

HUB PORTUALE ravenna



Autorità di Sistema Portuale
del Mare Adriatico centro settentrionale



APPROFONDIMENTO CANALI CANDIANO E BAIONA,
ADEGUAMENTO BANCHINE OPERATIVE ESISTENTI,
NUOVO TERMINAL IN PENISOLA TRATTAROLI E
RIUTILIZZO MATERIALE ESTRATTO IN ATTUAZIONE
AL P.R.P VIGENTE 2007 - I FASE - PORTO DI RAVENNA

PROGETTO ESECUTIVO

oggetto STUDI PER LA CONOSCENZA DEL CONTESTO
RILIEVI E INDAGINI - RELAZIONE INDAGINI PRELIMINARI
TEST DI SEDIMENTAZIONE E TEST DI LABORATORIO DEI SEDIMENTI DI DRAGAGGIO

file
1114-E-SIN-RIL-RE-41-0.doc

codice
1114-E-SIN-RIL-RE-41-0

scala
-

Revisione	data	causale	redatto	verificato	approvato
0	18/03/2021	Emissione per approvazione	Univ. Roma	P. Pampanin	L. de Angelis

responsabile delle Integrazioni Specialistiche: **Ing. Lucia de Angelis**

responsabile del Procedimento: **Ing. Matteo Graziani**

committente

contraente generale



Autorità di Sistema Portuale
del Mare Adriatico centro settentrionale

Autorità di Sistema Portuale del Mare Adriatico Centro Settentrionale
Via Antico Squero, 31
48122 Ravenna



**Consorzio Stabile
Grandi Lavori S.c.r.l.**

Consorzio Stabile Grandi Lavori Scrl
Piazza del Popolo 18
00187 Roma



**Dredging
International**

DEME - Dredging International NV
Haven 1025 - Schiededijk 30
2070 Zwijndrecht - Belgium

progettisti



Technital S.p.A.
Via Carlo Cattaneo, 20
37121 Verona

Direttore Tecnico
Dott. Ing. Filippo Busola



F&M Ingegneria SpA
Via Belvedere 8/10
30035 Mirano (VE)

Direttore Tecnico
Dott. Ing. Tommaso Tassi



SISPI srl
Via Filangieri 11
80121 Napoli

Direttore Tecnico
Dott. Ing. Marco Di Stefano



GEEG
GEOTECHNICAL & ENVIRONMENTAL
ENGINEERING GROUP

Startup di



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Attività sperimentali per il progetto delle opere di
approfondimento dei fondali del Porto di Ravenna

Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte

Marzo 2021

INDICE

1	Generalità	1
2	Introduzione	1
3	Caratterizzazione geotecnica	2
3.1	Descrizione delle metodologie di analisi	2
3.1.1	Contenuto d'acqua	2
3.1.2	Peso di volume.....	3
3.1.3	Distribuzione granulometrica	3
3.1.4	Limiti di Atterberg.....	3
3.2	Risultati campioni disturbati	4
3.3	Risultati campioni indisturbati	5
4	Test di sedimentazione in colonna	10
4.1	Descrizione dell'apparecchiatura di prova e della strumentazione a supporto	10
4.1.1	Preparazione dei campioni	11
4.1.2	Modalità di prova.....	12
4.1.3	Torbidità	12
4.1.4	Solidi sospesi totali (TSS).....	12
4.2	Risultati	13
4.2.1	Prove di sedimentazione in colonna	13
4.2.2	Torbidità e solidi sospesi totali	14
5	Ulteriori prove geotecniche effettuate sui campioni disturbati	16
5.1	Descrizione delle metodologie di analisi	16
5.1.1	Vane test.....	17
5.1.2	Fall-cone test	17
5.2	Risultati	17
6	Test geotecnici effettuati sui campioni indisturbati	24
6.1	Risultati	24
6.1.1	Vane test.....	24
6.1.2	Prove edometriche	28
6.1.3	TOC	32

1 Generalità

Nell'ambito del Progetto di Approfondimento del porto di Ravenna sono previsti lavori di dragaggio idraulico e sversamento a terra di terreni a grana fine (argille e limi). Il dragaggio in sedimenti a grana fine può causare rilevanti variazioni volumetriche dei sedimenti dragati e con conseguenti processi di consolidazione molto lenti.

Al fine di supportare lo sviluppo del progetto, GEEG è stata coinvolta per lo sviluppo di un programma sperimentale inclusivo di specifiche “prove di sedimentazione” da eseguirsi sui materiali oggetto di dragaggio ed eseguire le attività sperimentali su tali sedimenti.

Il presente documento tecnico contiene i risultati e le valutazioni delle analisi svolte in supporto alla definizione delle modalità di dragaggio idraulico e di successiva gestione dei sedimenti nell’ambito del Progetto di approfondimento dei fondali del Porto di Ravenna.

Sono descritti pertanto nei paragrafi successivi la metodologia ed i risultati delle prove di caratterizzazione e delle prove di sedimentazione e consolidazione svolte.

Il presente documento espone i risultati ottenuti con l’attività sperimentale, suddivisi in una prima parte dedicata alle prove di caratterizzazione geotecnica dei campioni di terreno prelevati in sito, in una seconda parte riservata ai test di sedimentazione e consolidazione in colonna e in una terza riguardante le ulteriori prove geotecniche eseguite.

2 Introduzione

In Figura 1 viene rappresentata la posizione dei punti di prelievo dei campioni di terreno su cui sono state effettuate le prove. In particolare, i campioni R9 ed R10 provengono dalla zona 1, i campioni R7 ed R8 dalla zona 2, i campioni R5 ed R6 dalla zona 3, R4 dalla zona 4 ed infine i campioni R1, R2 ed R3 dalla zona 5 del porto di Ravenna.



Figura 1: Ubicazione dei punti di prelievo dei campioni.

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

I campioni da R1 a R8 sono stati prelevati in modalità disturbata ed indisturbata, mentre i campioni R9 ed R10 solamente in modalità disturbata. Sono di seguito riportate in Tabella 1 e Tabella 2 le quantità espresse in termini di peso di ciascun campione.

Tabella 1: Pesì dei campioni disturbati.

R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
57.48	66.73	46.46	58.71	54.265	64.89	59.99	57.72	55.94	75.94

Tabella 2: Pesì dei campioni indisturbati complessivi del peso della fustella.

R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)
11.95	11.19	9.10	10.23	17.09	17.84	13.22	18.86

3 Caratterizzazione geotecnica

Nei seguenti paragrafi sono espòste le specifiche tecniche delle prove geotecniche eseguite sui campioni di terreno disturbati e i corrispettivi risultati.

3.1 Descrizione delle metodologie di analisi

Le attività sperimentali preliminari geotecniche sono state condòtte con lo scopo di determinare per ciascun campione le seguenti caratteristiche fisiche e meccaniche:

- contenuto d'acqua;
- peso di volume;
- distribuzione granulometrica;
- limiti di Atterberg (limite liquido e limite plastico).

3.1.1 Contenuto d'acqua

La determinazione del contenuto d'acqua è avvenuta secondo le norme ASTM D 2216-66, le quali prevedono che il campione di terreno venga sistemato in un contenitore di vetro di peso noto W_c e pesato: tale peso W_1 consiste dunque nel peso del contenitore e del terreno umido. Successivamente il campione viene fatto essiccare in forno a 105 °C e, una volta asciutto, viene fatto raffreddare e viene pesato insieme al contenitore, ottenendo il peso W_2 . Il contenuto d'acqua si ottiene dalla seguente relazione (1):

$$w = \frac{W_1 - W_2}{W_2 - W_c} \cdot 100 \quad (1)$$

3.1.2 Peso di volume

Il peso dell'unità di volume della parte solida γ_s è dato dalla relazione (2):

$$\gamma_s = \frac{W_s}{V_s} \quad (2)$$

in cui W_s e V_s rappresentano rispettivamente il peso ed il volume della fase solida del terreno.

La misura di tale parametro avviene mediante l'utilizzo di un picnometro ad elio.

3.1.3 Distribuzione granulometrica

Attraverso l'analisi granulometrica è possibile stabilire le percentuali in peso delle varie frazioni dimensionali delle particelle che compongono il campione. Le frazioni granulometriche si ottengono mediante l'uso di setacci standard che trattengono la parte grossolana del terreno (particelle con dimensioni > 0.074 mm) e con l'analisi per sedimentazione con areometro.

La procedura per setacciatura consiste nell'essiccamento in forno di un campione di 500 g che successivamente viene sottoposto ad una serie di vagli; i sopra-vagli vengono pesati indipendentemente e tali valori, riportati in percentuale rispetto alla totalità del campione, sono diagrammati in funzione alle dimensioni delle aperture dei vagli corrispondenti.

L'analisi per sedimentazione con areometro viene condotta su un campione che contiene per almeno il 10% particelle con diametro inferiore a 0.074 mm. La misura avviene all'interno di una vasca di sedimentazione a temperatura controllata e permette di determinare la distribuzione granulometrica sulla base della legge di Stokes attraverso l'utilizzo di un areometro, strumento in grado di misurare la variazione di densità all'interno della sospensione contenente il campione.

3.1.4 Limiti di Atterberg

I limiti di Atterberg di un terreno a grana fine indicano i valori del suo contenuto d'acqua che individuano un passaggio di stato fisico. Il passaggio dallo stato solido allo stato semisolido è individuato dal limite di ritiro w_s , la variazione dallo stato semisolido allo stato plastico è indicato dal limite plastico w_p ed infine il cambiamento dallo stato plastico allo stato liquido è determinato dal limite liquido w_L . Durante le attività sperimentali preliminari geotecniche sono stati determinati il limite plastico ed il limite liquido.

Il limite plastico viene determinato formando manualmente dei bastoncini che al raggiungimento di 3.2 mm di spessore iniziano a fessurarsi e a perdere quindi il comportamento plastico; il valore è individuato dalla media di 3 determinazioni.

Il limite liquido si ottiene mediante l'utilizzo del cucchiaio di Casagrande ed indica il contenuto d'acqua in corrispondenza del quale il terreno possiede una resistenza al taglio così piccola che un solco, praticato in un campione rimaneggiato, si richiude quando il cucchiaio che lo contiene è sollecitato con dei colpi, secondo una procedura standardizzata.

Noti, dunque, il limite plastico ed il limite liquido di un materiale è possibile calcolare degli indici rappresentativi della consistenza del materiale, tra cui l'indice di plasticità IP definito dall'espressione (3):

$$IP = w_L - w_P \quad (3)$$

e l'indice di liquidità I_L , espresso dalla relazione (4):

$$I_L = \frac{w - w_P}{IP} \quad (4)$$

in cui w rappresenta il contenuto d'acqua naturale del campione.

3.2 Risultati campioni disturbati

Sono di seguito riportati i risultati ottenuti dalla caratterizzazione geotecnica sui campioni di terreno disturbati; in particolare in Tabella 3 e Tabella 4 sono riportati rispettivamente i valori del contenuto d'acqua e dei limiti di Atterberg, in Tabella 5 sono esposti i valori del peso di volume della parte solida, mentre in Figura 2 sono rappresentate le curve granulometriche di tutti i campioni.

Tabella 3: Valori del contenuto d'acqua dei campioni disturbati.

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
w (%)	45.07	50.59	56.10	81.93	79.38	60.61	76.00	49.20	51.41	50.08

Tabella 4: Valori dei limiti di Atterberg (limite liquido, limite plastico ed indice di plasticità) dei campioni disturbati.

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
w_L (%)	25.04	24.81	28.07	41.80	43.62	33.87	44.35	27.50	34.50	40.78
w_p (%)	-	19.93	21.41	26.20	28.62	23.14	26.44	20.40	23.59	24.22
IP (-)	-	4.88	6.66	15.60	15.00	10.73	17.91	7.10	10.91	16.56

Tabella 5: Valori del peso di volume della parte solida dei campioni.

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
γ_s (kN/m ³)	27.08	27.04	26.93	26.72	26.68	26.99	26.89	26.95	26.94	26.84

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

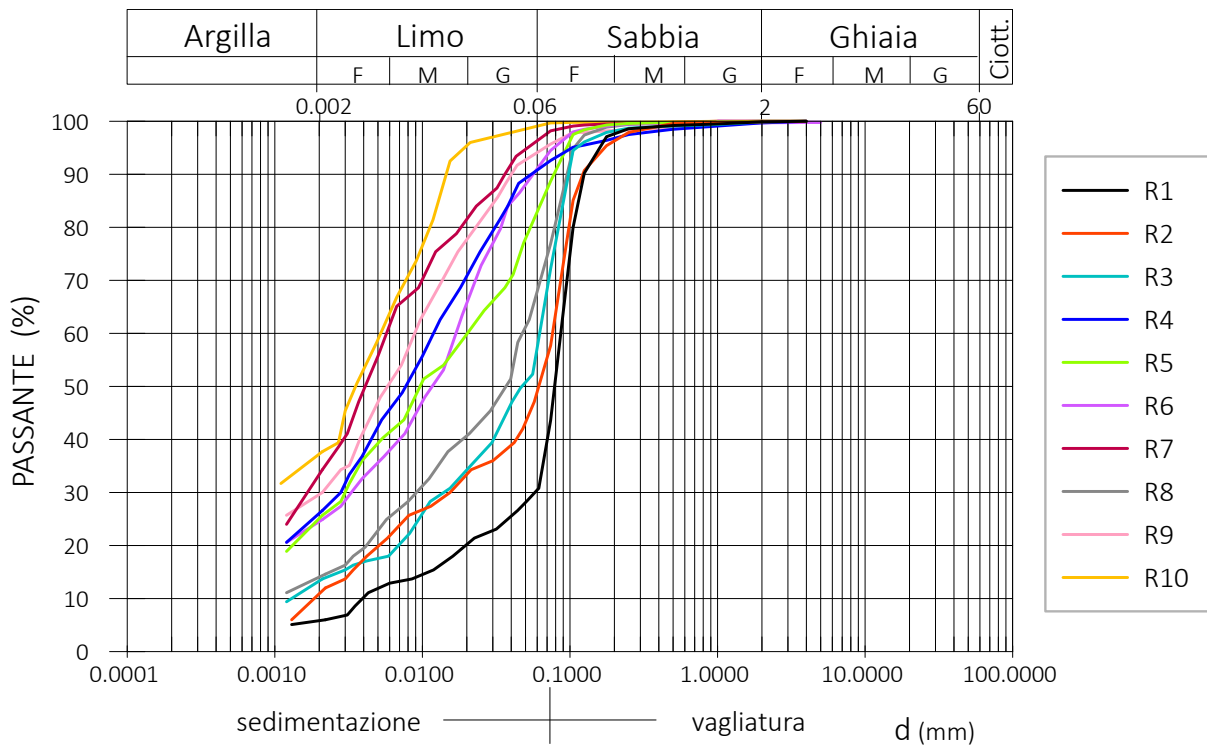


Figura 2: Curve granulometriche dei campioni disturbati.

3.3 Risultati campioni indisturbati

Sono di seguito riportati i risultati ottenuti dalla caratterizzazione geotecnica sui campioni di terreno indisturbati; in particolare nelle tabelle da Tabella 6 a Tabella 13 sono riportati i valori del contenuto d'acqua ottenuti per ogni campione e nelle figure da Figura 3 a Figura 10 i campioni al momento dell'estrusione.

In Tabella 14 sono mostrati i valori dei limiti di Atterberg e in Figura 11 sono rappresentate le curve granulometriche di tutti i campioni.



Figura 3: Campione indisturbato R1 al momento dell'estrusione.

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

Tabella 6: Valori dei contenuti d'acqua del campione indisturbato R1.

	W_{top} (%)	W_{center} (%)	W_{bottom} (%)
	40.22	44.20	47.37
	38.46	47.43	44.47
	39.14	41.05	47.39
<i>media</i>	39.27	44.23	46.41



Figura 4: Campione indisturbato R2 al momento dell'estrusione.

Tabella 7: Valori dei contenuti d'acqua del campione indisturbato R2.

	W_{top} (%)	W_{center} (%)	W_{bottom} (%)
	52.76	48.19	50.86
	44.94	50.36	61.54
	48.21	51.76	55.67
<i>media</i>	48.64	50.10	56.02

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.



Figura 5: Campione indisturbato R3 al momento dell'estrusione.

Tabella 8: Valori dei contenuti d'acqua del campione indisturbato R3.

	W_{top} (%)	W_{center} (%)	W_{bottom} (%)
	74.28	79.48	32.12
	76.67	74.68	33.84
	69.74	93.79	32.85
<i>media</i>	73.56	82.65	32.94

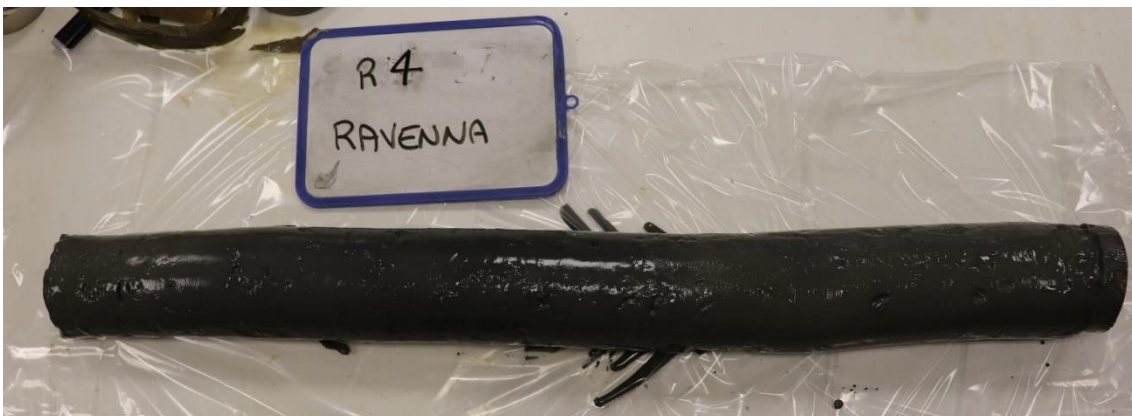


Figura 6: Campione indisturbato R4 al momento dell'estrusione.

Tabella 9: Valori dei contenuti d'acqua del campione indisturbato R4.

	W_{top} (%)	W_{center} (%)	W_{bottom} (%)
	63.24	98.94	50.58
	81.62	98.53	50.15
	89.07	79.04	79.09
<i>media</i>	77.98	92.17	59.94

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.



Figura 7: Campione indisturbato R5 al momento dell'estrusione.

Tabella 10: Valori dei contenuti d'acqua del campione indisturbato R5.

	W_{top} (%)	W_{center} (%)	W_{bottom} (%)
	77.71	76.05	37.08
	79.24	77.73	34.51
	86.26	85.04	37.29
<i>media</i>	81.07	79.61	36.29



Figura 8: Campione indisturbato R6 al momento dell'estrusione.

Tabella 11: Valori dei contenuti d'acqua del campione indisturbato R6.

	W_{top} (%)	W_{center} (%)	W_{bottom} (%)
	79.54	43.07	39.99
	71.58	43.21	40.10
<i>media</i>	75.56	43.14	40.04

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.



Figura 9: Campione indisturbato R7 al momento dell'estrusione.

Tabella 12: Valori dei contenuti d'acqua del campione indisturbato R7.

	W_{top} (%)	W_{center} (%)	W_{bottom} (%)
	75.00	38.68	64.58
	62.94	36.56	62.78
<i>media</i>	68.97	37.62	63.68



Figura 10: Campione indisturbato R8 al momento dell'estrusione.

Tabella 13: Valori dei contenuti d'acqua del campione indisturbato R8.

	W_{top} (%)	W_{center} (%)	W_{bottom} (%)
	35.46	51.26	46.24
	35.58	50.87	51.75
	39.49	43.63	26.96
<i>media</i>	36.84	48.59	41.65

Tabella 14: Valori dei limiti di Atterberg (limite liquido, limite plastico) dei campioni indisturbati.

		R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8
w_L	(%)	-	27.60	15.00	47.10	50.80	32.64	48.15	30.05
w_p	(%)	-	18.34	-	27.78	28.75	19.21	24.22	19.90

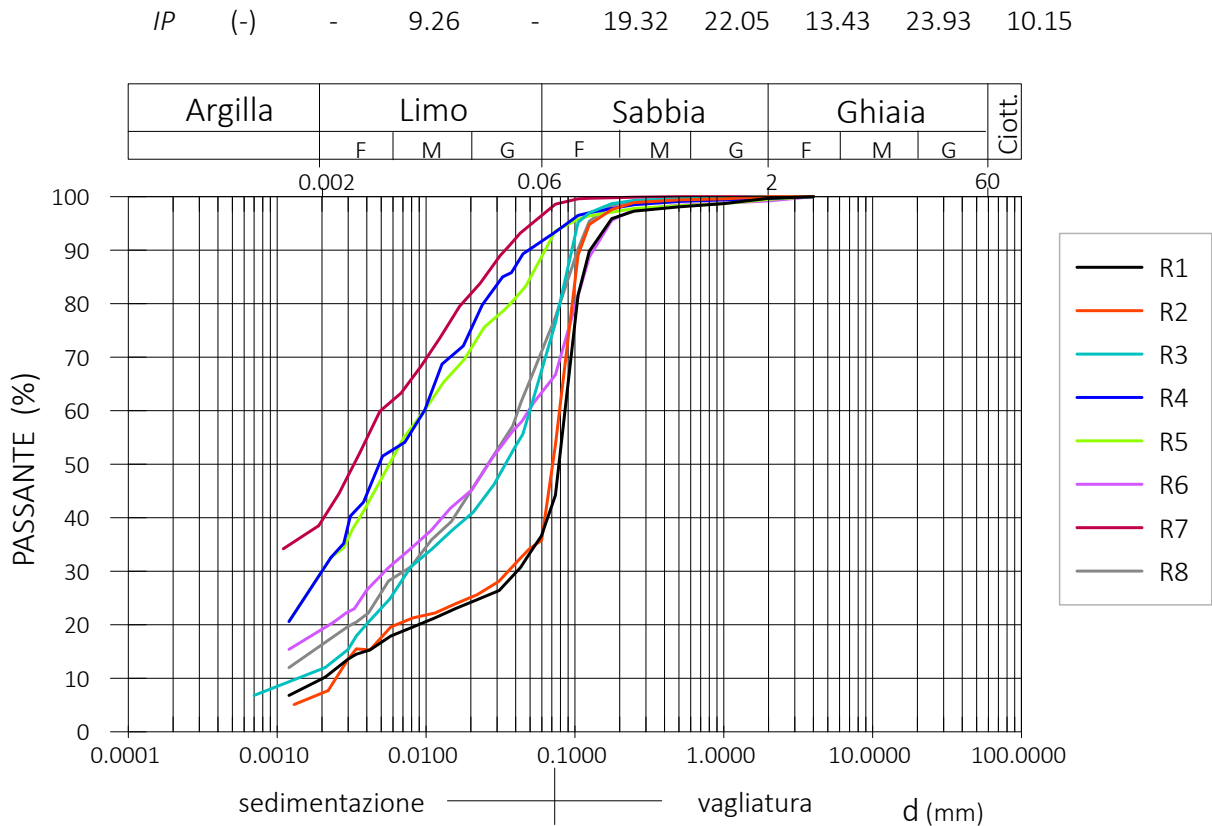


Figura 11: Curve granulometriche dei campioni indisturbati.

4 Test di sedimentazione in colonna

Nei seguenti paragrafi sono espone le specifiche tecniche delle prove di sedimentazione in colonna eseguite sui primi 6 campioni di terreno disturbati trattati (R3, R4, R5, R6, R7, R10) ed i corrispettivi risultati.

4.1 Descrizione dell'apparecchiatura di prova e della strumentazione a supporto

Il programma sperimentale ha previsto la realizzazione di 6 apparecchiature di prova, ciascuna composta da:

- tubo trasparente di lunghezza l pari a 204.5 cm, diametro interno d_i pari a 21 cm e diametro esterno d_e pari a 22 cm (Figura 12 e Figura 13);
- basamento di lunghezza e larghezza pari a 15 cm ed altezza pari a 2 cm, con rubinetto posizionato a 2 cm dal basamento;
- metro a nastro;
- fotocamera;
- struttura di supporto.

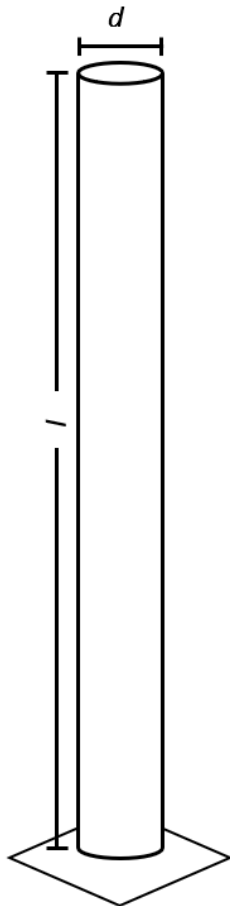


Figura 12: Dimensioni della colonna.

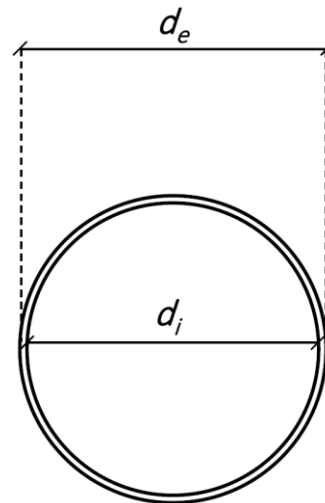


Figura 13: Dimensioni in pianta della colonna.

4.1.1 Preparazione dei campioni

Il terreno in situ è stato miscelato con acqua salata di densità pari a 1.025 g/cm^3 tramite un sistema di miscelazione per un tempo variabile da 1 a 3 ore, al fine di garantire l'idratazione dei minerali argillosi, fino al raggiungimento della densità prefissata di 1.250 g/cm^3 garantito da 3 misure indipendenti.

Le colonne sono collocate in una stanza buia a temperatura costante ($14 \text{ }^\circ\text{C}$). Il livello dell'acqua nella parte superiore della colonna viene mantenuto costante per evitare l'essiccazione del materiale; in caso di evaporazione, la quantità d'acqua evaporata viene accuratamente compensata per garantire un'altezza costante della colonna.

Il riempimento della colonna con la miscela avviene immediatamente dopo la preparazione della stessa.

4.1.2 Modalità di prova

All'inizio della prova viene misurata l'altezza del riempimento della colonna. I parametri misurati durante la sperimentazione sono:

- livello dell'interfaccia acqua-fango;
- torbidità;
- solidi sospesi totali (TSS).

Per quanto riguarda l'altezza dell'interfaccia acqua-fango, durante la prime 12 ore la consolidazione avviene velocemente dunque la misura viene effettuata ogni 10 minuti, anche con il supporto di telecamere; nelle successive 12 ore la frequenza di misura è una ogni ora e dopo 24 ore dall'inizio della prova la frequenza viene ridotta ulteriormente a 3 misure al giorno.

Le misure di torbidità e dei solidi sospesi totali sono effettuate in serie sugli stessi campioni di volume pari a 150 ml, in modo tale da poter ottenere una correlazione. I campioni sono stati ottenuti da un primo prelievo all'interno delle colonne ad una profondità pari a circa metà dell'altezza tra la superficie di interfaccia acqua-fango ed il pelo libero e da successive diluizioni di questo. Le modalità di esecuzione di queste due prove sono descritte nei successivi paragrafi.

4.1.3 Torbidità

La torbidità viene definita come la riduzione della trasparenza o la mancanza di limpidezza di un campione liquido in cui sono presenti delle sostanze in sospensione. Il metodo di determinazione della torbidità si basa su un principio ottico per cui un fascio di luce che attraversa una soluzione può subire una variazione della sua intensità in quanto la fase solida, più o meno finemente dispersa, contribuisce al suo assorbimento e/o diffusione. Il prevalere di un effetto sull'altro dipende dalle dimensioni delle particelle disperse: la diffusione è incentivata dalla presenza di particelle fini viceversa in caso di dispersioni non fini è predominante il fenomeno dell'assorbimento.

La torbidità può essere determinata valutando l'effetto dell'assorbimento prodotto dalla fase dispersa sul fascio incidente tramite l'uso di uno spettrofotometro (metodo turbidimetrico) oppure rilevando l'effetto della diffusione con un nefelometro (metodo nefelometrico).

Nel presente lavoro le misure di torbidità delle sospensioni acquose sono state eseguite utilizzando un turbidimetro da banco il cui principio di funzionamento si basa sul metodo nefelometrico secondo la normativa UNI EN ISO 7072-1:2016.

4.1.4 Solidi sospesi totali (TSS)

I solidi sospesi totali individuano tutte quelle sostanze non disciolte presenti in un campione d'acqua. La determinazione del TSS di un campione viene eseguita mediante la filtrazione dello stesso su un filtro a membrana con diametro medio dei pori pari a 0.45 μm . Il sistema di filtrazione utilizzato opera sottovuoto. Prima di procedere con la filtrazione, i filtri vengono essiccati in una stufa a convezione naturale ad una temperatura di 103-105 $^{\circ}\text{C}$ per poi essere pesati. Una volta eseguita la filtrazione, i

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

filtri vengono nuovamente posti in stufa e lasciati essiccare fino al raggiungimento di un peso costante.

Il contenuto di solidi sospesi totali espresso in mg/L è dato dalla seguente equazione (5):

$$TSS = \frac{(M_1 - M_0) \cdot 1000}{V} \quad (5)$$

con M_0 ed M_1 corrispondenti rispettivamente al peso in mg del filtro ed al peso in mg del filtro e del residuo dopo essiccamento e V al volume in mL di campione sottoposto a filtrazione.

4.2 Risultati

4.2.1 Prove di sedimentazione in colonna

Sono di seguito riportati i valori medi di densità ottenuti da 3 misure indipendenti durante la preparazione dell'acqua salata Tabella 15 e del fango Tabella 16 per i campioni trattati.

Tabella 15: Valori medi di densità dell'acqua salata e valore target.

R3	R4	R5	R6	R7	R10	Target
(t/m ³)	(t/m ³)	(t/m ³)	(t/m ³)	(t/m ³)	(t/m ³)	(t/m ³)
1.0247	1.0253	1.0247	1.0251	1.0254	1.0252	1.0250

Tabella 16: Valori medi di densità del fango e valore target.

R3	R4	R5	R6	R7	R10	Target
(t/m ³)	(t/m ³)	(t/m ³)	(t/m ³)	(t/m ³)	(t/m ³)	(t/m ³)
1.2480	1.2550	1.2514	1.2499	1.2522	1.2539	1.2500

Nella sottostante Figura 14 sono rappresentati gli andamenti delle altezze dell'interfaccia acqua-fango all'interno delle colonne.

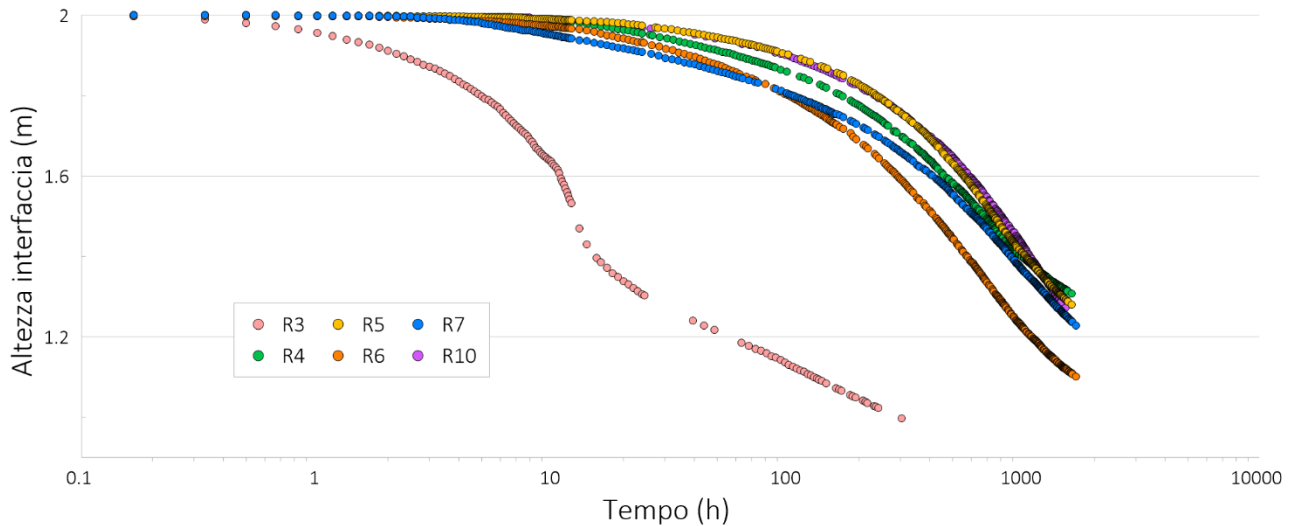


Figura 14: Altezza dell'interfaccia acqua-fango in funzione del tempo dei campioni R3, R4, R5, R6, R7, R10.

4.2.2 Torbidità e solidi sospesi totali

In questa sezione sono riportati i risultati relativi alla torbidità in funzione dei solidi sospesi totali presenti nelle soluzioni acquose recuperate in testa a ciascuna colonna.

Appare evidente la connessione tra questi due parametri in quanto, per soluzioni con alti valori di TSS, ci si aspetta degli effetti sul grado di assorbimento o diffusione del fascio luminoso relativo alla misura di torbidità. È importante determinare sperimentalmente la correlazione che mette in relazione questi due parametri in quanto, la torbidità, non solo è legata al contenuto di solidi di una sospensione acquosa ma anche dalla dimensione di queste e quindi, a parità di TSS possono essere rilevati diversi valori di torbidità se questi solidi sono o meno finemente dispersi, o, ancora, se intercorre tra i solidi una sorta di affinità chimica o elettrostatica che contribuisce alla loro agglomerazione. Per tale motivo, sono stati condotti dei test preliminari mirati alla determinazione della correlazione tra Torbidità e TSS per ciascuna tipologia di terreno utilizzati in questo studio.

In Figura 15 sono riportate le correlazioni ottenute preparando campioni di acqua e sale contenenti un diverso dosaggio di solido. Le soluzioni sono state omogeneizzate e analizzate sia in termini di Torbidità che di TSS. Per il TSS si è fatto riferimento alla procedura descritta precedentemente e in linea con quanto riportato nel Capitolo 2090 Metodi analitici per le acque (IRSA CNR).

Gli andamenti determinati sperimentalmente sono di tipo lineare nel range investigato per cui, per tutte le tipologie di terreno si può assumere che la torbidità e il TSS sono tra loro proporzionali (linee tratteggiate). La retta evidenziata in rosso rappresenta l'andamento medio di tutti i punti determinati sperimentalmente: il coefficiente angolare è stato calcolato come media dei coefficienti angolari ottenuti dalle singole interpolazioni mentre l'area tratteggiata rappresenta la dispersione di

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

tale valore. In generale è possibile ricavare il valore di TSS a partire da una misura di torbidità utilizzando 0.768 come fattore di conversione introducendo una variabilità pari a $\pm 11\%$ per definire un range che tiene conto delle specifiche caratteristiche dei differenti campioni di terreno analizzati.

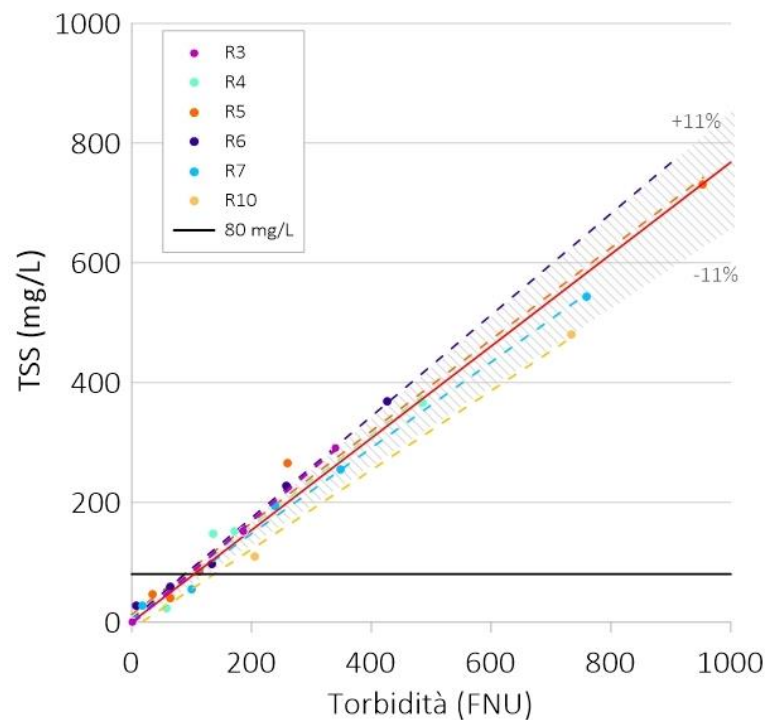


Figura 15: Andamento della torbidità con i solidi sospesi totali.

Prendendo come riferimento il valore limite di TSS pari a 80 mg/L è possibile indicare come valore di torbidità ad esso correlato un valore medio corrispondente a 105 FNU. Poiché questa informazione deve poter essere rappresentativa di tutte le colonne, introducendo la variabilità $\pm 11\%$, al valore di 80 mg/L corrisponde un range di torbidità compresa tra 93 FNU e 117 FNU.

Le considerazioni fatte fin qui sono intendersi non di validità generale poiché va ribadito il concetto che le proprietà ottiche di una sospensione sono influenzate non solo dalla quantità di sostanze sospese ma anche dalla forma, dalla dimensione e dall'indice di rifrazione delle particelle e dall'eventuale presenza di contenuto organico. Pertanto, la linearità è un'evidenza specifica di questo lavoro e quanto riportato in Figura 6 va valutato e verificato su ogni campione sottoposto ad indagine.

A questo punto, trovata la correlazione tra Torbidità e TSS, e selezionato come valore di Torbidità limite pari a 94 FNU come valore cautelativo per tutte le colonne, è possibile limitarsi alla misura di Torbidità per studiare l'evoluzione dei test di sedimentazione.

In Figura 16 sono riportati gli andamenti della torbidità nel tempo per ciascuna colonna. Si può osservare che, per tempi inferiori a 4 giorni, solo la colonna R3 colonna raggiunge una torbidità inferiore a 93 FNU e quindi un valore di TSS inferiore al limite di 80 mg/L. Tutte le altre colonne

raggiungono i valori ottimali di torbidità nei primi 10 giorni tranne la colonna R7 che li raggiunge solamente dopo 15 giorni dall'inizio della sedimentazione.

Come verifica della bontà della metodologia di indagine adottata, si è proceduto a fare delle misure di TSS sulle sospensioni acquose in testa alle colonne dopo circa 10 giorni dall'avvio dei test. Per ovviare al problema della riduzione drastica dei volumi di testa e di alterazione delle condizioni fluidodinamiche di ciascuna colonna, la valutazione del TSS non è stata condotta su volumi di liquidi pari a 1L, come richiesto dalla procedura IRSA CNR, bensì su volumi più bassi e pari a 150 mL.

Da queste analisi sono stati ottenuti dei valori di Torbidità e TSS in linea con quanto riportato in Figura 16, e, sebbene la riduzione del volume di analisi sicuramente incida sul valore numerico ottenuto soprattutto per bassi valori di TSS, questa deviazione comunque consente di ottenere dei valori numerici che rientrano nella regione di variabilità definita in questo studio.

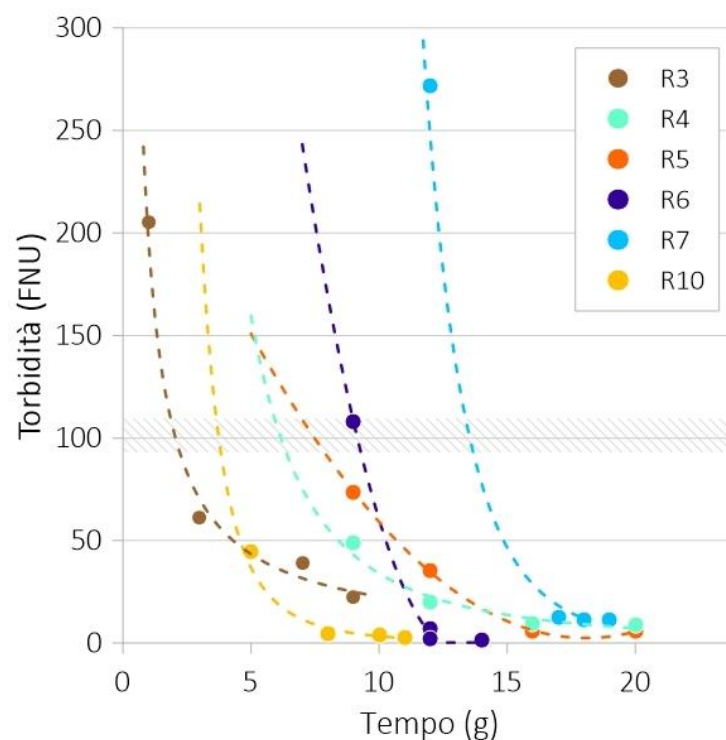


Figura 16: Andamento della torbidità in funzione del tempo.

5 Ulteriori prove geotecniche effettuate sui campioni disturbati

Nei seguenti paragrafi sono descritti le specifiche tecniche ed i risultati ottenuti dai test geotecniche effettuati sui campioni disturbati.

5.1 Descrizione delle metodologie di analisi

Le prove geotecniche effettuate sui campioni disturbati sono:

- vane test;
- fall-cone test;
- misura del contenuto d'acqua.

Le due prove sono state eseguite in parallelo sugli stessi campioni in modo tale da poter individuare una diretta correlazione.

Nel paragrafo successivo viene descritta la modalità di esecuzione del vane test e fall-cone test.

5.1.1 Vane test

Il vane test viene comunemente effettuato sia in sito che in laboratorio al fine di misurare la resistenza non drenata c_u . La prova consiste nella misura della resistenza alla rotazione di uno scissometro inserito nel terreno; tale strumento, di caratteristiche standard, è costituito da 4 palette distribuite perpendicolarmente tra loro. Tramite la legge di Hooke è possibile calcolare il momento (torque, T) secondo la relazione (6):

$$T = k \cdot \delta \quad (6)$$

dove k rappresenta la costante della molla e δ la variazione angolare osservabile sullo strumento.

La resistenza non drenata è calcolata dalla relazione (7):

$$c_u = \frac{T}{K_v} \quad (7)$$

in cui K_v è funzione delle caratteristiche geometriche dello scissometro.

Il vane test di laboratorio effettuato in questa sperimentazione segue gli standard descritti dalla normativa ASTM D4648 (2000).

5.1.2 Fall-cone test

Il fall-cone test fornisce una misura speditiva della resistenza al taglio non drenata c_u per i terreni a grana fine. L'apparecchiatura consente di far cadere una serie di utensili di forma conica di dimensioni e forme standard all'interno di un recipiente. La relazione tra l'affondamento dei diversi coni e la resistenza al taglio non drenata viene espressa dalla relazione (8), di Hansbo (1957):

$$\tau_{es} = \frac{K \cdot W}{h_f} \quad (8)$$

in cui τ_{es} indica la resistenza al taglio non drenata, h_f la penetrazione del cono, W il peso del cono utilizzato e K una costante dipendente dalla forma del cono (fall-cone factor).

5.2 Risultati

Sono di seguito riportati i valori di resistenza non drenata c_u ottenuti mediante il vane test espressi in funzione del contenuto d'acqua per ciascun campione (Figura 17, Figura 18, Figura 19, Figura 20, Figura 21, Figura 22).

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

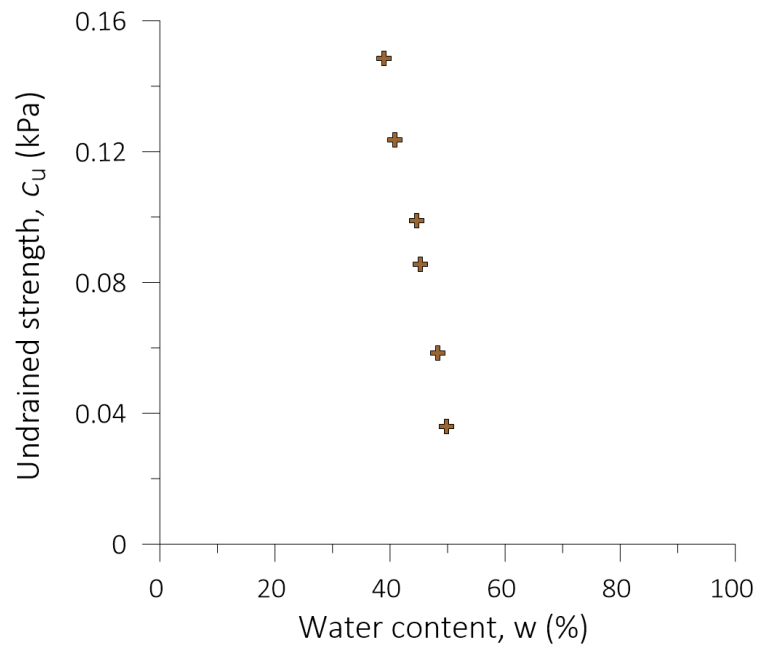


Figura 17: Resistenza non drenata in funzione del contenuto d'acqua del campione R3.

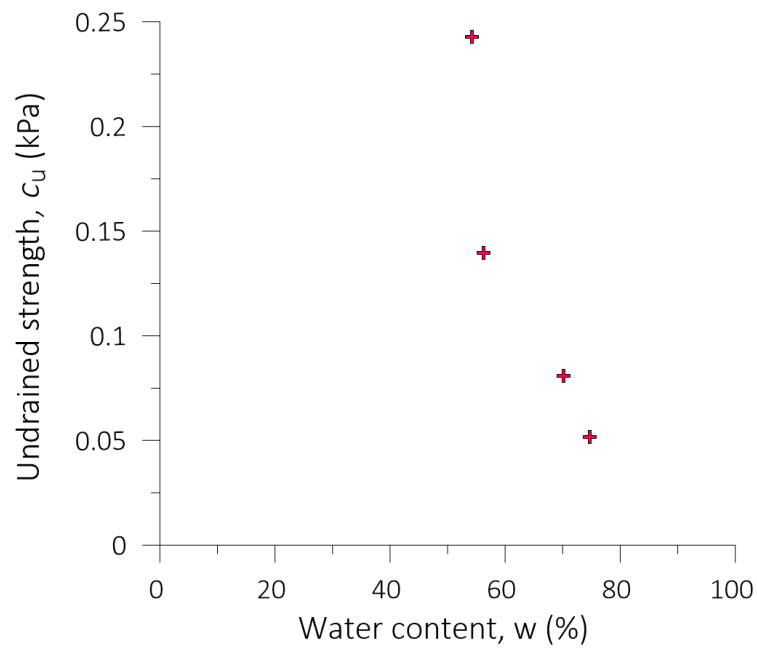


Figura 18: Resistenza non drenata in funzione del contenuto d'acqua del campione R5.

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

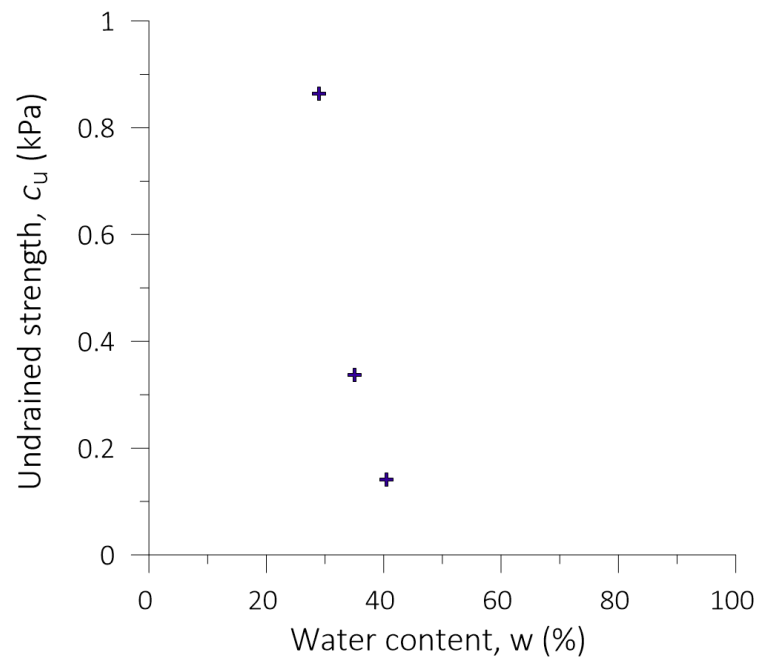


Figura 19: Resistenza non drenata in funzione del contenuto d'acqua del campione R6.

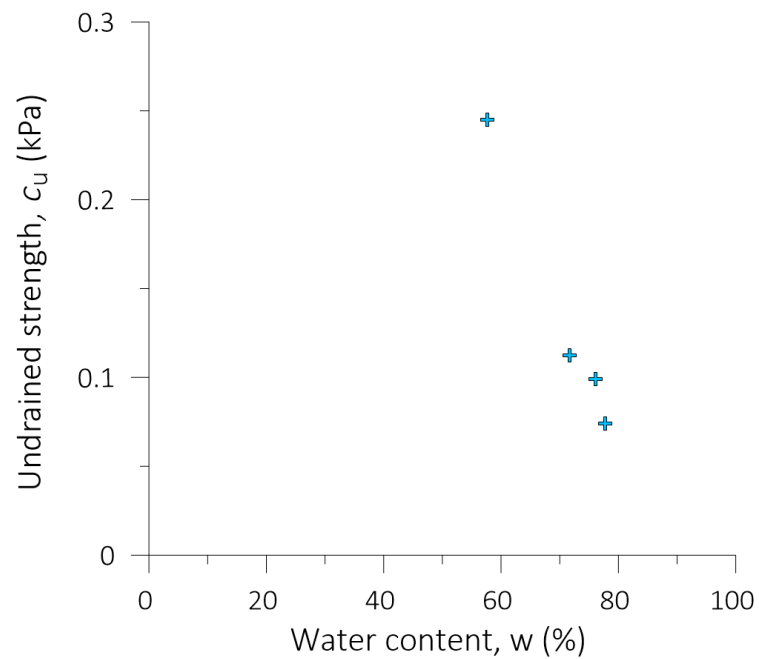


Figura 20: Resistenza non drenata in funzione del contenuto d'acqua del campione R7.

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

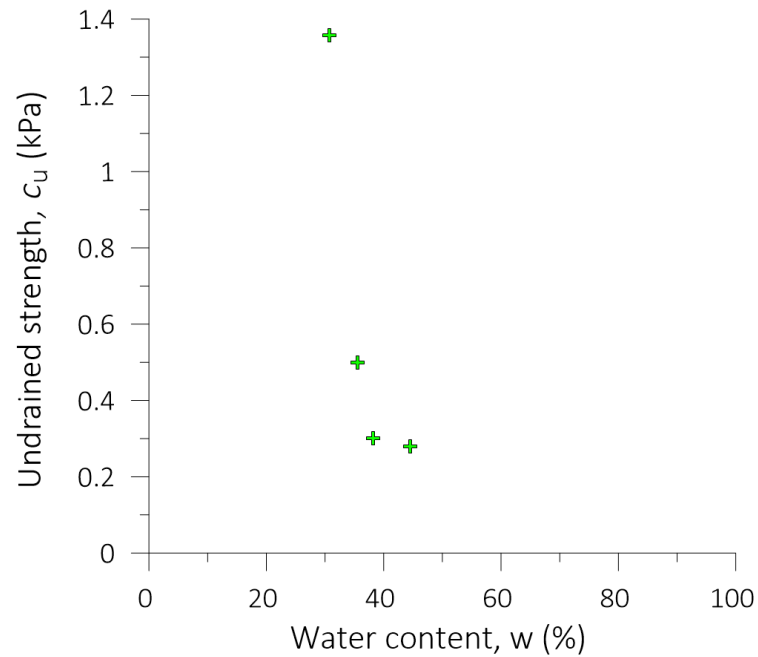


Figura 21: Resistenza non drenata in funzione del contenuto d'acqua del campione R9.

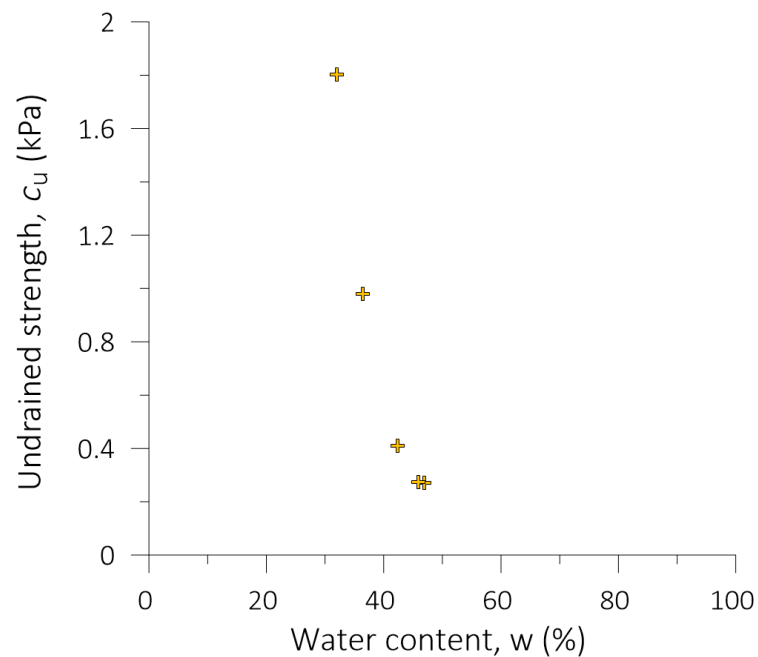


Figura 22: Resistenza non drenata in funzione del contenuto d'acqua del campione R10.

Sono inoltre rappresentati risultati ottenuti dalla correlazione tra la resistenza non drenata c_u ottenuta mediante il vane test, il fall-cone test e una valore medio dei due e il corrispondente indice di liquidità I_L per i campioni: R5, R6, R7, R9 e R10.

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

Come ben noto in letteratura, i dati del fall-cone test producono risultati mediamente più alti rispetto al vane test (scissometro da laboratorio). Nei grafici seguenti, in ogni caso, sono stati riportati, per una discussione, entrambi i risultati con un valore medio calcolato.

Va inoltre specificato che le interpretazioni sono estremamente dipendenti dal valore dei Limiti di Atterberg e che pertanto bisognerà tenere conto di piccoli scostamenti di tali valori tra la porzione del campione sui quali sono stati misurati e la porzione di campione sul quale sono state eseguite le prove di vane test e fall-cone test.

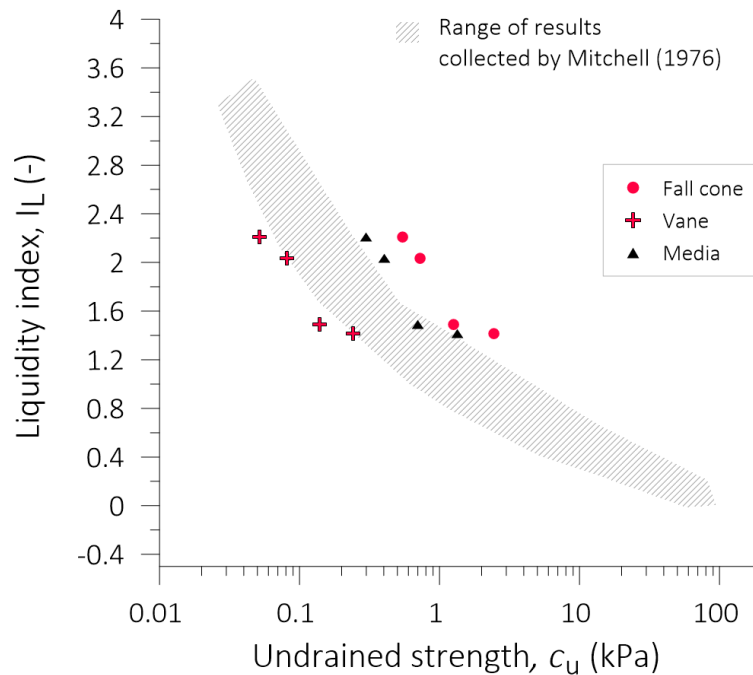


Figura 23: Resistenza non drenata in funzione dell'indice di liquidità del campione R5.

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

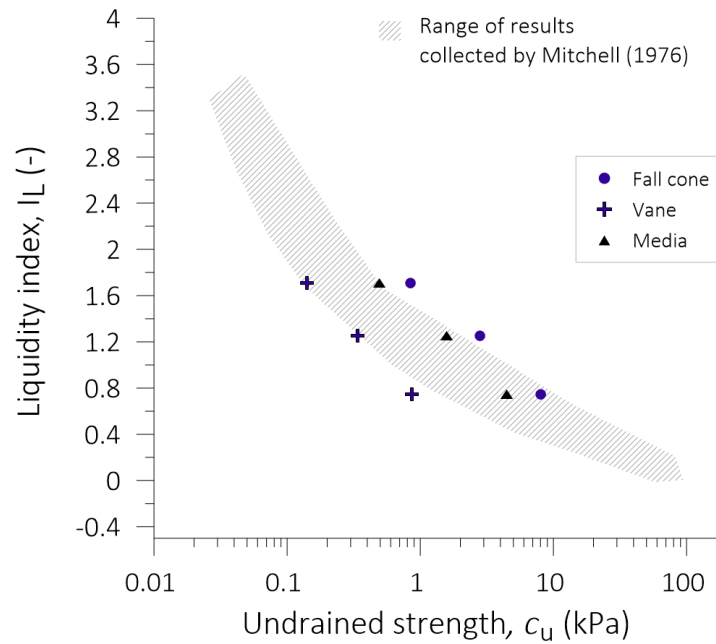


Figura 24: Resistenza non drenata in funzione dell'indice di liquidità del campione R6.

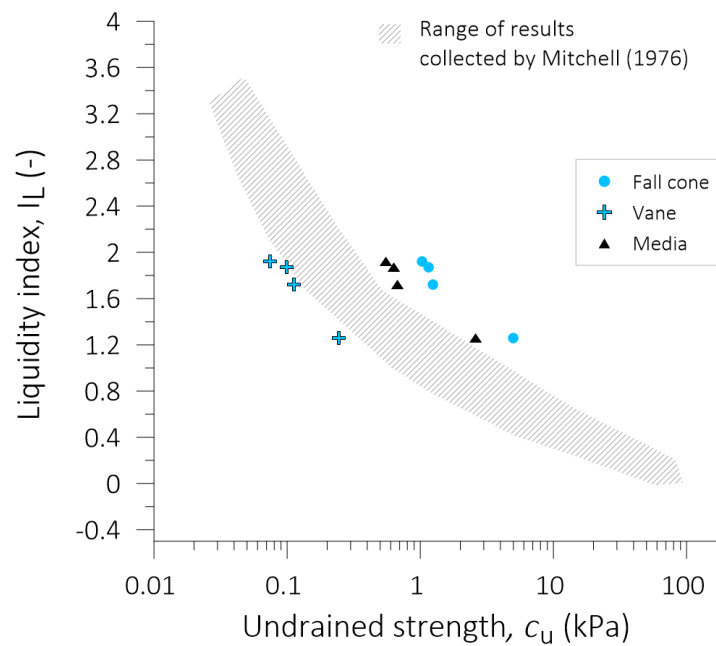


Figura 25: Resistenza non drenata in funzione dell'indice di liquidità del campione R7.

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

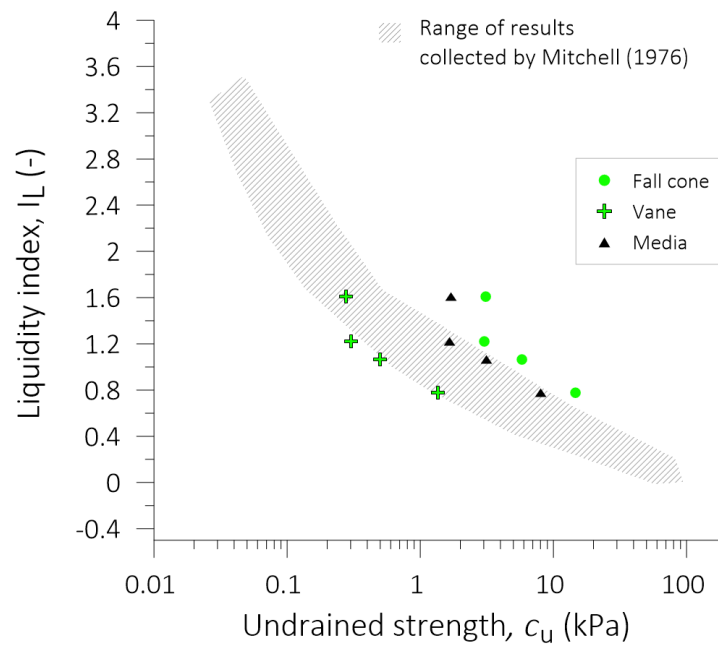


Figura 26: Resistenza non drenata in funzione dell'indice di liquidità del campione R9.

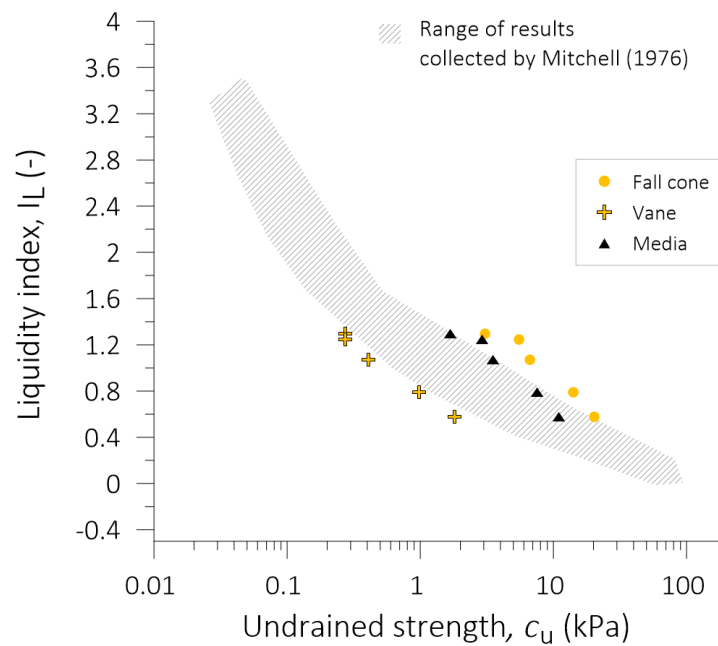


Figura 27: Resistenza non drenata in funzione dell'indice di liquidità del campione R10.

Nella seguente Figura 28 sono infine riportati tutti i risultati sovrapposti ottenuti sui campioni testati.

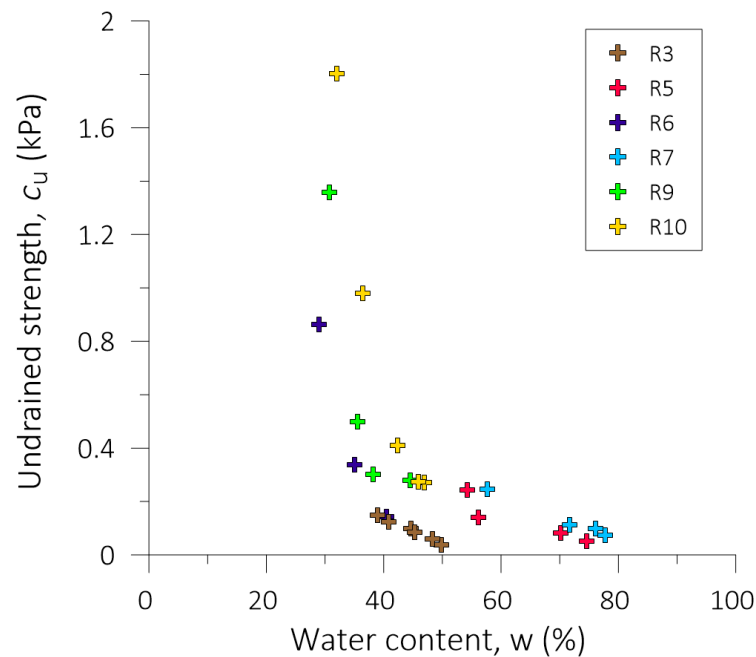


Figura 28: Resistenza non drenata in funzione del contenuto d'acqua per tutti i campioni testati.

6 Test geotecnici effettuati sui campioni indisturbati

In aggiunta alla caratterizzazione geotecnica, sui campioni indisturbati sono state eseguite le seguenti prove:

- vane test;
- prova edometrica;
- misura del contenuto organico (TOC).

6.1 Risultati

6.1.1 Vane test

Sono di seguito riportati i valori di resistenza non drenata c_u ottenuti mediante il vane test espressi in funzione del contenuto d'acqua (Figura 29, Figura 30, Figura 31, Figura 32, Figura 33, Figura 34, Figura 35, Figura 36) per ciascun campione. Per poter operare un miglior confronto nei grafici appena citati sono stati rappresentati, qualora disponibili, anche i valori di resistenza non drenata ottenuti per i campioni disturbati.

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

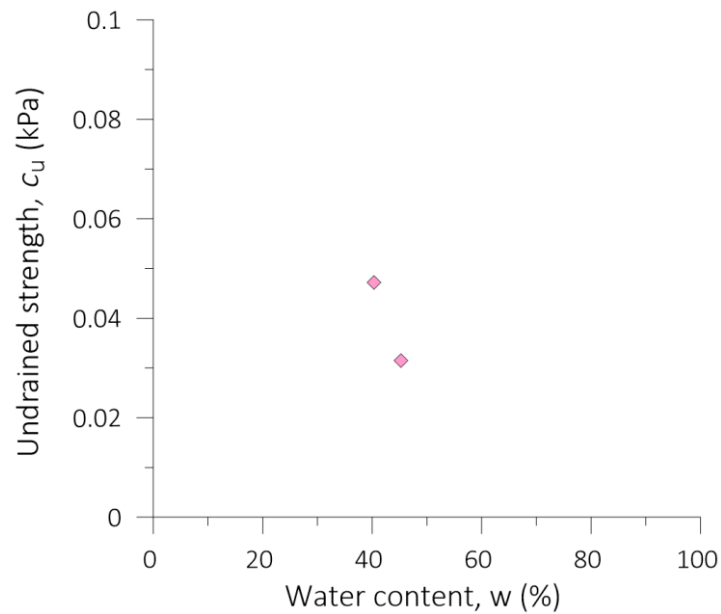


Figura 29: Resistenza non drenata in funzione del contenuto d'acqua per il campione R1.

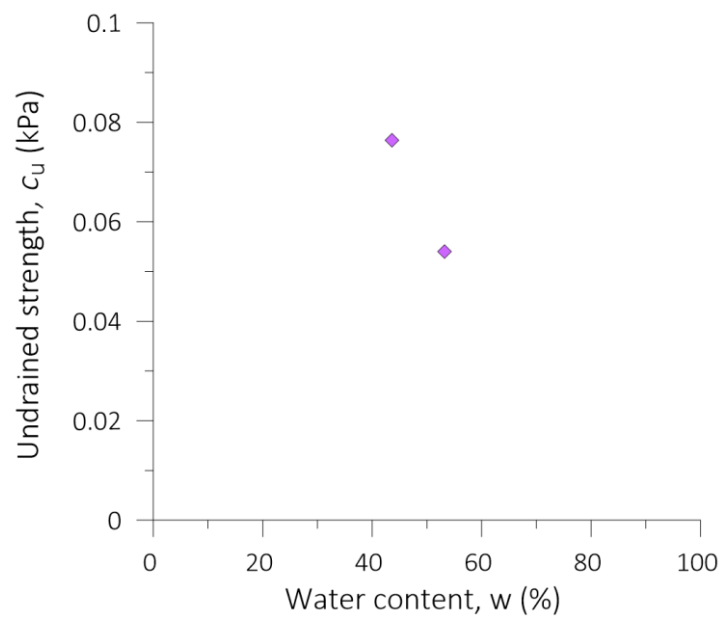


Figura 30: Resistenza non drenata in funzione del contenuto d'acqua per il campione R2.

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

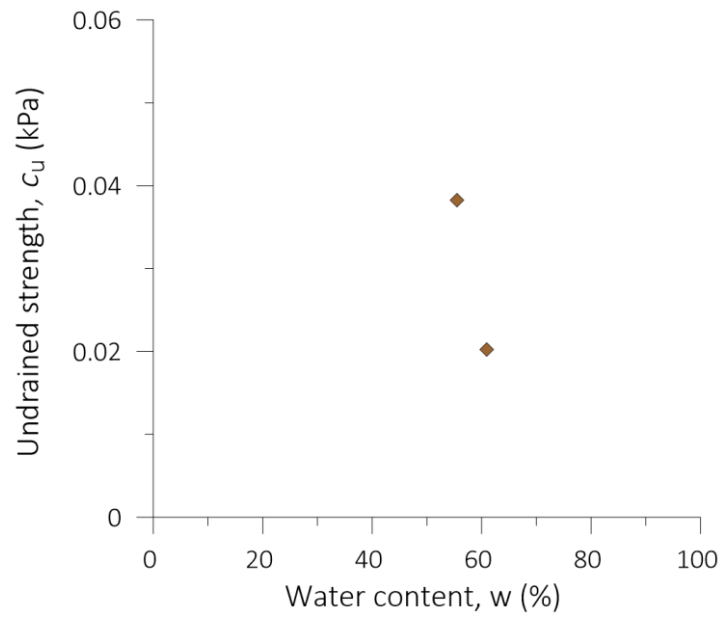


Figura 31: Resistenza non drenata in funzione del contenuto d'acqua per il campione R3.

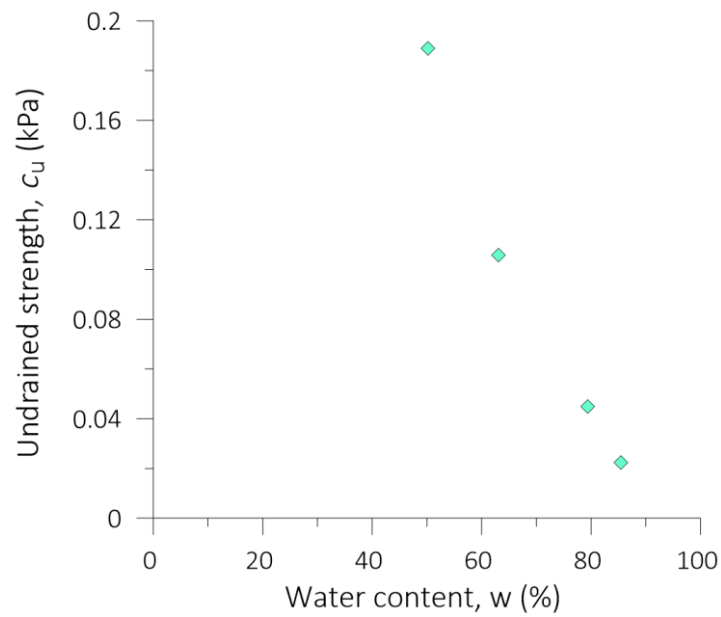


Figura 32: Resistenza non drenata in funzione del contenuto d'acqua per il campione R4.

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

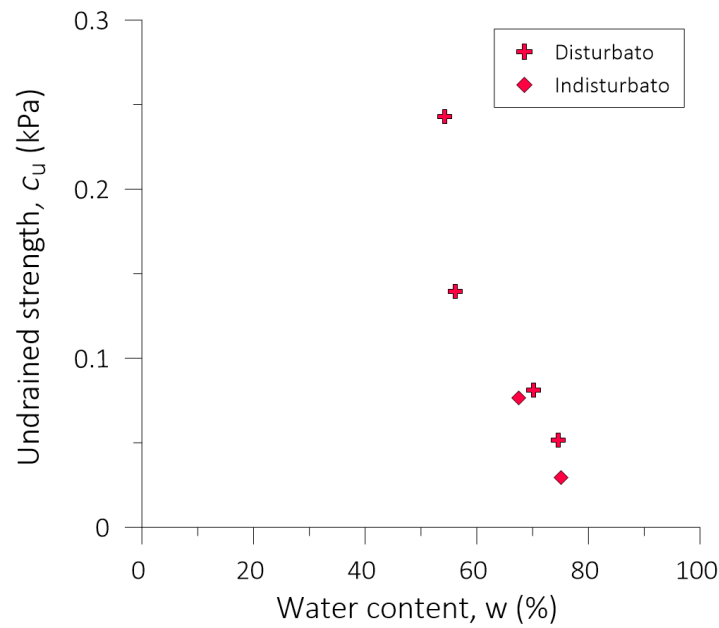


Figura 33: Resistenza non drenata in funzione del contenuto d'acqua per il campione R5.

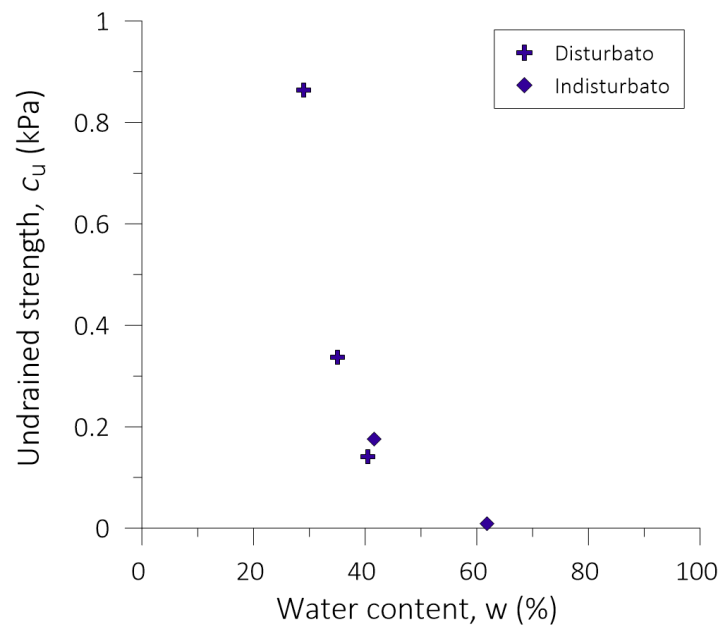


Figura 34: Resistenza non drenata in funzione del contenuto d'acqua per il campione R6.

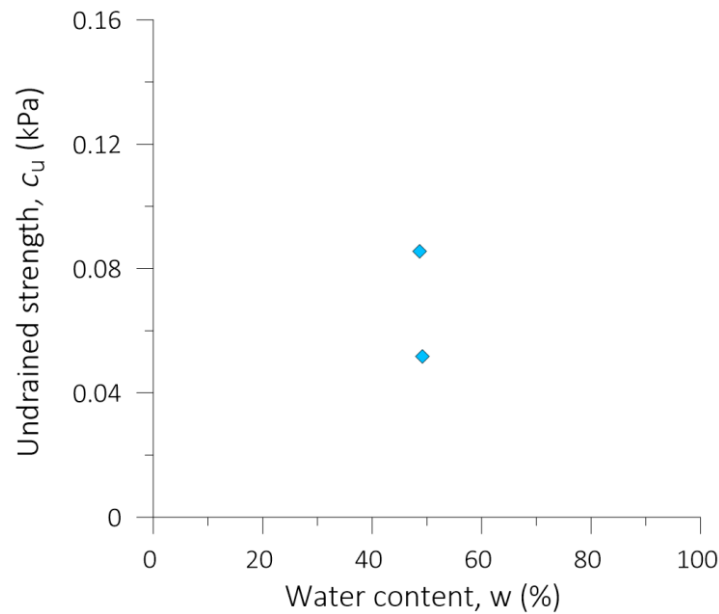


Figura 35: Resistenza non drenata in funzione del contenuto d’acqua per il campione R7.

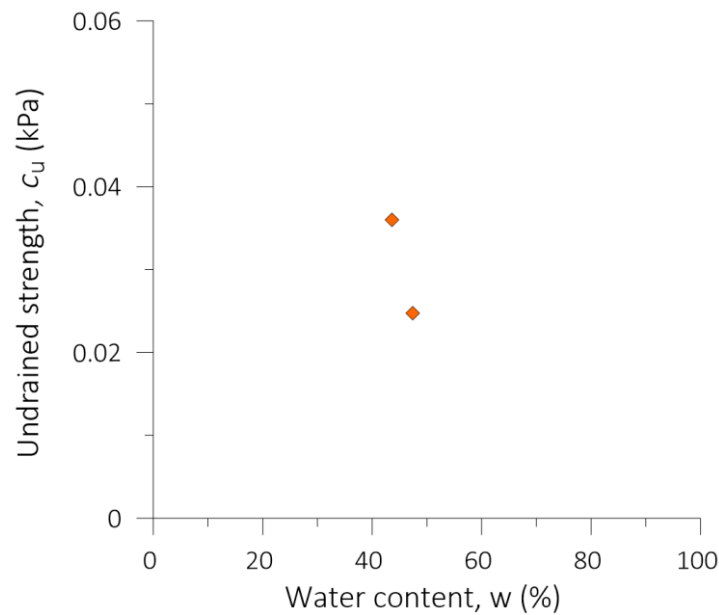


Figura 36: Resistenza non drenata in funzione del contenuto d’acqua per il campione R8.

6.1.2 Prove edometriche

Nelle figure da Figura 37 a Figura 42 sono riportate le curve edometriche dei campioni R1, R4, R5, R6, R7 ed R8 rispettivamente. I valori degli indici di compressione c_c sono esposti in Tabella 17. Come appare chiaro dai risultati, i campioni prelevati, in virtù del particolare stato tensionale in sito e della corrispondente scarsa consistenza ($I_c < 0$) mostrano valori dell’indice dei vuoti iniziale, e ,

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

estremamente elevati un andamento caratterizzato da una forte compressibilità fin dai primi incrementi di carico.

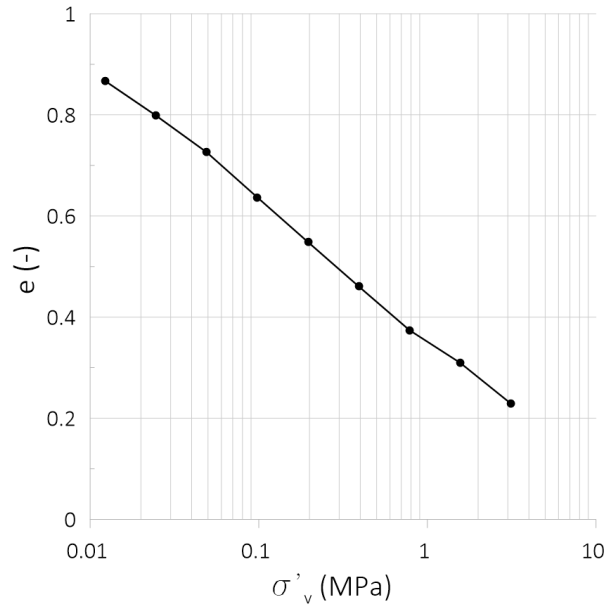


Figura 37: Curva edometrica del campione indisturbato R1.

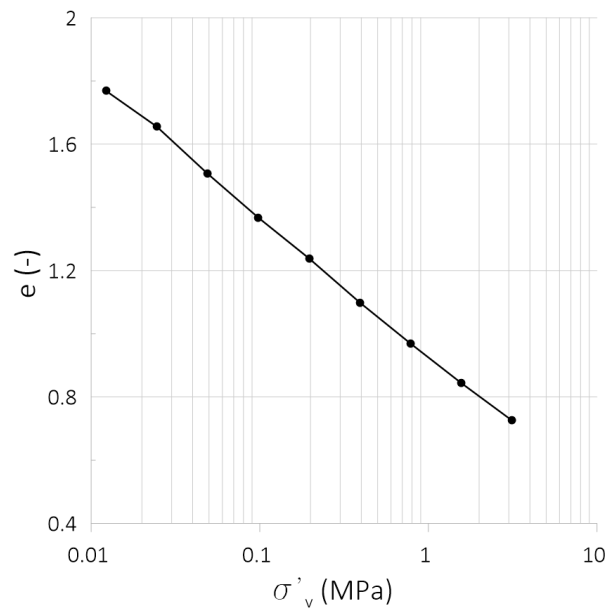


Figura 38: Curva edometrica del campione indisturbato R4.

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

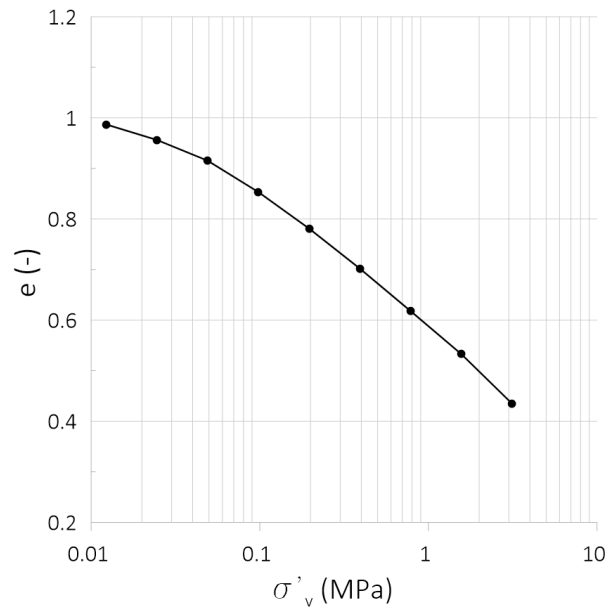


Figura 39: Curva edometrica del campione indisturbato R5.

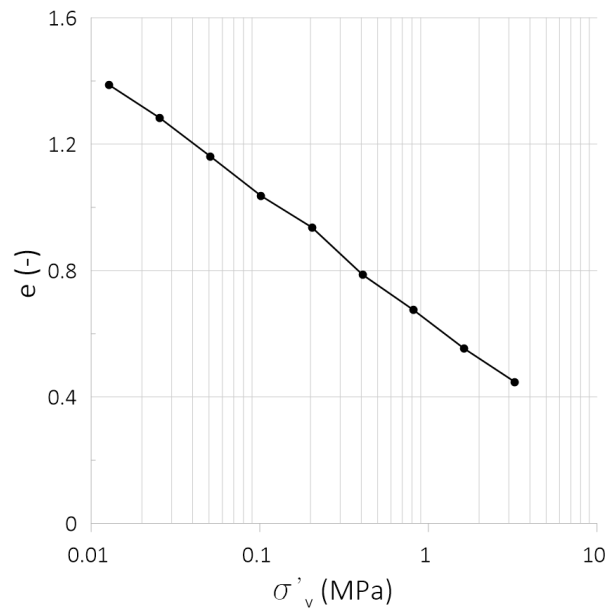


Figura 40: Curva edometrica del campione indisturbato R6.

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

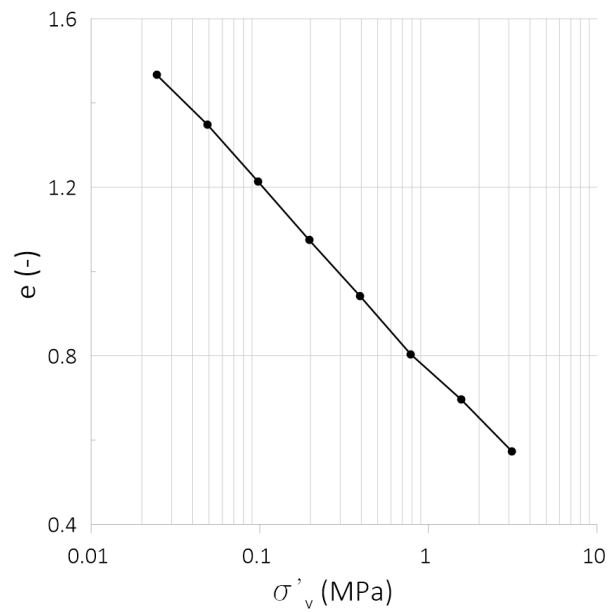


Figura 41: Curva edometrica del campione indisturbato R7.

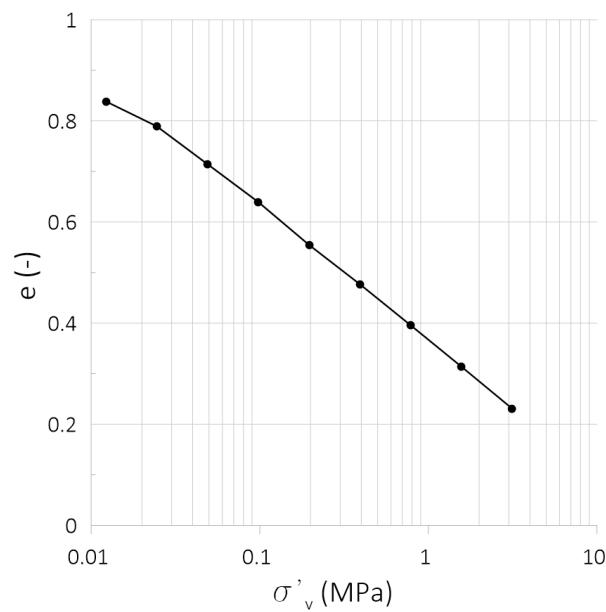


Figura 42: Curva edometrica del campione indisturbato R8.

Tabella 17: Valori degli indici di compressione dei campioni indisturbati R1, R4, R5, R6, R7, R8.

		R1	R4	R5	R6	R7	R8
c_c	(-)	0.26	0.42	0.33	0.38	0.42	0.28

GEEG – Relazione tecnica di sintesi delle attività svolte.

6.1.3 TOC

Nella sottostante Tabella 18 sono riportati i valori di TOC per ciascun campione ottenuti secondo la procedura indicata dalla normativa UNI EN 13137:2002.

Tabella 18: Valori di TOC di tutti i campioni.

	R1	R2	R3	R4	R5	R6	R7	R8	R9	R10
<i>TOC</i> (g _C /kg _{suolo})	4.90	4.03	3.18	6.94	6.95	4.55	4.05	< 3.00	9.21	3.31