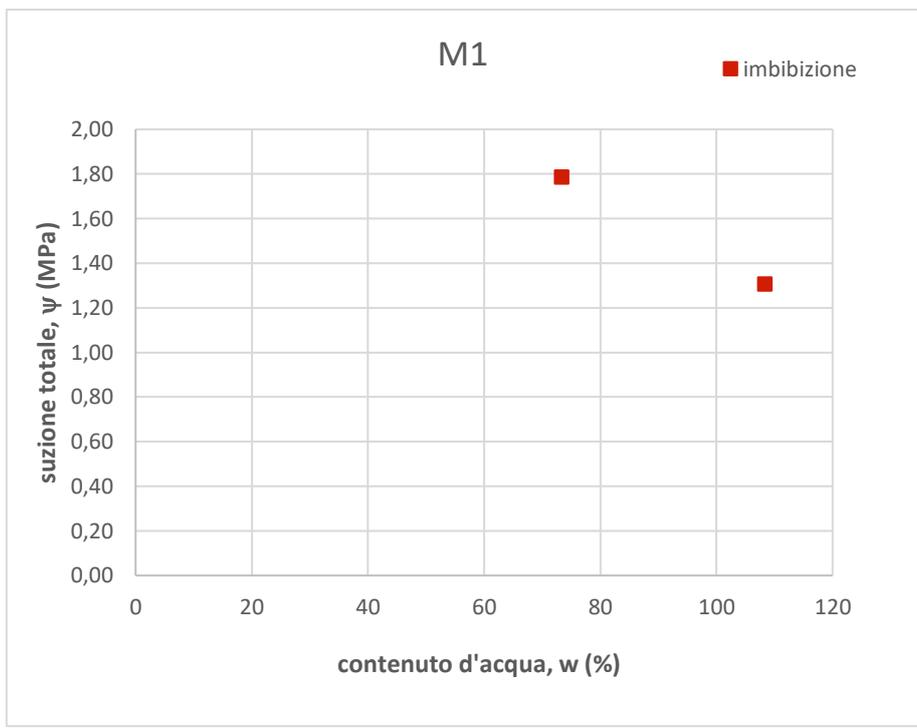


Figura 74: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M1 in imbibizione

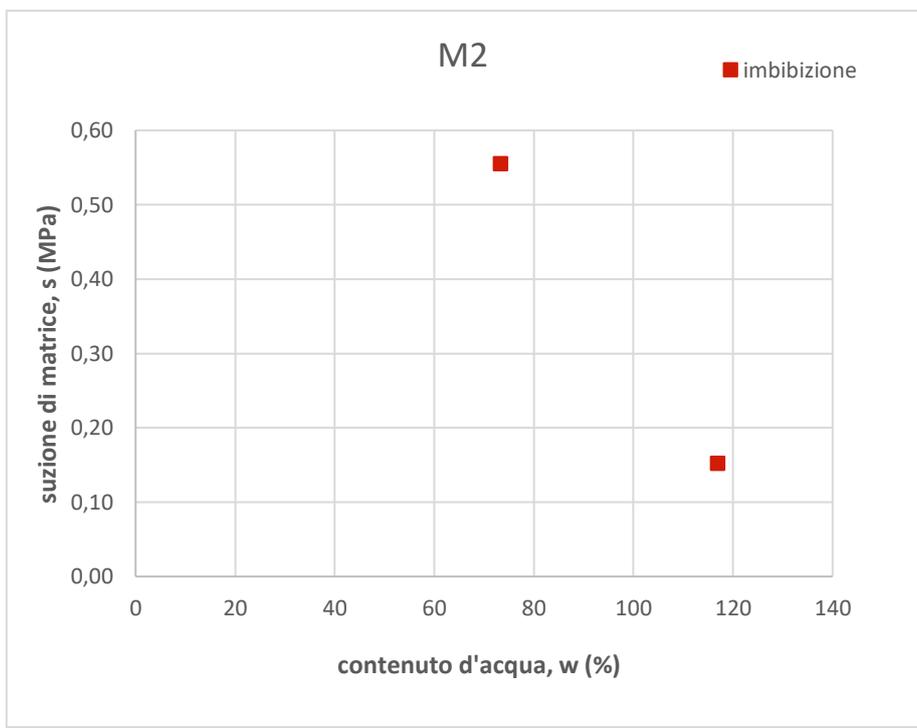


Figura 75: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M2 in imbibizione

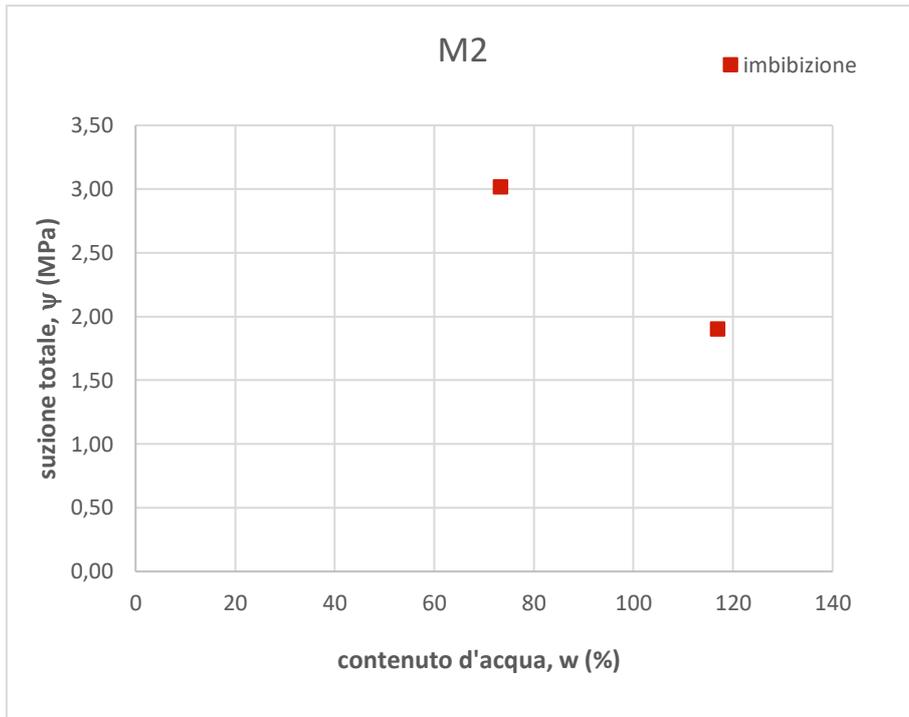


Figura 76: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M2 in imbibizione

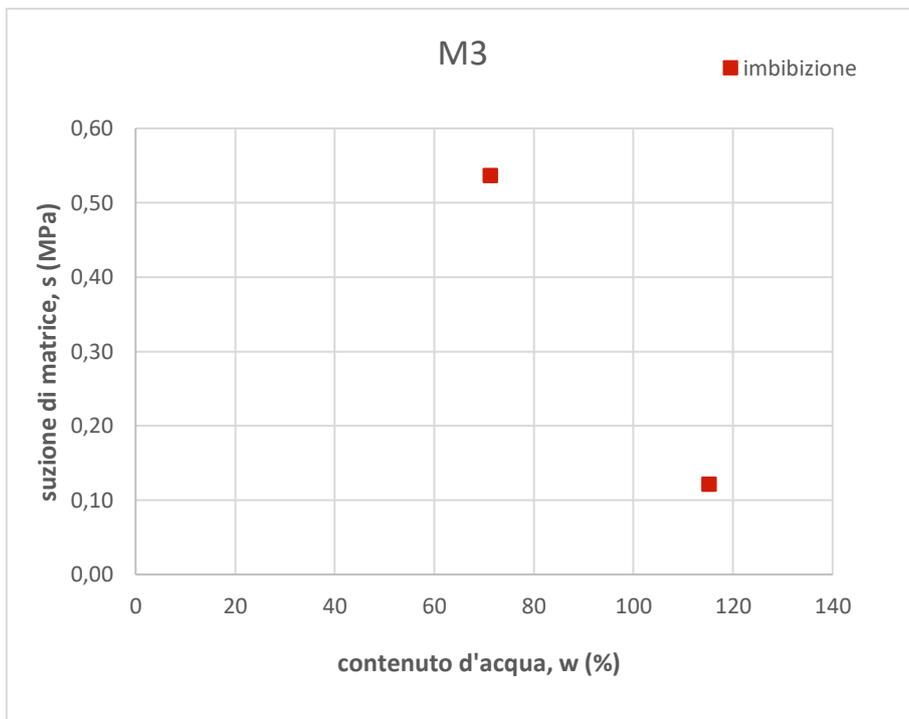


Figura 77: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M3 in imbibizione

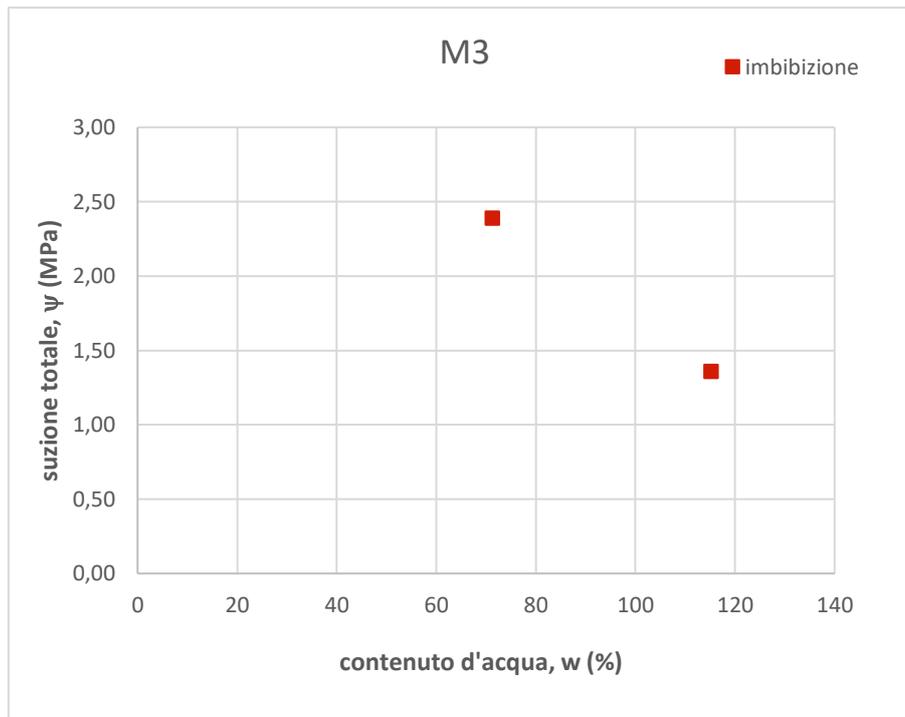


Figura 78: Risultati ottenuti con la tecnica della carta da filtro per la miscela M3 in imbibizione

## 6.4 Edometro a suzione controllata

### 6.4.1 Gestione dei dati sperimentali: Essiccazione

Le pressioni dell'aria e dell'acqua vengono impostate attraverso l'apposito comando "Rampe" del programma Labview, mentre quella assiale viene incrementata manualmente al crescere della pressione assiale. In generale le pressioni dell'aria e assiale vengono mantenute costanti mentre si modifica la pressione dell'acqua per variare la suzione, si tenga presente che l'edometro a suzione controllata ammette un limite di suzione minimo pari a 10 kPa.

Iniziando con un ciclo di essiccazione si aumenta la suzione ad ogni step. L'andamento della saturazione del campione mostra una variazione marcata nei primi giorni dall'applicazione del valore di suzione, variazione che diventa minima fino ad assumere un andamento asintotico. Il raggiungimento dell'andamento asintotico denota una condizione di equilibrio e indica il momento in cui si può passare alla suzione successiva.

Successivamente si può realizzare un ciclo di imbibizione che viene realizzato in modo analogo alla fase di essiccazione.

A tal proposito si eseguono tre step con le suzioni di 50 kPa, 150 kPa e 300 kPa, di seguito si riportano i grafici del volume d'acqua uscito dal campione e registrato in entrata al volumometro.

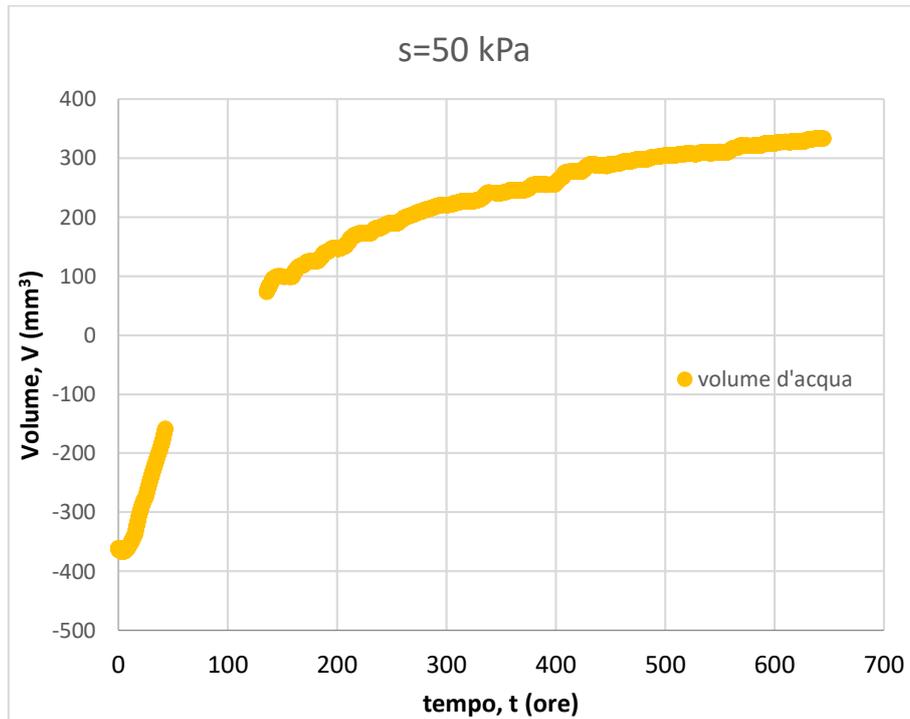


Figura 79: Andamento nel tempo del volume d'acqua per suzione di matrice 50 kPa

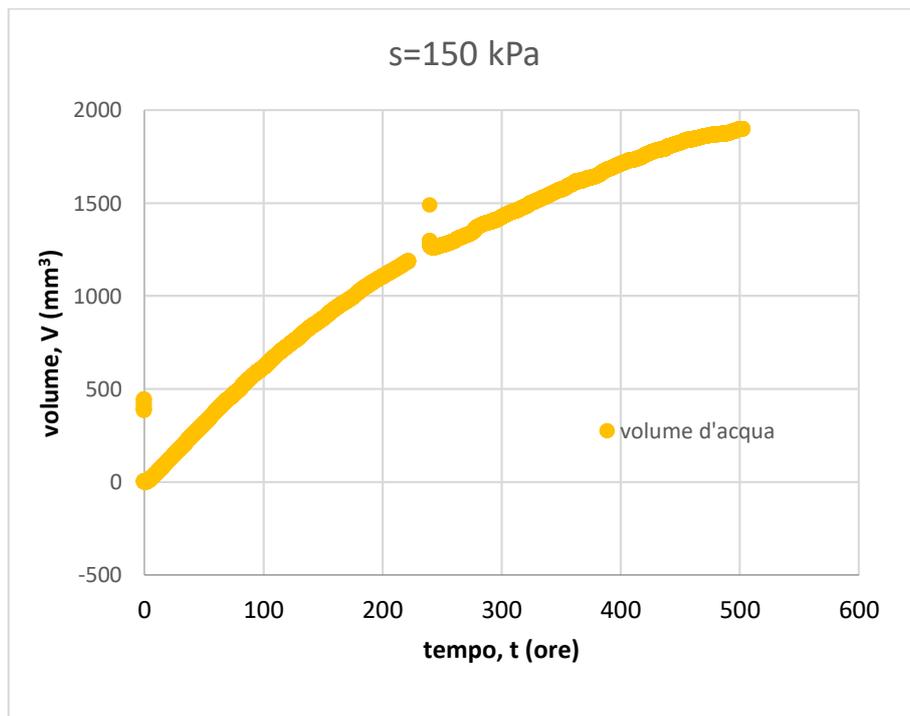


Figura 80: Andamento nel tempo del volume d'acqua per suzione di matrice 150 kPa

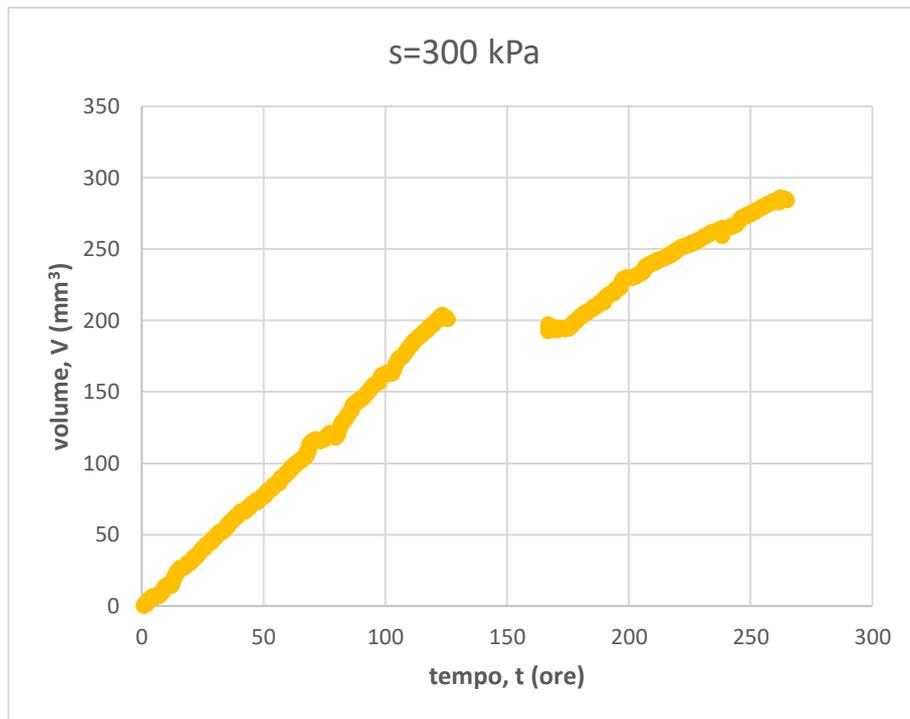


Figura 81: Andamento nel tempo del volume d'acqua per suzione di matrice 300 kPa

Alla fine del processo, quando i valori assumono un andamento asintotico, il campione viene pesato per ottenere la massa umida e successivamente, alla fine della prova, viene passato in forno per ottenere la massa secca e quindi il contenuto d'acqua.

#### 6.4.2 Gestione dei dati sperimentali: imbibizione

Analogamente a quanto descritto nella fase di essiccazione, il processo di imbibizione segue lo stesso principio, con la differenza che il provino tenderà ad assorbire acqua e quindi i valori di volume d'acqua scambiati con il volumometro saranno negativi, secondo la convenzione adottata. Il provino viene lasciato essiccare all'aria, successivamente per colmare il vuoto, generato dal ritiro, tra il provino e l'anello edometrico, si cola una miscela di araldite. Questo materiale è una colla epossidica che assume un'elevata rigidità a seguito della fase di indurimento, questa caratteristica permette di vincolare lateralmente il provino. Si possono quindi ricavare i valori di spostamento, si parla di rigonfiamento. Per la prova in esame si utilizzano due valori di suzione, il primo regolato a 300 kPa e il secondo a 150 kPa. Utilizzando il metodo della sovrappressione dell'aria, si mantiene la pressione dell'aria costante e si fa variare la pressione dell'acqua nel campo positivo. Di seguito si riportano i grafici con l'andamento dei volumi d'acqua utili a definire la stabilizzazione del provino sotto le condizioni di carico applicate.

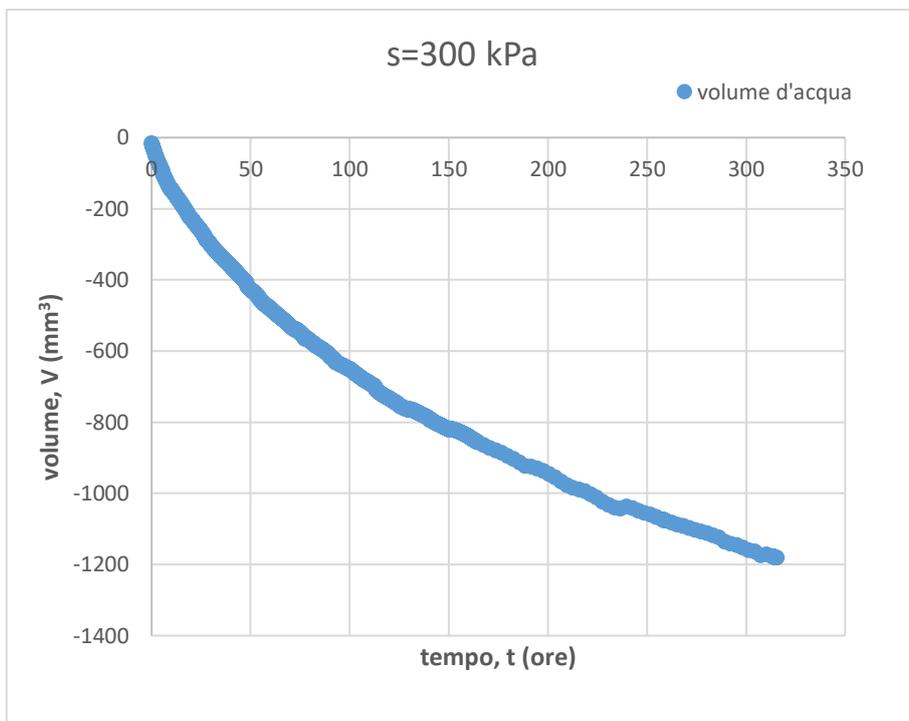


Figura 82: Andamento nel tempo del volume d'acqua per suzione di matrice 300 kPa in imbibizione

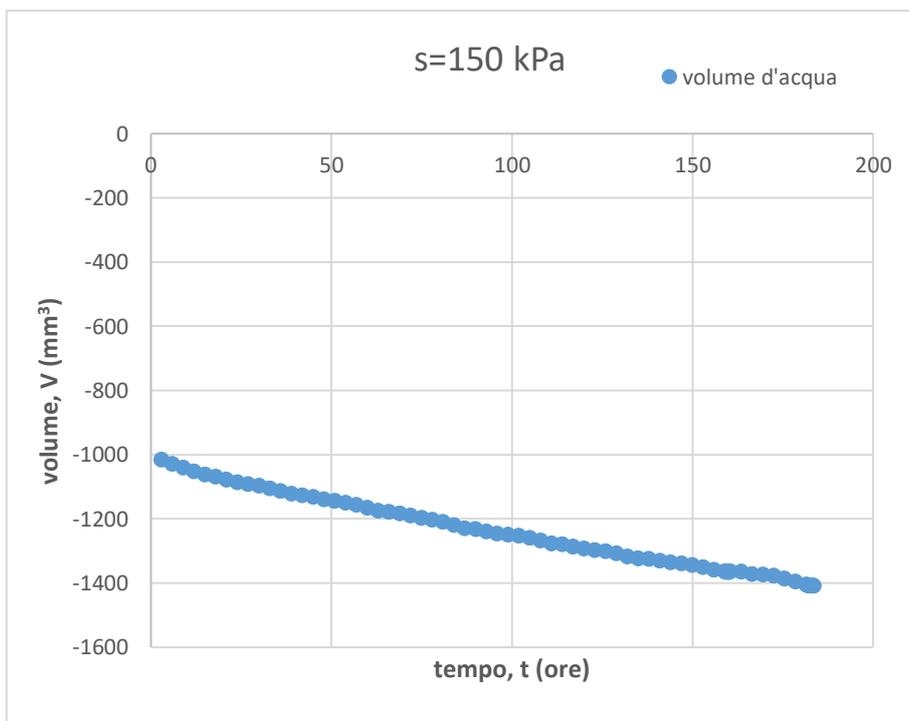


Figura 83: Andamento nel tempo del volume d'acqua per suzione di matrice 150 kPa in imbibizione

Si riportano i valori ottenuti con la tecnica della traslazione degli assi, mediante l'edometro a suzione controllata, per le fasi di essiccazione e imbibizione, per la miscela M1.

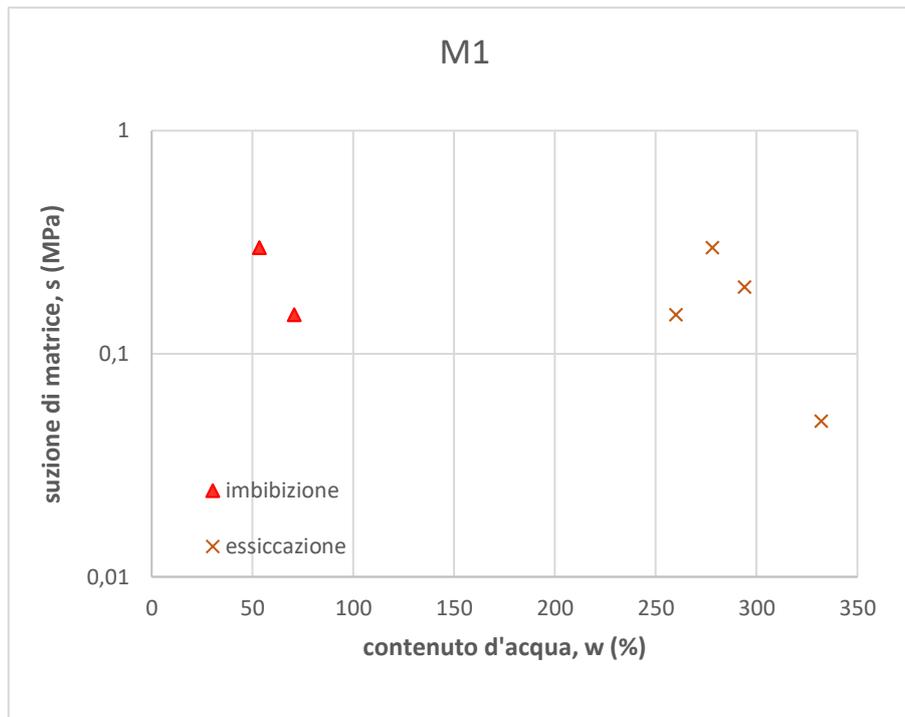


Figura 84: valori ottenuti con l'edometro a suzione controllata

### 6.4.3 Problematiche riscontrate

Durante il percorso di essiccazione, eseguito con l'edometro a suzione controllata, i maggiori problemi sono imputabili al software.

Un'impostazione del software per la sicurezza riavvia il computer nelle fasi serali della giornata, questo per poter effettuare aggiornamenti scaricati da Internet al seguito del collegamento per il trasferimento dei dati. Per effetto del riavvio e del conseguente spegnimento del computer il software Labview smette di acquisire dati e questo spiega i gaps nella Figura 79, nella Figura 80 e nella Figura 81. Parallelamente alla mancata rilevazione di dati, le schede di input delle pressioni d'aria e d'acqua vengono scollegate e quindi azzerate le relative pressioni nella cella edometrica, questo porta ad una pressione assiale elevata sulla superficie del provino che subisce una compressione dovuta al carico ed una conseguente variazione dell'altezza. Ricordando l'Equazione 27 e sostituendo i valori nulli delle pressioni d'aria e d'acqua si ottiene che la tensione verticale è uguale alla pressione assiale divisa per la superficie del provino.

Per ovviare a questo problema si è operato in diversi metodi:

- in primo luogo, si sono messi gli aggiornamenti in una situazione di standby per un periodo di 35 giorni;
- si evita la connessione ad Internet tramite cavo ethernet riportando i dati manualmente;

- dopo aver applicato la pressione assiale al valore calcolato si sostituisce il trasduttore LVDT con un'asta metallica, al fine di mantenere il contrasto verticale, dopodiché si abbassa la pressione fino al valore nullo. Gli spostamenti verticali saranno misurabili manualmente con il calibro a fine della prova.

## 7. Interpretazione dei dati

Facendo riferimento ai dati ottenuti con tutte le prove precedentemente descritte si sono costruite le curve di ritenzione in termini di suzione-contenuto d'acqua e suzione-grado di saturazione, quest'ultimo è stato anche calcolato come grado di saturazione efficace o irriducibile. Per interpolare i dati si è utilizzata la curva di Van Genuchten ottenuta con l'Equazione 10, che si riporta di seguito per una migliore comprensione dei parametri utilizzati:

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

Quando la suzione di matrice  $s \geq 0$  allora l'espressione è dipendente da tre parametri  $\alpha$ ,  $n$ ,  $m$ . Questi vengono fatti variare indipendentemente al fine di ottenere un trend che meglio approssima i dati sperimentali.

Un altro metodo efficace per stimare i parametri della curva di Van Genuchten è il metodo dei minimi quadrati in cui si fa la somma degli scarti, in termini di grado di saturazione per ogni valore di suzione, elevati al quadrato. Infine, si variano i parametri per minimizzare la somma degli scarti.

Si riportano di seguito i valori dei parametri per le tre miscele studiate:

	$\alpha$ [cm <sup>-1</sup> ]	$n$ [-]	$m$ [-]
M1	0,5	1,4	0,8
M2	0,9	1,4	0,7
M3	0,8	1,4	0,7

Tabella 6: Parametri della curva di van Genuchten

Al fine di diagrammare le curve di ritenzione in termini di grado di saturazione, per ogni tipologia di prova sperimentale si sono misurate manualmente, mediante un calibro, le dimensioni dei provini. Da queste misure è possibile risalire alla variazione di volume

$$\varepsilon_V = - \frac{V_i - V_0}{V_0}$$

Equazione 36

In cui  $V_0$  è il volume iniziale del provino, misurato alla fine della fase di maturazione, considerato completamente saturo.  $V_i$  è il volume misurato all' $i$ -esimo istante durante la procedura di prova.

A questo punto è possibile calcolare l'indice dei vuoti conoscendo l'indice dei vuoti iniziale  $e_0$  secondo la formula:

$$e = e_0 + \varepsilon_v(1 + e_0)$$

Equazione 37

A questo punto è possibile calcolare il grado di saturazione

$$S_r = \frac{G_s \cdot W}{e}$$

Equazione 38

Di seguito si riportano i valori degli indici dei vuoti, per le fasi di essiccazione e imbibizione delle tre miscele, diagrammati con la suzione di matrice.

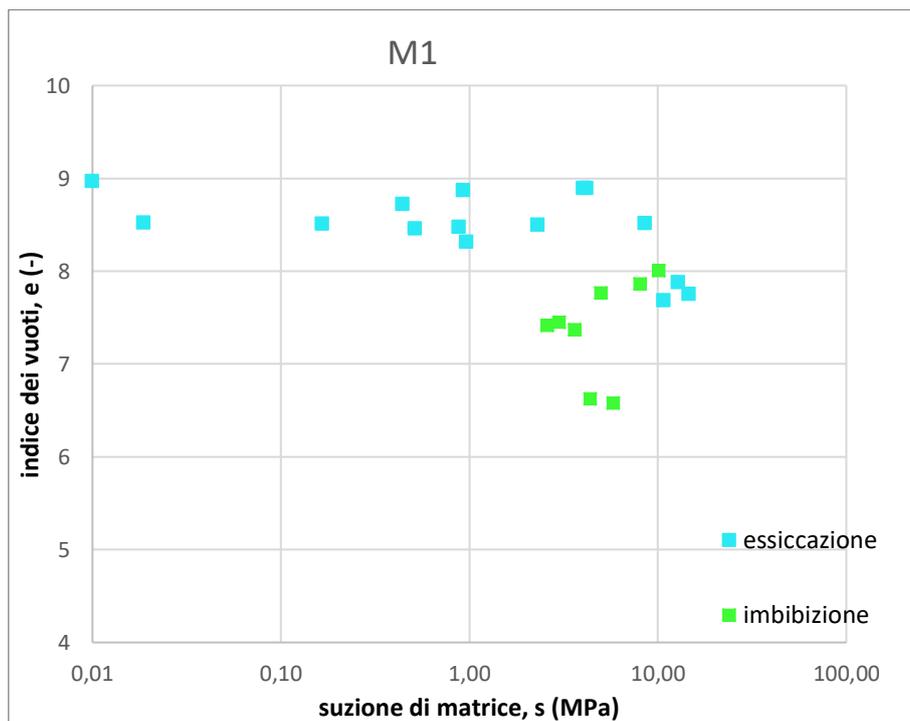


Figura 85: indice dei vuoti della miscela M1

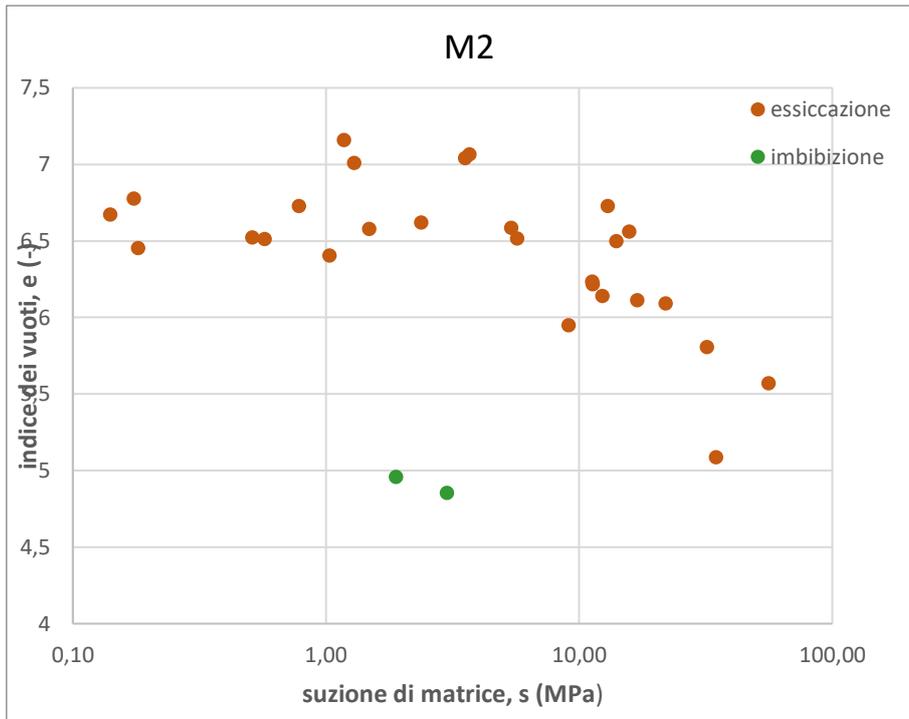


Figura 86: indice dei vuoti della miscela M2

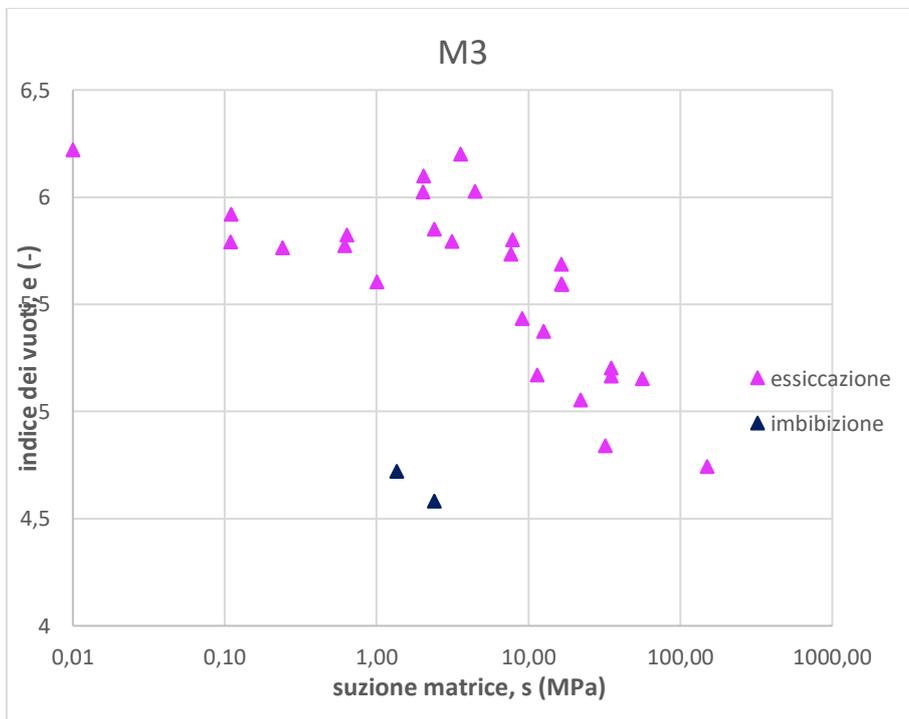


Figura 87: indice dei vuoti della miscela M3

Si può notare che a seguito delle fasi di essiccazione e imbibizione ad uguali valori di suzione, l'indice dei vuoti varia. Questo fenomeno di isteresi è dovuto al fatto che il volume dei vuoti nella fase di essiccazione è diverso rispetto alla fase di imbibizione.

Ricordando che l'indice dei vuoti può essere espresso come il rapporto tra il volume dei vuoti  $V_v$  e il volume del solido  $V_s$  secondo la relazione:

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

Equazione 39

Il volume del solido rimane inalterato durante le due fasi, perciò variando il volume dei vuoti, l'indice dei vuoti varia in maniera direttamente proporzionale.

Di seguito si riporta una sovrapposizione dei valori ottenuti per le tre miscele

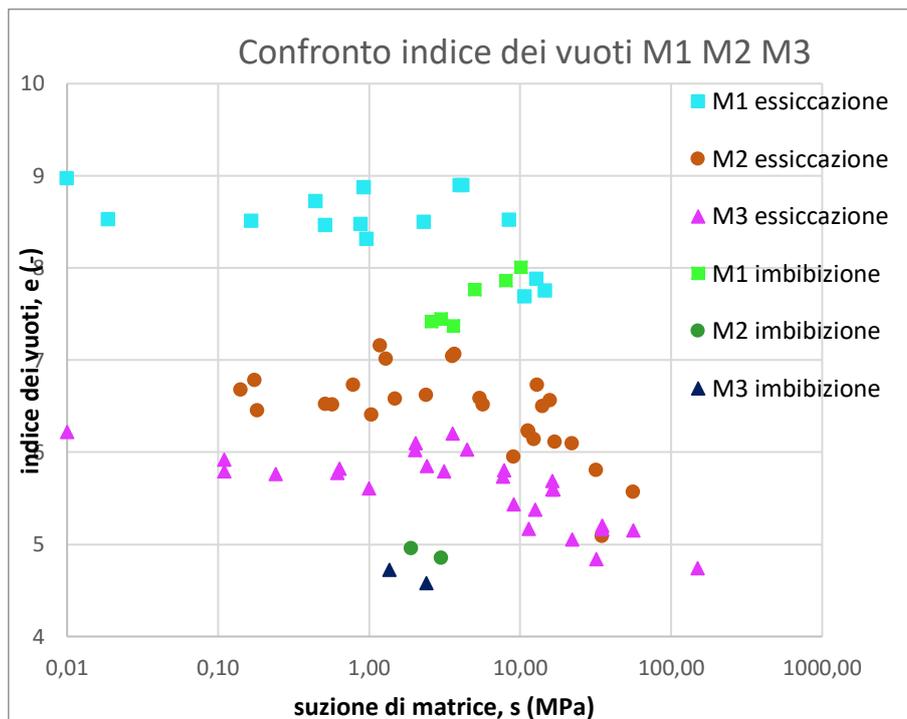


Figura 88: confronto degli indici dei vuoti per le tre miscele

Infine si riportano le curve di ritenzione ottenute con tutti i dati sperimentali.

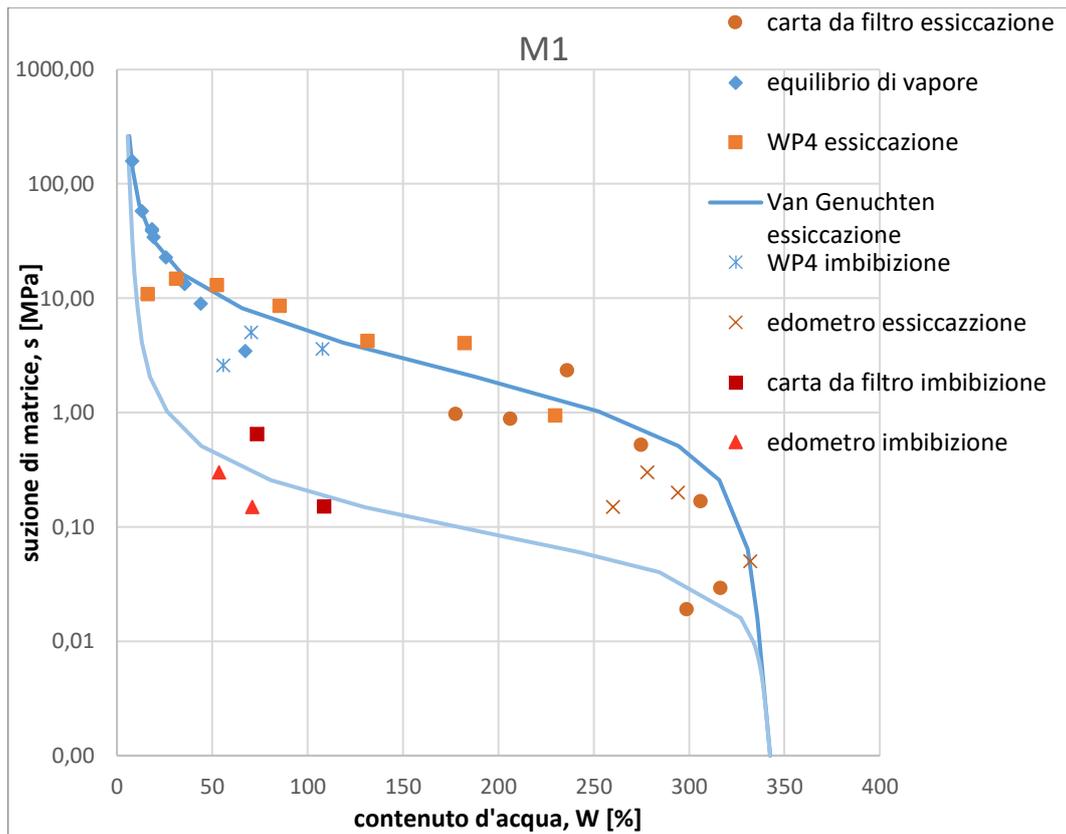


Figura 89: Curva di ritenzione in termini di contenuto d'acqua e suzione di matrice per la miscela M1

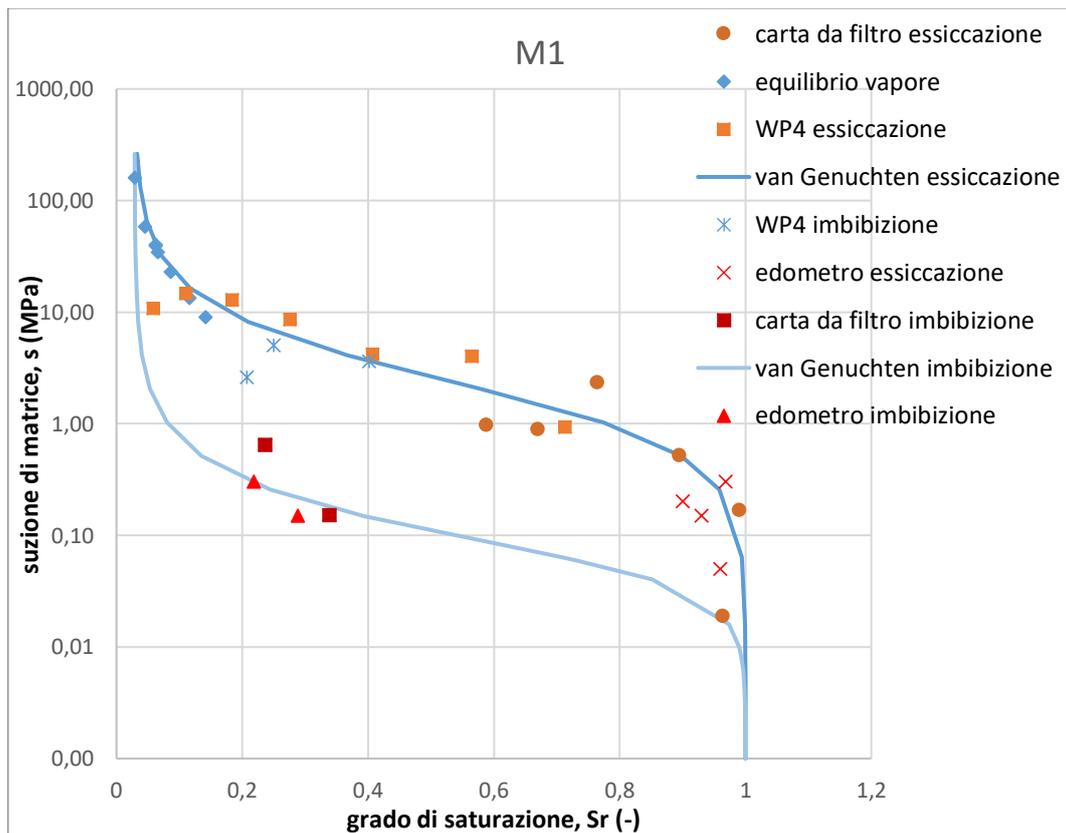


Figura 90: Curva di ritenzione in termini di grado di saturazione e suzione di matrice per la miscela M1

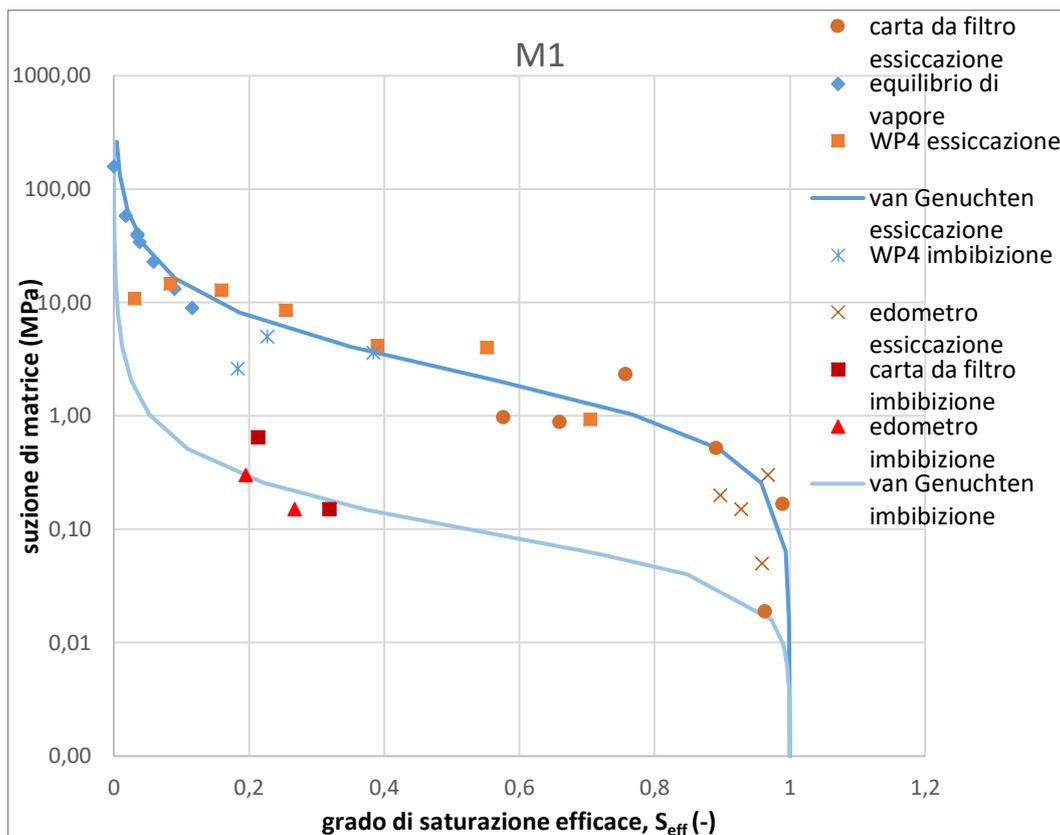


Figura 91: Curva di ritenzione in termini di grado di saturazione efficace e suzione di matrice per la miscela M1

Da una prima analisi si può notare che alcuni punti si trovano al di fuori della curva interpretata con le formule di van Genuchten. Ad esempio, i punti misurati con l'edometro a suzione controllata durante la fase di essiccazione non sono adiacenti alla curva, questo perché i provini avevano delle condizioni iniziali differenti essendo stati colati in tempi diversi. Una delle differenze riscontrate è il contenuto d'acqua iniziale, sebbene le miscele abbiano le stesse quantità in peso di acqua, cemento e bentonite, durante le fasi di miscelazione e indurimento possono aver subito delle variazioni.

Una differenza più apprezzabile si riscontra nell'indice dei vuoti iniziale, dipendente dal contenuto d'acqua secondo l'Equazione 38 inversa e considerando un grado di saturazione iniziale uguale a uno.

Si procede quindi alla redazione dei grafici per le miscele M2 e M3

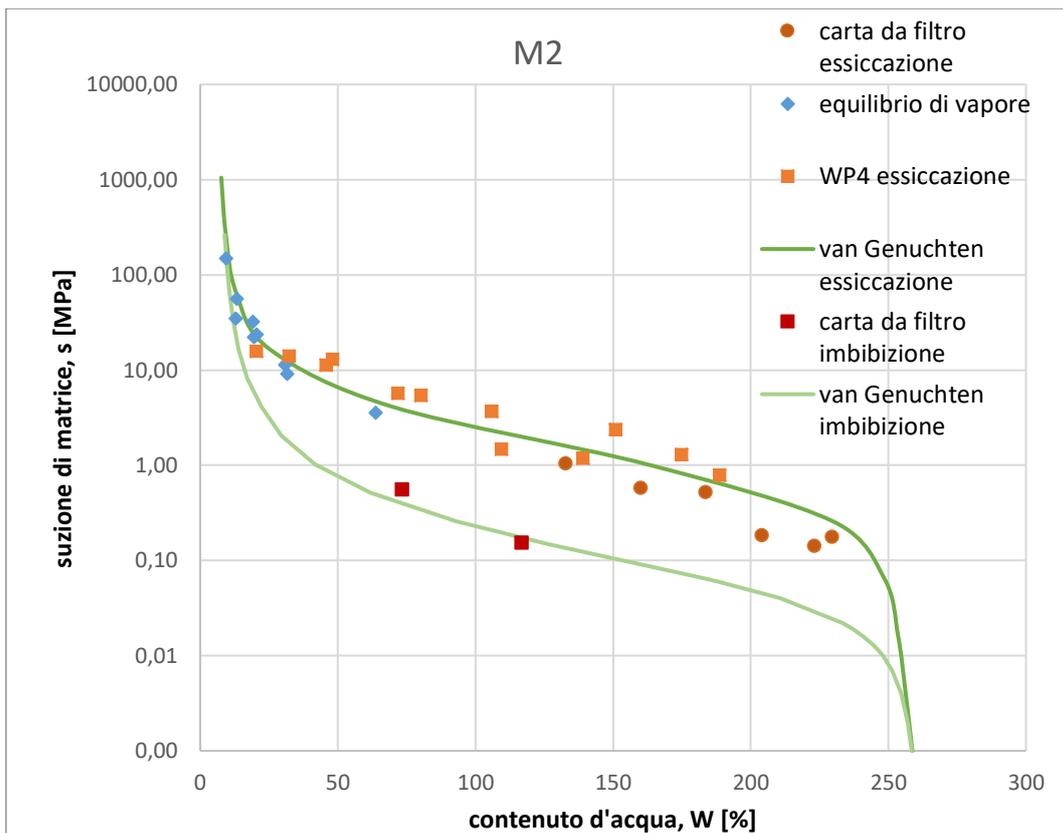


Figura 92: Curva di ritenzione in termini di contenuto d'acqua e suzione di matrice per la miscela M2

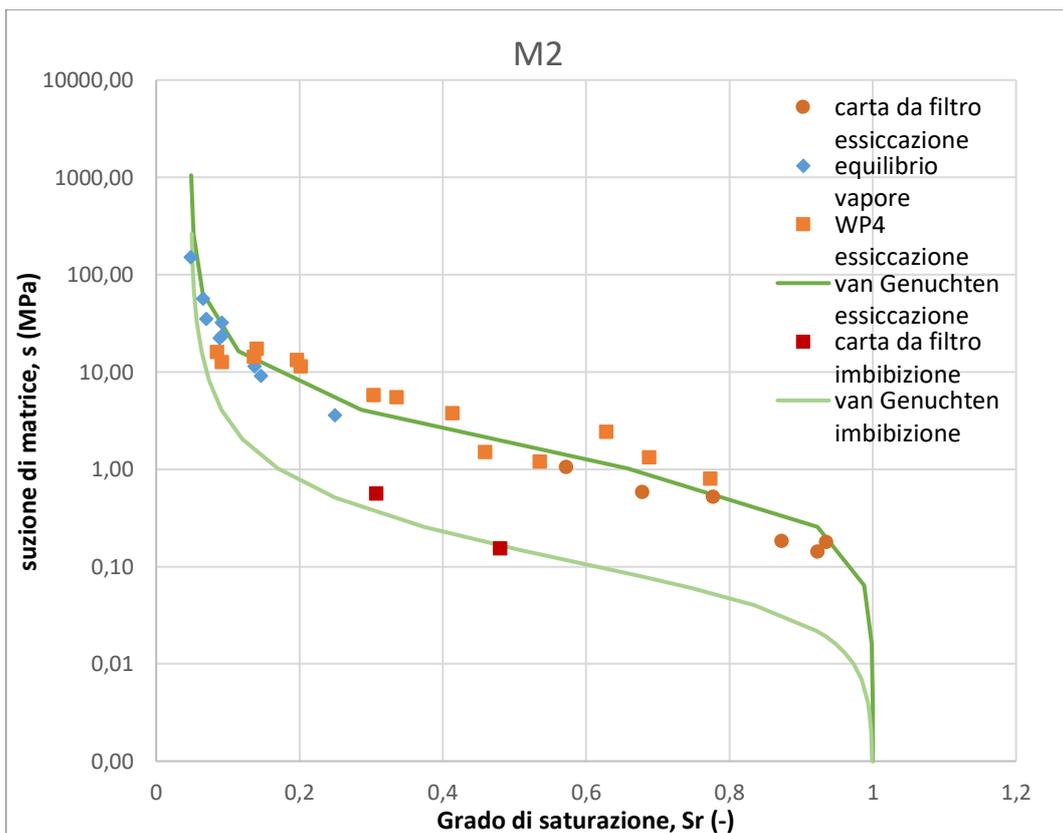


Figura 93: Curva di ritenzione in termini di grado di saturazione e suzione di matrice per la miscela M2

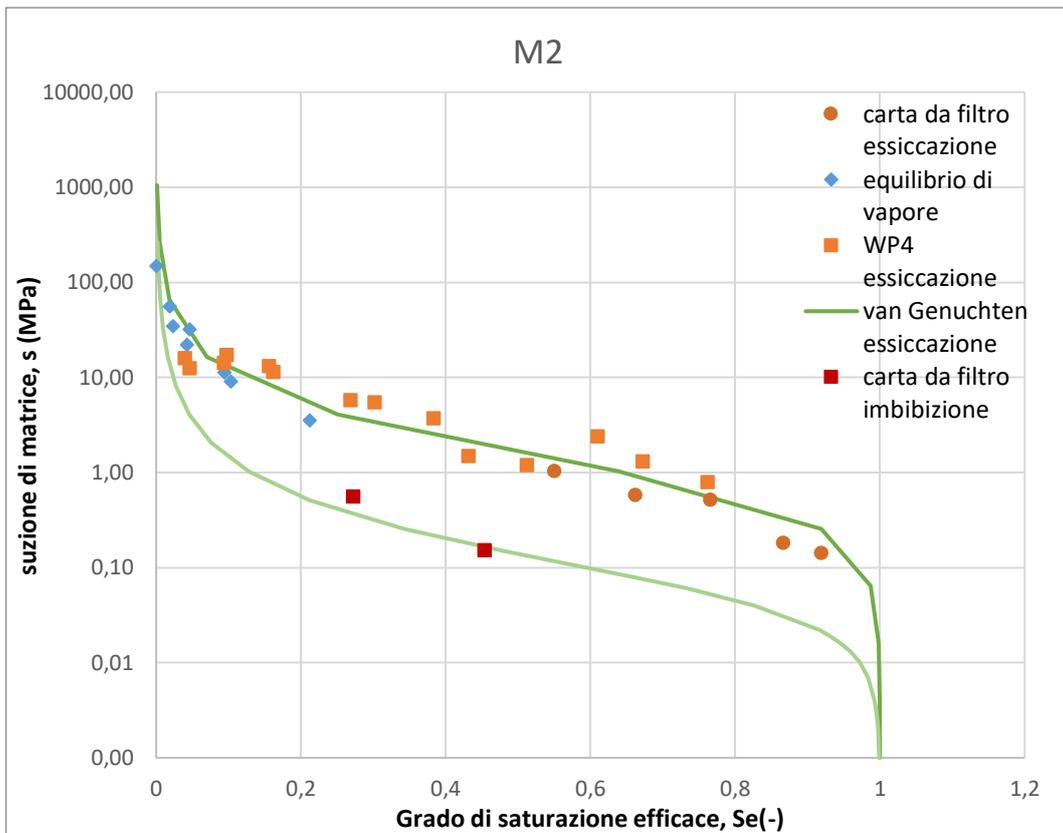


Figura 94: Curva di ritenzione in termini di grado di saturazione efficace e suzione di matrice per la miscela M2

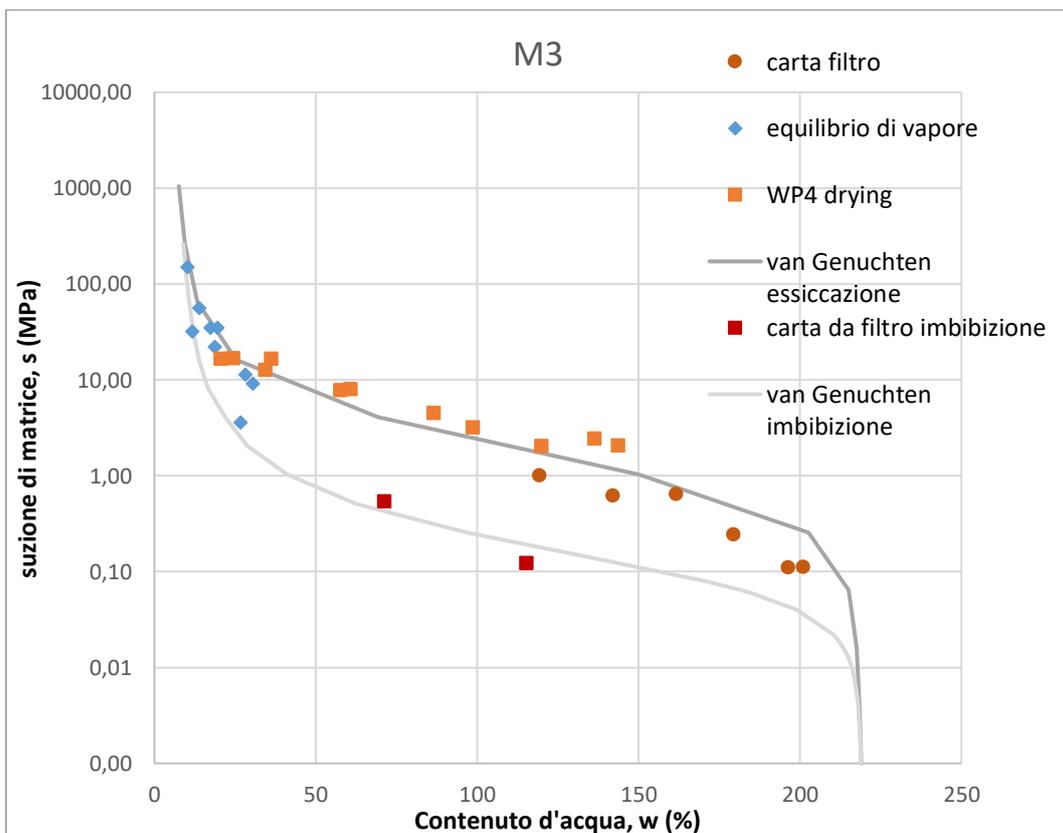


Figura 95: Curva di ritenzione in termini di contenuto d'acqua e suzione di matrice per la miscela M3

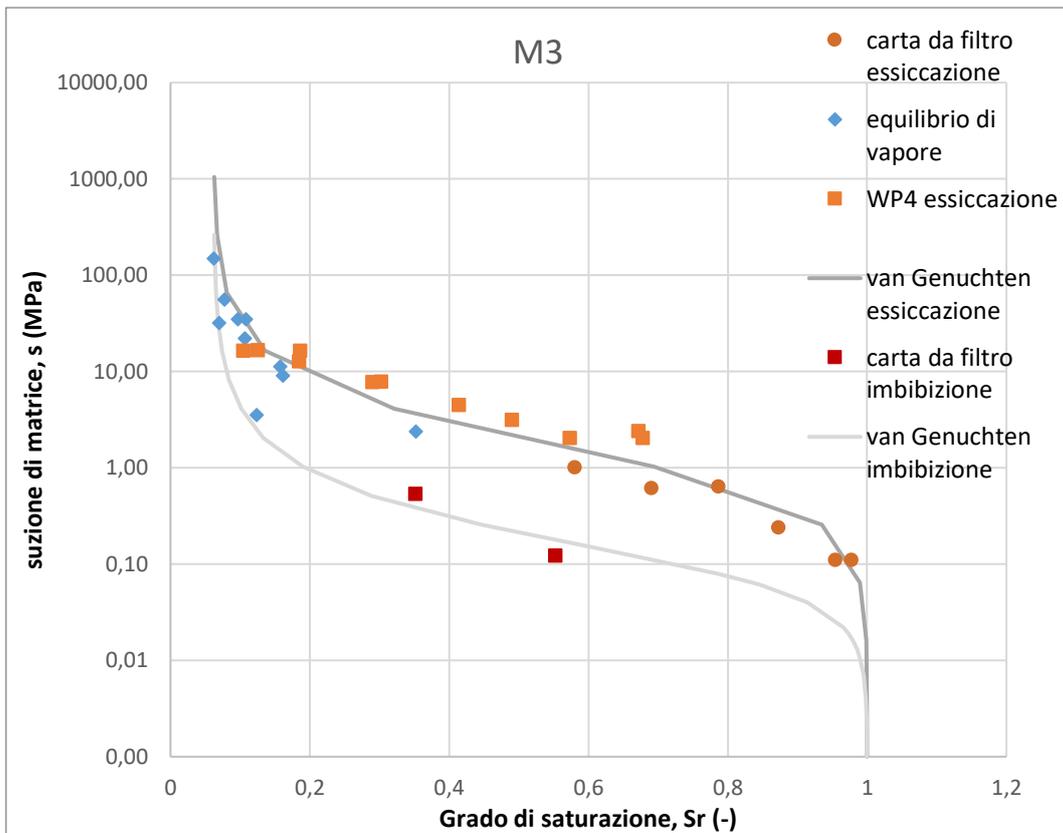


Figura 96: Curva di ritenzione in termini di grado di saturazione e suzione di matrice per la miscela M3

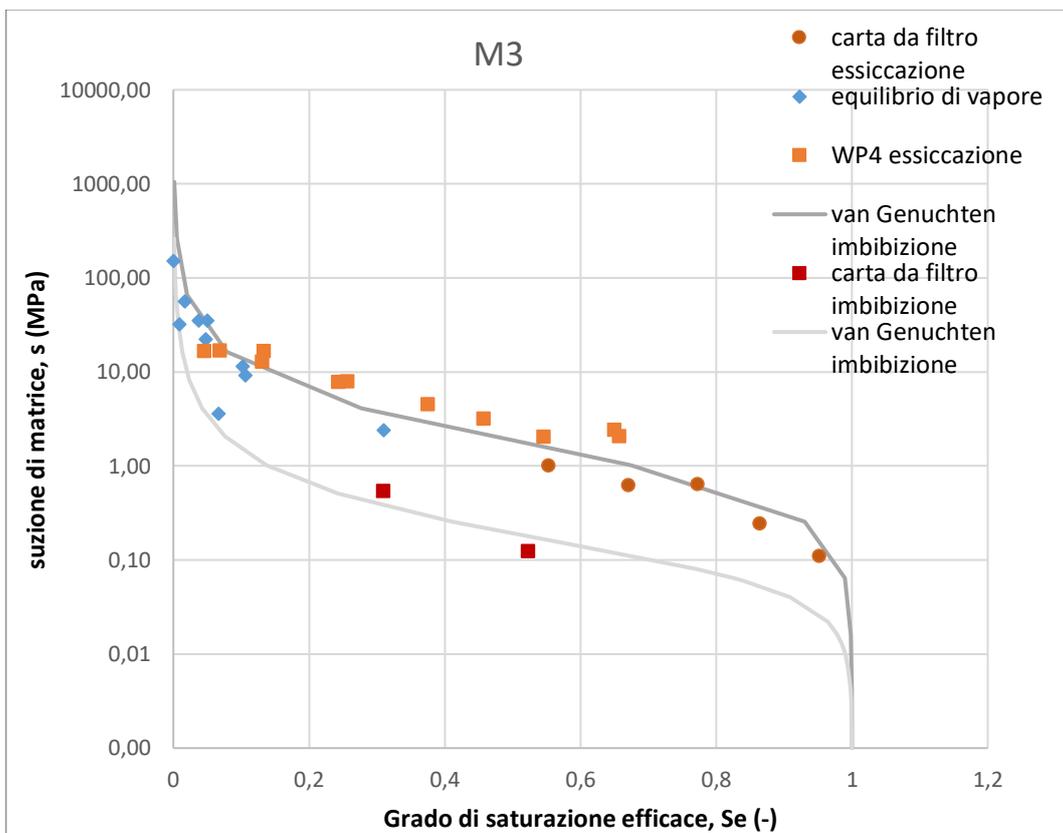


Figura 97: Curva di ritenzione in termini di grado di saturazione efficace e suzione di matrice per la miscela M3



## 8. Conclusioni

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

Si è analizzata la relazione tra suzione di matrice e totale, con il grado di saturazione e il contenuto d'acqua di provini realizzati con tre diverse miscele cemento bentonite. Le tre miscele differiscono per contenuto di cemento, in particolare la miscela M1 ha un rapporto cemento bentonite di 4 a 1, la miscela M2 ha un rapporto cemento bentonite di 5 a 1 ed infine la miscela M3 un rapporto di 6 a 1. Dagli studi effettuati è emerso che la quantità di cemento diminuisce i pori all'interno del materiale per cui si verifica un aumento della massa specifica relativa  $G_s$  e una forte diminuzione dell'indice dei vuoti passando dalla miscela M1 alla miscela M3.

Al fine di ottenere le curve di ritenzione con una serie di dati distribuiti in maniera omogenea si sono utilizzate diverse tecniche e strumenti di laboratorio in modo da sopperire ai limiti fisici delle diverse metodologie. È stato possibile osservare come il connubio delle diverse tecniche sperimentali caratterizzi la curva di ritenzione che viene interpretata con l'equazione di Van Genuchten. In particolare, l'edometro a suzione controllata, che utilizza la tecnica della traslazione degli assi per bassi valori di suzione, tende a sovrastimare i parametri della curva di Van Genuchten  $n$  e  $m$ .

La relazione che lega il contenuto d'acqua con l'indice dei vuoti e la massa relativa specifica è uguale al grado di saturazione. Quest'ultimo è stato elaborato al fine di ottenere il grado di saturazione efficace o irriducibile, ovvero è stato ottenuto un asintoto verticale della curva di ritenzione, cioè quel valore dipendente dalla presenza di acqua adsorbita sotto forma di film pellicolare che riveste i grani della miscela.

Infine, i valori ottenuti con diverse tecniche allo stesso grado di saturazione mostrano, come prevedibile, un sostanziale accordo.

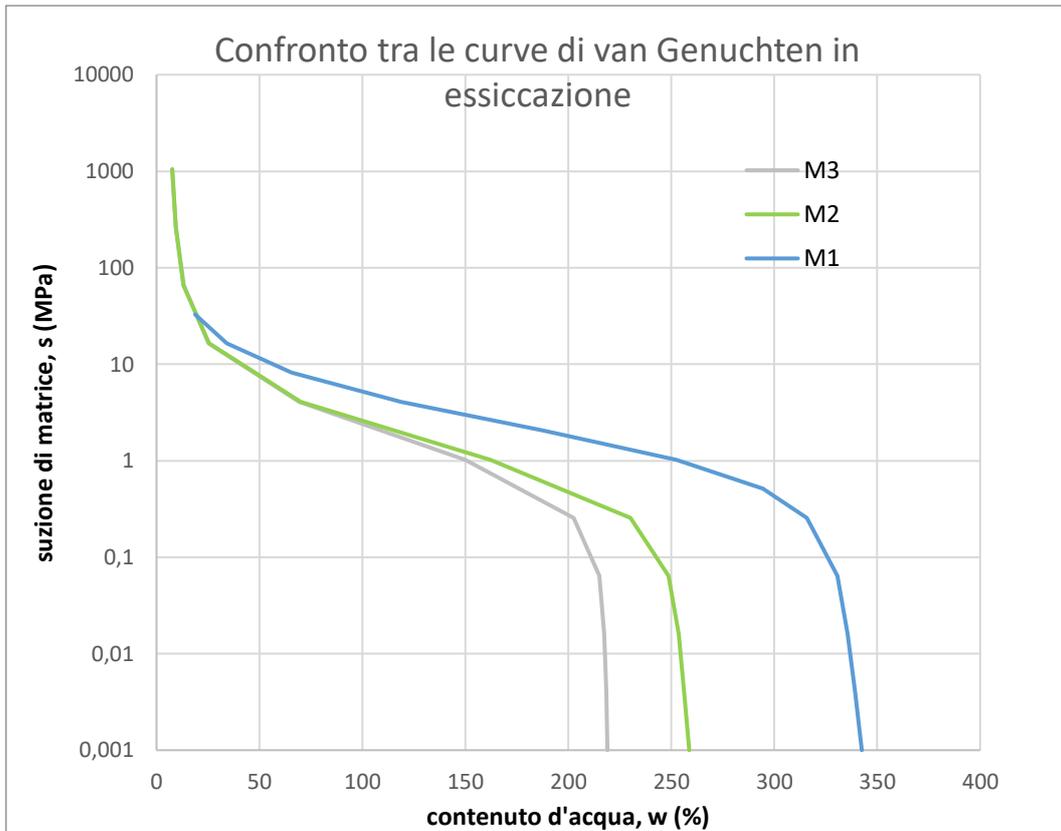


Figura 98: Confronto tra le curve di van Genuchten in essiccazione in termini di contenuto d'acqua e suzione di matrice

Analizzando il confronto tra le curve ottenute in fase di essiccazione si può asserire che le miscele presentano un contenuto d'acqua iniziale differente, dovuto alla proporzione delle componenti in termini di massa. Un altro valore interessante dal punto di vista sperimentale è il valore iniziale di suzione a cui le varie miscele iniziano a desaturarsi.

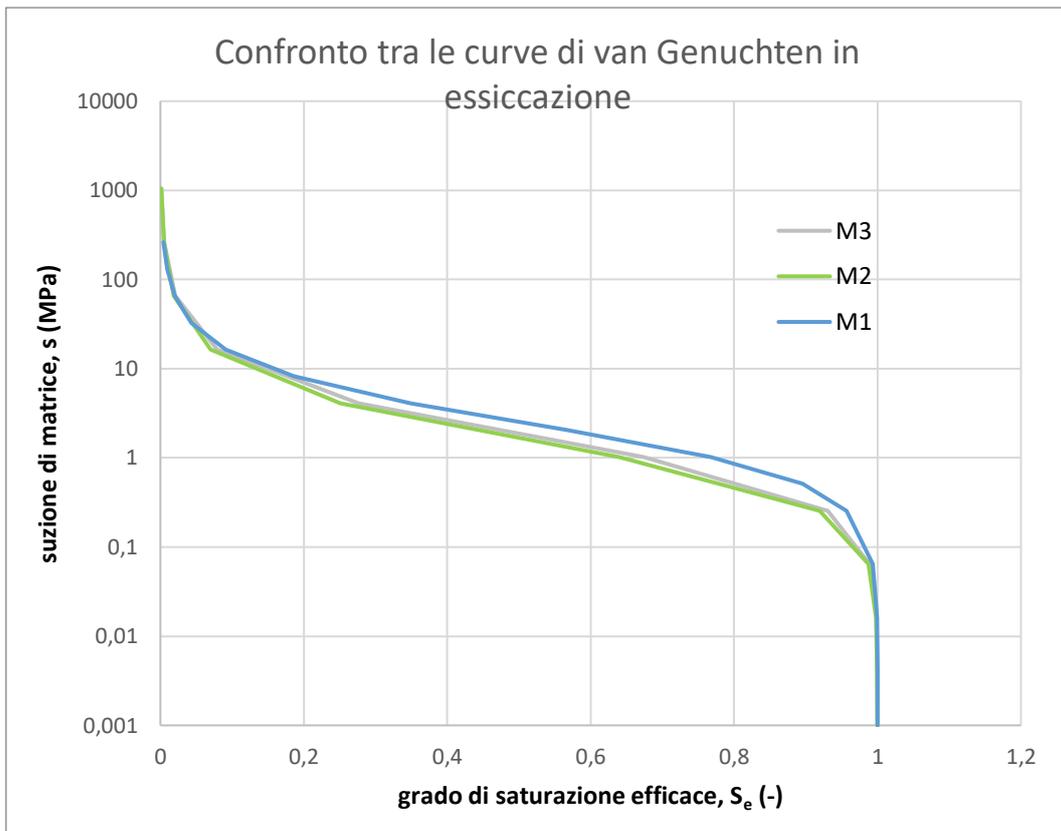


Figura 99: Confronto tra le curve di van Genuchten in essiccazione in termini di grado di saturazione e suzione di matrice



*Desidero ringraziare tutte le persone che mi hanno sostenuto durante questo studio.*

*In particolare, i professori Guido Musso e Renato Cosentini per avermi dato la possibilità di intraprendere questo percorso accompagnandomi con esperienza e disponibilità, Paolo Trischitta per essere stato il mio punto di riferimento in laboratorio.*

*I ringraziamenti più sentiti e preziosi vanno alla mia famiglia per aver reso possibile tutto questo.*

*Ringrazio i miei amici del Politecnico con cui ho condiviso avventure e momenti bellissimi durante questi anni: Alberto, Davide, Enrico, Federico, Giacomo, Matteo, Mattia, Stefano. Le persone che hanno creduto in me: Alessia, Elisa.*

*Un ringraziamento particolare al mio amico Daniele, compagno di studi, per il supporto e la pazienza.*



## Bibliografia

- Alfieri M. (2007), *Determinazione delle curve di ritenzione mediante edometro a suzione controllata*, Tesi di laurea, Politecnico di Torino, Relatori prof. Manassero M. prof. Dominijanni A.
- Bear J., Cheng A. H.-D. (2010), *Modeling groundwater flow and contaminant transport*, New York, Springer, p. 834
- Bulut R., Leong E.C. (2008), *Indirect measurement of suction*, Geotechnical and Geological Engineering, Volume 26, No. 6, p. 633-644
- Bulut R., Wray W.K. (2005), *Free energy of water suction in filter papers*, Geotechnical Testing Journal, Volume 28, No. 4, p. 264-355
- Evans J.C., Opdyke S.M. (2005), *Slag cement bentonite slurry walls*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Volume 131, No 6, p. 6-673-681
- Grisolia M., Napoleoni Q., D'Aprile L. (2000), *Laboratory Permeability tests on a large specimen of cement bentonite*, ISRM International Symposium, Melbourne, Australia
- Joshi K., Kechavarzi C., Sutherland K., Ng M.Y., Soga K., Tedd P. (2010), *Laboratory and in situ tests for long term hydraulic conductivity of a cementbentonite cutoff wall*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, Volume 136, No. 4, p. 562-572
- Lancellotta R. (2012), *Geotecnica*, Milano, Zanichelli, p. 530
- Leong E.C., He L., Rahardjo H. (2002), *Factors affecting the filter paper method for total and matric suction measurements*, Geotechnical Testing Journal, Volume 25, No. 3, p. 321-332
- Marinho F.A.M., Oliveira O.M. (2006), *The filter paper method revisited*, Geotechnical Testing Journal, Volume 29, No. 3, p. 250-258
- Patrick P.K., Olsen H.W., Higgins J.D. (2007), *Comparison of chilled mirror measurements and filter paper estimates of total soil suction*, Geotechnical Testing Journal, Volume 30, No. 5, p. 360-367
- Qadr C.S. (2013), *Effect of Drying and Rewetting on Stress-Strain Behaviour, Strength and Desiccation Developments of Slag-Cement-Bentonite Samples*, thesis for a master of science degree in Geotechnical Engineering, University of Birmingham, supervised by dr. Royal A.
- Romero E. (2001), *Controlled Suction Technique*, 4° Simposio Brasileiro de Solos Nao Saturados, Gehling & Schnaid (eds), Porto Alegre, Brasil, p. 535-542
- Tarantino A., Romero E., Cui J. Y. (2008), *Laboratory and field testing of unsaturated soils*, New York, Springer, p. 214
- Tarzia S. (2019), *Comportamento idraulico delle miscele cemento bentonite*, Tesi di laurea magistrale, Politecnico di Torino, Relatore prof. Musso G.

