

# **UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA**



**DICATeA - Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura**

Parco Area delle Scienze 181/a, 43124 Parma

Tel 0521 905926 - 34

Fax 0521 905924

**“CONVENZIONE DI STUDIO ED ANALISI DI LABORATORIO ASSOCIATE ALLO  
SVILUPPO DI UNA SERIE DI ATTIVITA' PROPEDEUTICHE ALLA REALIZZAZIONE  
DELLA CASSA DI ESPANSIONE DEL TORRENTE BAGANZA”**

**(OPCM 3850/2010 – DECRETO N. 140/2010 “PIANO DEGLI INTERVENTI URGENTI”  
DELLA REGIONE EMILIA ROMAGNA)**

## **RELAZIONE GEOTECNICA**

### **Sintesi**

Parma, 30.01.2014

## 1. Sommario

2.	INTRODUZIONE.....	2
3.	PROVE GEOTECNICHE PREVISTE DA CONVENZIONE .....	5
4.	PROVE GEOTECNICHE SVOLTE.....	5
5.	PROVE CERTIFICATE.....	7
6.	SINTESI DEI RISULTATI .....	9
7.	PROVE IN SITO .....	10
7.1	TIPOLOGIA DI INDAGINI E PROVE ESEGUITE .....	10
7.2	PARAMETRI INDAGATI E METODI DI INTERPRETAZIONE .....	11
7.3	RISULTATI DELL'INTERPRETAZIONE .....	12
8.	PROVE DI LABORATORIO .....	22
8.1	TIPOLOGIA DI PROVE ESEGUITE .....	22
8.2	PARAMETRI INDAGATI E METODI DI INTERPRETAZIONE .....	22
8.3	RISULTATI DELL'INTERPRETAZIONE.....	23
9.	DESCRIZIONE DEGLI ORIZZONTI STRATIGRAFICI .....	24
9.1	ORIZZONTE 1 .....	24
9.2	ORIZZONTE 2 .....	25
9.3	ORIZZONTE 3 .....	27
9.4	ORIZZONTE 4 .....	28
9.5	ORIZZONTE 5 .....	29
9.6	ORIZZONTE 6 .....	30
9.7	ORIZZONTE 7 .....	31
9.8	ORIZZONTE 8 .....	31
9.9	ORIZZONTE 9 .....	33
9.10	ORIZZONTE 10 .....	34

## 2. INTRODUZIONE

Su incarico di A.I.Po (Agenzia Interregionale per il fiume Po), la ditta SOGEO s.r.l. (via Edison 1/1, 48022 Lugo (RA)) ha eseguito un'indagine geognostica in località Sala Baganza (PR), funzionale alla realizzazione della Cassa di Espansione del Torrente Baganza.

La campagna di indagini comprendeva l'esecuzione di n.16 sondaggi a carotaggio continuo, denominati S1, S2, ..., S16. Essi sono stati eseguiti nel periodo di tempo compreso tra giugno e agosto 2012. Nel corso dei sondaggi sono stati prelevati complessivamente n.25 campioni indisturbati di terreno mediante campionatore a pareti sottili tipo "Oesterberg" munito di fustelle in acciaio inox, da sottoporre a prove geotecniche di laboratorio.

La planimetria con l'ubicazione dei sondaggi viene di seguito riportata (Figura 2.1).

Per le stratigrafie dei singoli sondaggi si rimanda al documento *Indagini geognostiche funzionali alla realizzazione della Cassa di Espansione del Torrente Baganza nei Comuni di Parma – Collecchio – Sala e Felino*, consegnato dalla ditta SOGEO s.r.l. in data 18.09.2012.

I campioni sono stati consegnati presso il Laboratorio Geotecnico A.I.Po di Boretto (RE) in data 29.08.2012 (numero richiesta prove e verbale di accettazione n. 05/2012).

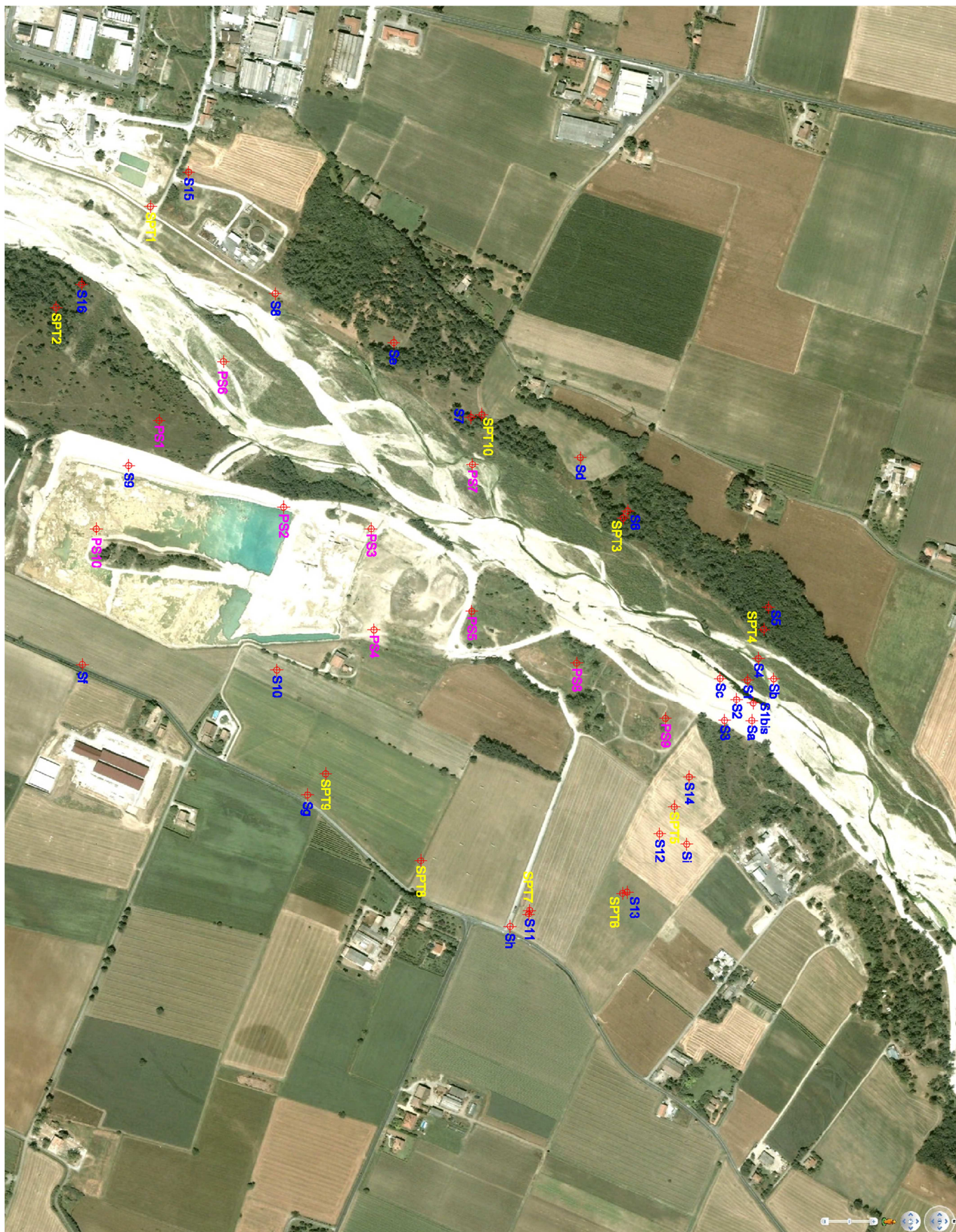
L'attività di laboratorio sul materiale in questione è iniziata nel settembre 2012.

Al momento dell'apertura del campione indisturbato S1 C.I.1 per la realizzazione delle prove, si è riscontrato un non corretto stato di conservazione dello stesso. Temendo che la medesima situazione fosse riscontrabile anche per altri campioni, si è immediatamente deciso di procedere al controllo visivo della corretta sigillatura degli stessi.

Tale controllo ha permesso di riscontrare come la maggior parte dei campioni fosse caratterizzato da una non corretta paraffinatura delle estremità all'interno delle fustelle con conseguente deterioramento o, addirittura, quasi completa essiccazione del materiale. Alcune fustelle apparivano inoltre danneggiate in corrispondenza dei bordi, rendendo difficoltosa l'estrazione del materiale.

Per i dettagli relativi alla verifica eseguita sui campioni indisturbati si rimanda al documento Relazione riassuntiva in merito alle attività geotecniche d'indagine e studio relative alla realizzazione della cassa d'espansione sul Torrente Baganza, consegnato dal DICATeA presso la sede A.I.Po nel dicembre 2012.

A titolo di esempio si riportano di seguito alcune immagini relative alle verifiche sopra menzionate (Figura 2.2).



**Figura 2.1.** Planimetria con ubicazione dei sondaggi.





a)



b)



c)



d)



e)



f)

**Figura 2.2.** Estremità inferiore a) e superiore b) del campione indisturbato S7 C.I.2 prelevato a profondità di 15.00-15.60 m da p.c.; Estremità inferiore c) e superiore d) del campione indisturbato S13 C.I.2 prelevato a profondità di 23.00-23.50 m da p.c.; Estremità inferiore e) e superiore f) del campione indisturbato S1bis C.I.1 prelevato a profondità di 5.40-5.90 m da p.c. Le estremità dei campioni appaiono non correttamente paraffinate e in alcuni casi i bordi delle fustelle sono visibilmente deformati.

Successivamente, a distanza di circa un anno, la ditta SOGEO s.r.l. ha eseguito n.2 sondaggi a carotaggio continuo in aggiunta a quelli già menzionati (S17 e S18). I sondaggi in questione sono stati realizzati in data 03.07.2013.

Da essi sono stati prelevati ulteriori n.3 campioni indisturbati denominati S17 C.I.1, S18 C.I.1. e S18 C.I.2 a profondità di 5.00-5.60 m da p.c. che avrebbero dovuto sostituire per le prove i campioni non utilizzabili.

I campioni sono stati consegnati presso il Laboratorio Geotecnico A.I.Po di Boretto (RE) in data 03.07.2013 (numero richiesta prove n. 10/2013 e verbale di accettazione n. 18/2013).

### **3. PROVE GEOTECNICHE PREVISTE DA CONVENZIONE**

Le prove geotecniche previste dalla “Convenzione di studio ed analisi di laboratorio associate allo sviluppo di una serie di attività propedeutiche alla realizzazione della cassa di espansione del Torrente Baganza” sono di seguito riportate:

1. Prove di classificazione delle terre su circa 40 campioni;
2. Prove edometriche con progressione di carico da stabilirsi a seconda della zona di provenienza del campione, della litologia dello stesso e dalle previsioni progettuali che riguardano l’area di prelievo, su 14 campioni;
3. Prove di permeabilità attraverso l’impiego di permeametro o cella edometrica opportunamente strumentata, su 7 campioni;
4. Prove triassiali Consolidate Isotropicamente e non Drenate (CU) su 9 campioni;
5. Prove triassiali Consolidate Isotropicamente e Drenate (CD) su 3 campioni in materiale prevalentemente sabbioso;
6. Prove triassiali Consolidate Isotropicamente e Drenate (CD) su 3 campioni in materiale prevalentemente argilloso;
7. Prove di Compattazione AASHO su 10 campioni.

### **4. PROVE GEOTECNICHE SVOLTE**

Le prove di laboratorio effettivamente svolte si discostano in parte dal programma di prove previsto da convenzione.

Le caratteristiche dei campioni indisturbati a disposizione non ha permesso di realizzare in modo completo il numero e la tipologia di prove inizialmente stabilite.

Le prove effettivamente eseguite sono riportate di seguito:

- Prove di classificazione su 35 campioni;
- Prove edometriche su 14 campioni;
- Prove di taglio diretto su 7 campioni.

Le limitazioni alle prove eseguibili sono da attribuire alle seguenti caratteristiche dei campioni:

- il materiale estruso dalle fustelle si è rivelato spesso fortemente alterato nel contenuto d'acqua naturale. La non corretta paraffinatura delle estremità dei campioni indisturbati ha portato in alcuni casi alla quasi completa essiccazione del materiale stesso, rendendo impossibile la realizzazione di prove meccaniche;
- il materiale costituente i campioni indisturbati si è rivelato in alcuni casi inutilizzabile ai fini dell'esecuzione di prove meccaniche poiché costituito da un'elevata percentuale di ghiaia. In certi casi è stato possibile prelevare un campione di fine sul quale eseguire prove edometriche (sulla matrice fine indisturbata) e/o di taglio diretto (su campioni ricostituiti);
- la maggior parte dei campioni indisturbati sono caratterizzati da materiale di elevata consistenza. Tale caratteristica ha reso in generale difficili le operazioni di fustellazione e, nello specifico delle prove triassiali e di permeabilità in cella edometrica, ha impedito la saturazione dei provini.

Facendo specifico riferimento ai contenuti della convenzione, le prove non eseguite sono di seguito riportate:

1. Prove di permeabilità attraverso l'impiego di permeametro o cella edometrica opportunamente strumentata, su 7 campioni;
2. Prove triassiali Consolidate Isotropicamente e non Drenate (CU) su 9 campioni;
3. Prove triassiali Consolidate Isotropicamente e Drenate (CD) su 3 campioni in materiale prevalentemente sabbioso;
4. Prove triassiali Consolidate Isotropicamente e Drenate (CD) su 3 campioni in materiale prevalentemente argilloso;
5. Prove di Compattazione AASHO su 10 campioni.

Le prove triassiali su 15 provini previste sono state in parte eseguite: sono stati portati a rottura 13 provini (Figura 4.1).

Tuttavia la durata delle singole fasi delle prove e i risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati grezzi devono essere considerati con le dovute cautele.



**Figura 4.1.** Provini triassiali portati a rottura.

La norma di riferimento per le prove di compressione triassiale consolidate su terreni saturi (UNI CEN ISO/TS 17892-9) prevede che durante la fase di saturazione venga calcolato  $B$  sulla base dei valori di  $\Delta u$  misurati entro 10 min. dall'istante di applicazione dell'incremento di pressione di cella. I valori di  $\Delta u$  misurati sulla base di quanto indicato dalla normativa hanno sempre restituito valori di  $B$  distanti dal valore di saturazione.

Mediamente la fase di saturazione si è prolungata per 20 giorni e la fase di consolidazione si è protratta per 7 giorni.

È apparso evidente che lo stato dei provini ne impediva una corretta saturazione.

Queste stesse caratteristiche del materiale hanno impedito l'esecuzione delle prove di permeabilità.

Le prove di compattazione al momento non sono state eseguite per mancanza di materiale idoneo.

## **5. PROVE CERTIFICATE**

Le prove eseguite sono state svolte seguendo i contenuti delle seguenti norme:

- UNI CEN ISO/TS 17892-1:2005 - Determinazione del contenuto in acqua;
- UNI CEN ISO/TS 17892-2:2005 - Determinazione della massa volumica dei terreni a grana fine - Metodo delle misurazioni lineari;
- RACCOMANDAZIONI SULLE PROVE GEOTECNICHE DI LABORATORIO (A.G.I., 1994) - Analisi granulometrica di una terra;
- UNI CEN ISO/TS 17892-3:2005 - Determinazione della massa volumica dei granuli solidi - metodo del picnometro;
- CNR-UNI 10014 (1964) - Determinazione dei limiti di consistenza (o di Atterberg) di una terra;



- RACCOMANDAZIONI PER L'ESECUZIONE E LA INTERPRETAZIONE DELLE INDAGINI GEOTECNICHE (A.G.I., 1977) - Classifiche geotecniche;
- CNR-UNI 10006:2002 - Classificazione delle terre;
- UNI CEN ISO/TS 17892-5:2004 - Prova edometrica ad incrementi di carico;
- UNI CEN ISO/TS 17892-10:2005 - Prove di taglio diretto.

Le prove realizzate hanno permesso di produrre i seguenti certificati allegati alla presente relazione:

- 18 certificati relativi all'apertura dei campioni indisturbati;
- 35 certificati relativi alle prove di classificazione;
- 14 certificati relativi alle prove edometriche;
- 7 certificati relativi alle prove di taglio diretto.

I certificati prodotti sono complessivamente 74.

I numeri ad essi assegnati sono:

- 3624 del 25.11.2013
- 3648 – 3720 del 24.01.2014.

## 6. SINTESI DEI RISULTATI

Il presente documento si propone come una sintesi dei risultati derivanti dalle prove in sito e di laboratorio realizzate al fine di caratterizzare i terreni di fondazione per la costruzione di una cassa d'espansione sul Torrente Baganza in località Casale di Felino (PR).

Le prove in sito sono state eseguite dalla ditta SOGEO s.r.l. - Lugo (RA).

Le prove di laboratorio sono state eseguite dal Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura (DICATeA) dell'Università degli Studi di Parma - Parma (PR).

I dati ricavati dalle suddette prove sono stati analizzati ed elaborati con l'intento di definire un modello stratigrafico del terreno di fondazione per il manufatto regolatore della cassa e per i rilevati arginali.

Le analisi svolte si sono concretizzate nella restituzione di sei sezioni stratigrafiche nelle quali sono stati individuati i principali orizzonti.

La Sezione D-D', è trasversale alla direzione del corso d'acqua e mostra il modello del sottosuolo relativo all'area su cui verranno costruiti il manufatto regolatore e le arginature frontali della cassa, che risultano anche quelle maggiormente elevate. Le Sezioni E-E' e F-F' sono anch'esse trasversali alla direzione del corso d'acqua e posizionate nella zona intermedia e posteriore

Le Sezioni A-A', B-B' e C-C' sono longitudinale rispetto alla direzione del corso d'acqua e seguono rispettivamente l'andamento del rilevato arginale in sponda sinistra della cassa d'espansione, l'andamento dell'alveo attuale e l'andamento del rilevato arginale in sponda destra.

A ciascun orizzonte stratigrafico è stata attribuita una descrizione derivante dalle caratteristiche granulometriche ottenute tramite le prove di laboratorio. Tali caratteristiche sono in sostanziale accordo con le descrizioni riportate nelle stratigrafie, frutto di una speditiva analisi eseguita sul campo.

I risultati delle prove di laboratorio e delle prove in sito sono stati utilizzati anche per stimare un intervallo di variazione di alcuni parametri geotecnici pertinenti ai vari orizzonti litologici individuati.

Nei paragrafi a seguire sono riportati i risultati delle elaborazioni dei dati provenienti da prove in sito e di laboratorio.

E' inoltre fornita una descrizione dei diversi orizzonti stratigrafici, mettendo in evidenza eventuali criticità da tenere presenti in fase di progettazione, legate alle caratteristiche meccaniche dei terreni di fondazione.

Per i dettagli relativi alle prove in sito si rimanda alla relazione (PR-E-1050) – *Indagini geognostiche funzionali alla realizzazione della Cassa di Espansione del Torrente Baganza nei Comuni di Parma – Collecchio – Sala e Felino*, fornita dalla ditta SOGEO s.r.l in data 18.09.2012.

Per i dettagli relativi alle prove di laboratorio si rimanda ai certificati di laboratorio n. 3624 – 3720 emessi dal Laboratorio Prove Materiali e Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura (DICATeA) dell'Università degli Studi di Parma e consegnati in data 31.01.2014 (Rif.: *Convenzione di studio ed analisi di laboratorio associate allo sviluppo di una serie di attività propedeutiche alla realizzazione della cassa di espansione sul Torrente Baganza* del 17.12.2012 – OPCM 3850/2010 – DECRETO N.140/2010 “*Piano degli interventi urgenti*” della Regione Emilia Romagna.

## 7. PROVE IN SITO

### 7.1 TIPOLOGIA DI INDAGINI E PROVE ESEGUITE

Nella Tabella 7.1 vengono riportati la tipologia e il numero di indagini e prove eseguite dalla ditta SOGEO s.r.l. La campagna di indagini è stata realizzata nell'estate 2012.

**Tabella 7.1.** Tipologia e numero di indagini/prove eseguite in sito.

Tipologia di indagine	Numero	Nome	Dettagli
Sondaggi geognostici a carotaggio continuo	16	S1 ÷ S16	Profondità variabile da 30.0 a 60.0 m da p.c. Esecuzione di prove S.P.T. e prove di permeabilità di tipo LEFRANC a carico variabile. Prelievo di n. 25 campioni indisturbati di terreno. All'interno di 14 fori di sondaggio sono stati installati tubi piezometrici di tipo "NORTON" a tubo aperto, di diametro 3".
Perforazioni a distruzione di nucleo	9	Sa ÷ Si	Profondità variabile da 20.0 a 28.0 m da p.c.
Indagine geofisica <i>down-hole</i>	1	DHS2	Eseguita all'interno della perforazione S2 per una profondità di 50.0 m
Standard Penetration Test	84	-	-
Prove penetrometriche dinamiche tipo DPSH	10	DPSH 1 – DPSH 10*	
Pozzetti esplorativi	10	PS1 – PS10	Profondità di 4.0 m

\* nella tavola planimetrica fornita dalla ditta SOGEO s.r.l. relativa all'ubicazione delle indagini non si fa alcun riferimento a prove DPSH. Nella planimetria tuttavia sono indicate n.10 prove denominate SPT1 – SPT10 esterne ai fori di sondaggio. Dal momento che viene specificato nel documento di descrizione lavori che le prove SPT sono state realizzate nei fori di sondaggio e dal momento che le prove DPSH non compaiono nella tavola, si ritiene che le prove indicate in planimetria come SPT1 – SPT10 siano in realtà prove DPSH. Pertanto, nel presente documento, le indagini denominate SPT1 – SPT10 nella planimetria SOGEO verranno rinominate come DPSH 1 – DPSH 10.

## 7.2 PARAMETRI INDAGATI E METODI DI INTERPRETAZIONE

I dati delle prove eseguite in sito sono stati analizzati con l'intento di individuare gli intervalli di variazione di alcuni parametri geotecnici. In particolar modo sono stati presi in considerazione i risultati derivanti dall'esecuzione delle prove penetrometriche dinamiche, distinte in prove SPT e DPSH.

I parametri geotecnici indagati sono di seguito riportati:

- densità relativa DR espressa in percentuale [%];
- l'angolo d'attrito efficace  $\Phi'$  espresso in gradi [°];
- il modulo edometrico o modulo confinato  $E_{oed}$  in MegaPascal [MPa].

Per quanto riguarda le prove SPT, i valori del numero di colpi  $N_{SPT}$  sono stati utilizzati per individuare un intervallo di variazione dei parametri sopra indicati attraverso l'impiego di correlazioni empiriche e abachi sviluppati da vari autori.

Nel dettaglio, le correlazioni empiriche utilizzate sono di seguito elencate:

### DENSITÀ RELATIVA

- abaco di Gibbs e Holtz (1957);
- relazione di Skempton (1986);
- relazione di Meyerhof (1957).

### ANGOLO D'ATTRITO

- relazione di de Mello (1971 – per valori di  $\Phi > 38^\circ$  individuati attraverso l'abaco si suggerisce l'impiego di una relazione analitica empirica);
- relazione di Meyerhof per percentuali di limo superiori al 5% (1965);
- abaco di Schmertmann (1975).

### MODULO EDOMETRICO

- relazione Farrent;
- relazione di Menzenbach e Malcev per sabbia ghiaiosa;
- abaco di Mitchell e Gardner (1975).

Per quanto riguarda le prove DPSH, ci si è limitati a riportare nelle sezioni sviluppate i grafici degli



andamenti dei valori di resistenza alla punta  $q_c$  [MPa] in funzione della profondità fornite dalla ditta esecutrice.

Appare doveroso e necessario fare una precisazione in merito all'elaborazione dei dati delle prove SPT. Le prove SPT sono pensate per essere eseguite su terreni sabbiosi sciolti o mediamente addensati. Le relazioni analitiche e gli abachi proposti da vari autori in letteratura e abitualmente utilizzati per l'interpretazione dei dati delle prove sono di natura empirica e sono riferiti all'applicazione della prova in condizioni standard, ovvero su terreni appropriati.

L'utilizzo di queste relazioni ed abachi per l'interpretazione dei risultati di prove eseguite in contesti differenti hanno una scarsa attendibilità.

Nel caso specifico, le prove in questione sono state eseguite prevalentemente su ghiaie in matrice limo – argillosa da scarsa ad abbondante. Tali condizioni sono distanti da quelle ideali per l'applicazione della prova, sia in termini di granulometrie coinvolte, sia in termini di coesione e di regime delle pressioni interstiziali.

Per tali motivi, i risultati di seguito presentati appaiono particolarmente dispersi e vanno utilizzati con le dovute cautele.

Si suggerisce pertanto di confrontare le informazioni ottenute dalle prove in sito con i valori degli analoghi parametri individuati tramite le prove di laboratorio, ai fini di valutare correttamente i parametri da utilizzare per le scelte progettuali.

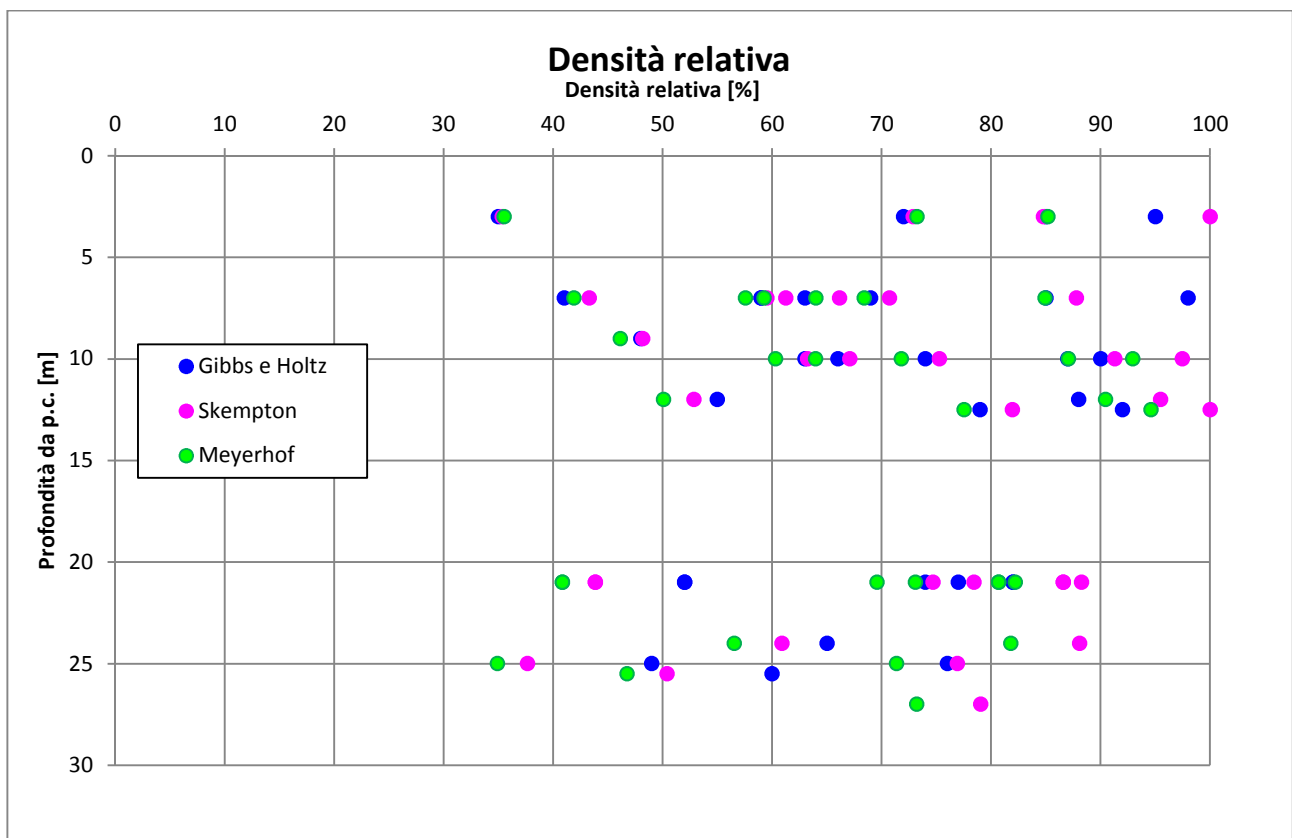
### 7.3 RISULTATI DELL'INTERPRETAZIONE

In questo paragrafo vengono riportati i risultati delle elaborazione dei dati derivanti dalle prove SPT eseguite in sito.

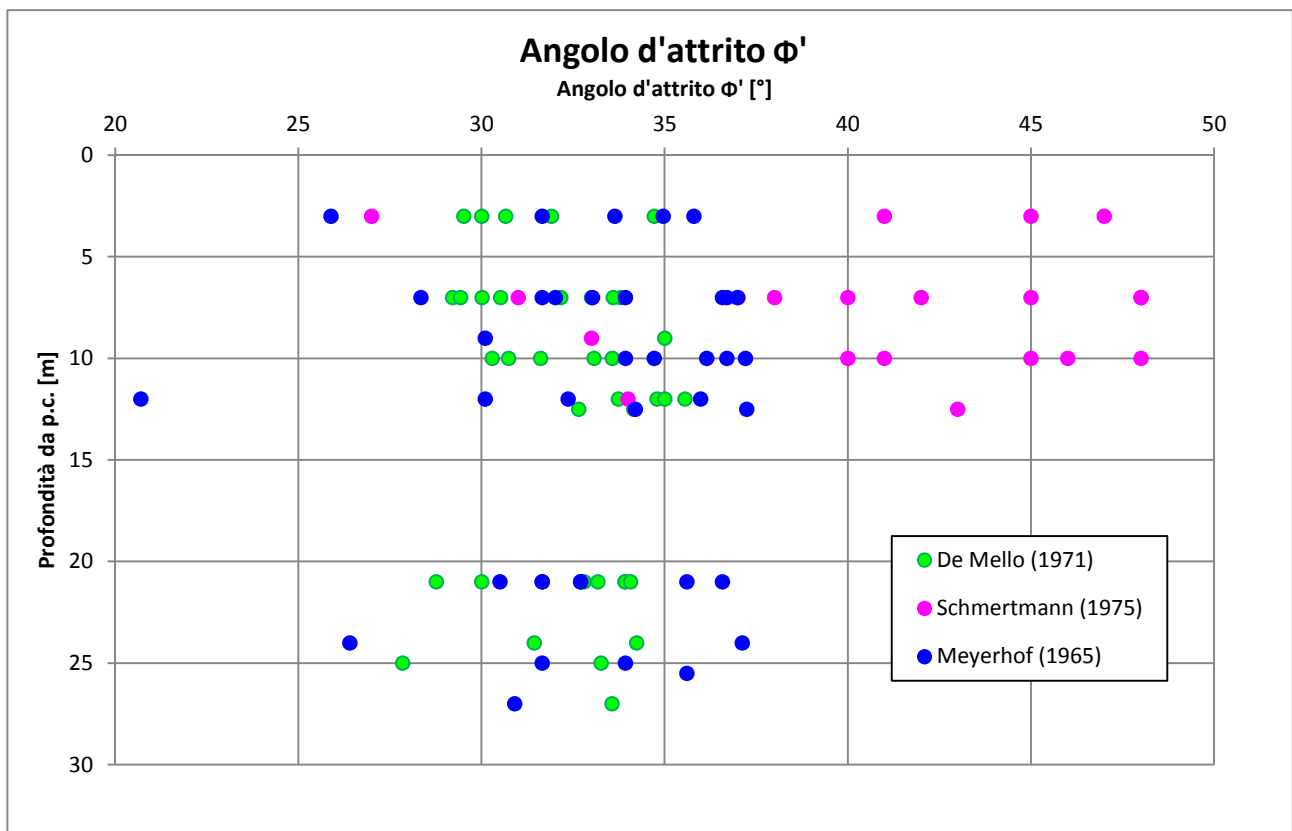
Tali risultati verranno discussi e commentati successivamente, associandoli a ciascun orizzonte stratigrafico individuato.

In questo capitolo ci si limiterà a riportare tabelle e grafici dei valori dei parametri geotecnici indagati.

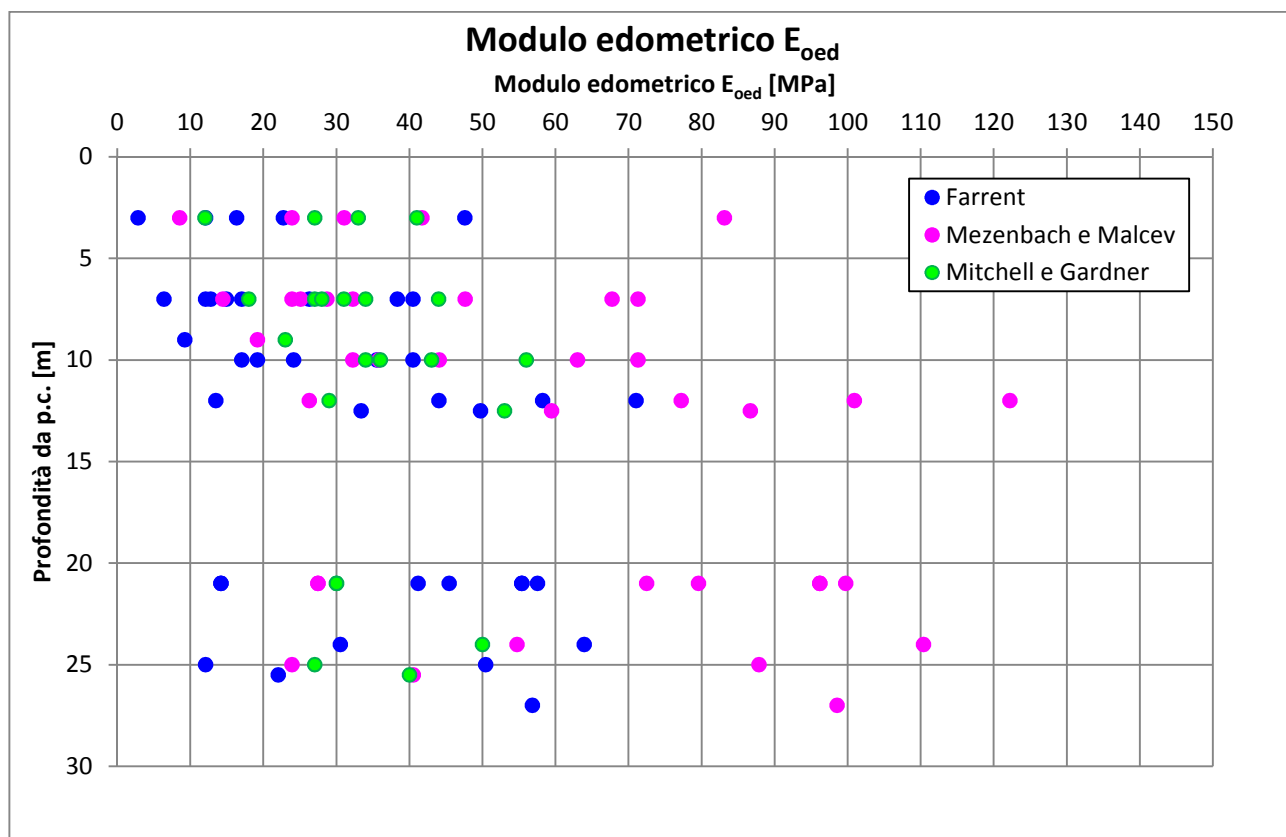
I dati sono raggruppati nei singoli grafici/tabelle in funzione della sezione stratigrafica di riferimento.



**Grafico 7.1.** Valori di densità relativa [%] in funzione del numero di colpi  $N_{SPT}$  alle diverse profondità per la sezione trasversale.



**Grafico 7.2.** Valori dell'angolo d'attrito in funzione del numero di colpi  $N_{SPT}$  alle diverse profondità per la sezione trasversale.



**Grafico 7.3.** Valori del modulo edometrico in funzione del numero di colpi NSPT alle diverse profondità per la sezione trasversale.

**Tabella 7.2.** Valori di densità relativa [%] per la sezione stratigrafica trasversale (Sezione D-D').

	prof. da p.c. [m]	NSPT	Gibbs e Holtz (1957)	Skempton (1986)	Meyerhof (1957)
Sondaggio S1	3	32	95	100	100
	7	17	59	60	58
	10	24	63	63	60
	12	a rifiuto			
	21	78	82	87	81
	24	90		88	82
Sondaggio S2	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	4	35	35	36
	7	57		109	105
	10	a rifiuto			
	12	100		121	115
	21	78	82	87	81
	27	80		79	73
Sondaggio S3	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	23	85	85	85
	7	18	59	61	59
	10	57	90	97	93
	12	a rifiuto			
	21	81		88	82
	25	a rifiuto			
Sondaggio S4	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	17	72	73	73
	7	9	41	43	42
	10	27	66	67	64
	12.5	70	92	100	95
	21	58	74	75	70
	25	a rifiuto			
Sondaggio S5	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	a rifiuto			
	7	21	63	66	64
	10	a rifiuto			
	12	82		110	104.03
	21	64	77	78	73
	25	71	76	77	71
Sondaggio S12	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	a rifiuto			
	7	37	85	88	85
	10	34	74	75	72
	12	19	55	53	50
	21	20	52	44	41
	25.5	31	60	50	47
Sondaggio S13	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	a rifiuto			
	7	54	98	106	103
	9	13	48	48	46
	12.5	47	79	82	78
	21	20	52	44	41
	24	43	65	61	57
Sondaggio S14	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	67		145	145
	7	24	69	71	68
	10	50	87	91	87
	12	62	88	95	90
	21	a rifiuto			
	25	17	49	38	35



**Tabella 7.3.** Valori dell'angolo d'attrito [°] per la sezione stratigrafica trasversale (Sezione D-D').

	prof. da p.c. [m]	NSPT	Meyerhof (1965)	De mello (1971)	Schmertmann (1975)
Sondaggio S1	3	32	36	32	47
	7	17	32	29	42
	10	24	34	30	40
	12	a rifiuto			
	21	78	32	34	
	24	90	26	34	
Sondaggio S2	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	4	26	30	27
	7	57	37	34	48
	10	a rifiuto			
	12	100	21	36	
	21	78	32	34	
	27	80	31	34	
Sondaggio S3	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	23	34	31	45
	7	18	32	29	37
	10	57	37	34	46
	12	a rifiuto			
	21	81	31	34	
	25	a rifiuto			
Sondaggio S4	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	17	32	30	41
	7	9	28	33	31
	10	27	35	31	48
	12.5	70	34	34	
	21	58	37	33	
	25	a rifiuto			
Sondaggio S5	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	a rifiuto			
	7	21	33	30	38
	10	a rifiuto			
	12	82	30	35	
	21	64	36	33	
	25	71	34	33	
Sondaggio S12	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	a rifiuto			
	7	37	37	32	45
	10	34	36	32	41
	12	19	32	35	34
	21	20	33	30	
	25.5	31	36		
Sondaggio S13	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	a rifiuto			
	7	54	37	34	48
	9	13	30	35	33
	12.5	47	37	33	43
	21	20	33	29	
	24	43	37	31	
Sondaggio S14	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	67	35	35	
	7	24	34	31	40
	10	50	37	33	45
	12	62	36	34	
	21	a rifiuto			
	25	17	32	28	

**Tabella 7.4.** Valori del modulo edometrico [MPa] per la sezione stratigrafica trasversale (Sezione D-D').

	prof. da p.c. [m]	NSPT	Farrent	Menzenbach e Malcev	Mitchell e Gardner
Sondaggio S1	3	32	23	42	41
	7	17	12	24	27
	10	24	17	32	34
	12	a rifiuto			
	21	78	55	96	
	24	90	64	110	
Sondaggio S2	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	4	2.8	8.8	12
	7	57	41	71	
	10	a rifiuto			
	12	100	71	122	
	21	78	55	96	
	27	80	57	99	
Sondaggio S3	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	23	16	31	33
	7	18	13	25	28
	10	57	41	71	
	12	a rifiuto			
	21	81	58	100	
	25	a rifiuto			
Sondaggio S4	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	17	12	24	27
	7	9	6.4	15	18
	10	27	19	36	36
	12.5	70	50	87	
	21	58	41	73	
	25	a rifiuto			
Sondaggio S5	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	a rifiuto			
	7	21	15	29	31
	10	a rifiuto			
	12	82	58	101	
	21	64	45	80	
	25	71	50	88	
Sondaggio S12	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	a rifiuto			
	7	37	26	48	44
	10	34	24	44	43
	12	19	14	26	29
	21	20	14	28	30
	25.5	31	22	41	40
Sondaggio S13	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	a rifiuto			
	7	54	38	68	
	9	13	9	19	23
	12.5	47	33	59	53
	21	20	14	28	30
	24	43	31	55	50
Sondaggio S14	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	67	48	83	
	7	24	17	32	34
	10	50	36	63	56
	12	62	44	77	
	21	a rifiuto			
	25	17	12	24	27

SEZIONE LONGITUDINALE

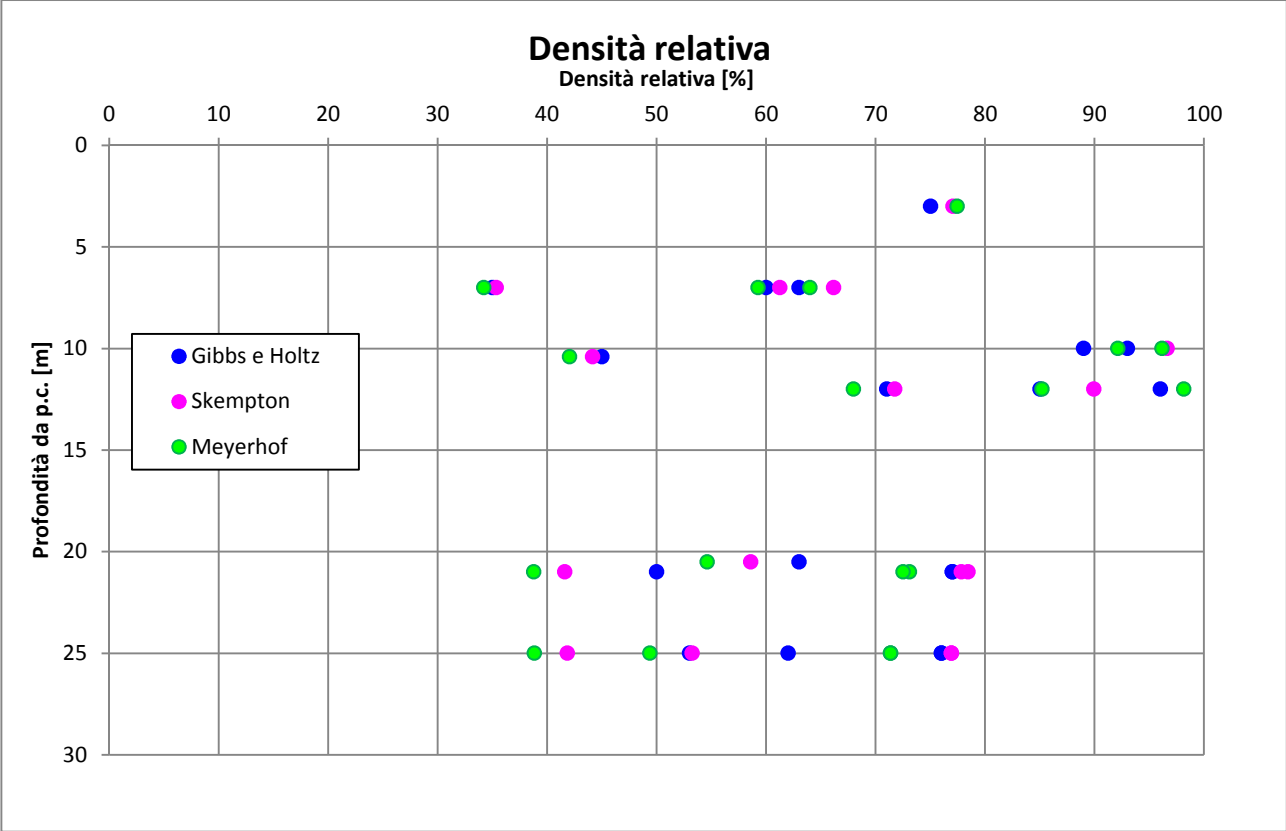


Grafico 7.4. Valori di densità relativa [%] in funzione del numero di colpi  $N_{SPT}$  alle diverse profondità per la sezione longitudinale.

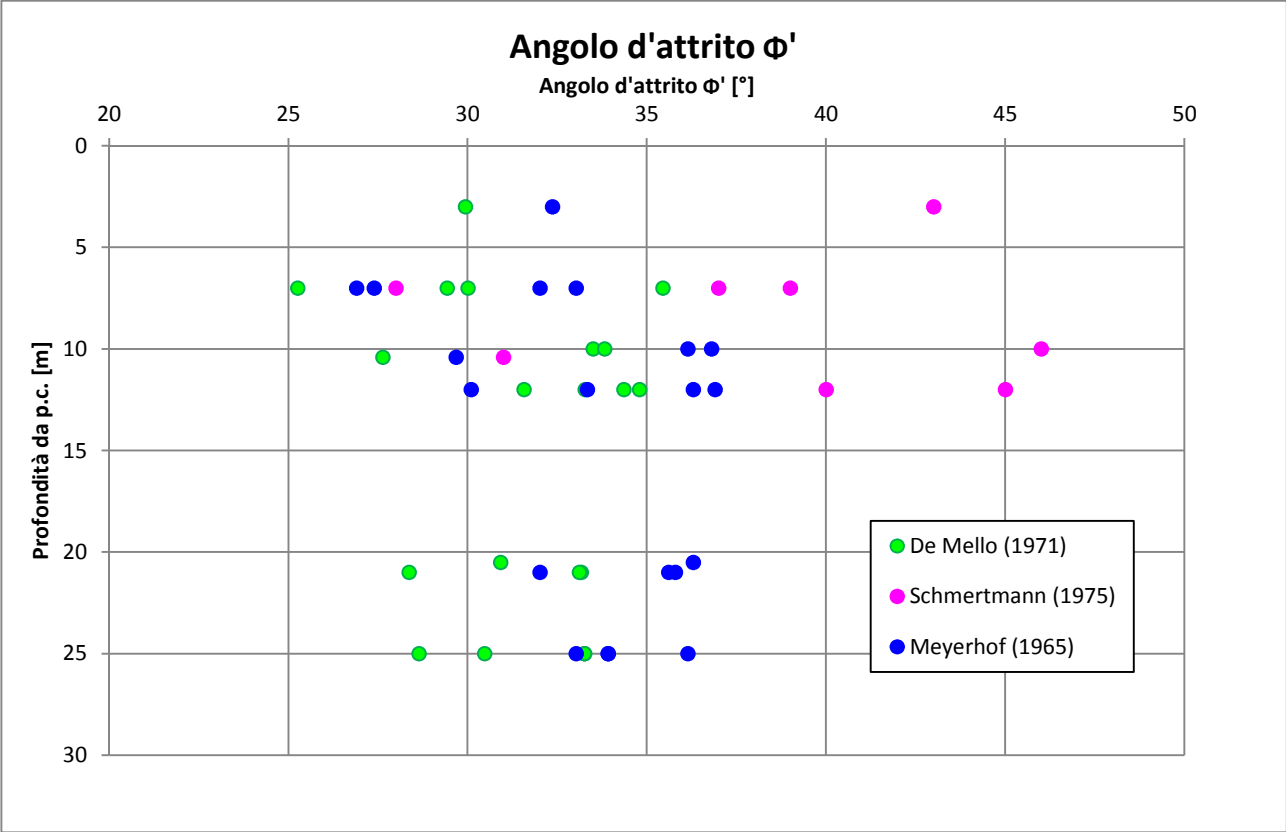
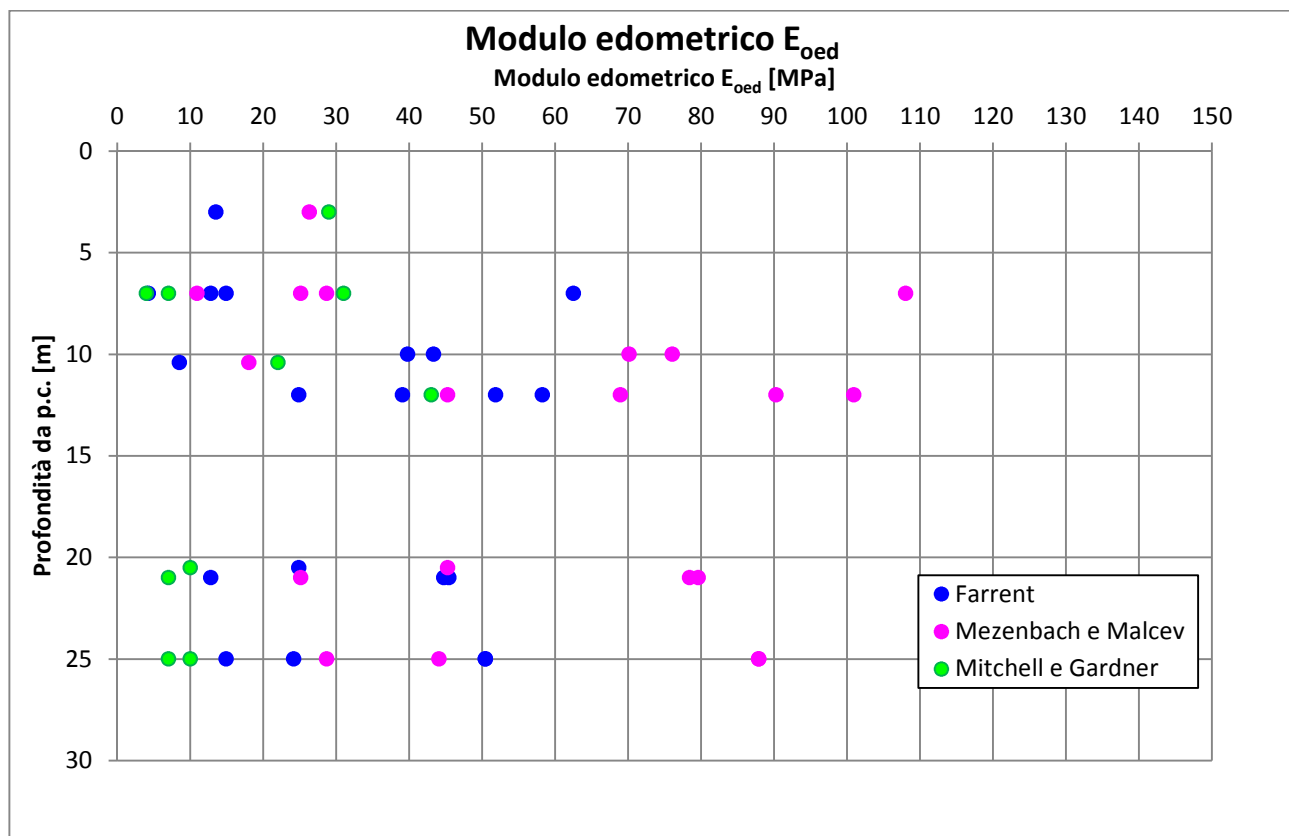


Grafico 7.5. Valori dell'angolo d'attrito in funzione del numero di colpi  $N_{SPT}$  alle diverse profondità per la sezione longitudinale.



**Grafico 7.6.** Valori del modulo edometrico in funzione del numero di colpi NSPT alle diverse profondità per la sezione longitudinale.

**Tabella 7.5.** Valori della densità relativa [%] per la sezione stratigrafica longitudinale (Sezione A-A').

	prof. da p.c. [m]	NSPT	Gibbs e Holtz (1957)	Skempton (1986)	Meyerhof (1957)
Sondaggio S5	3	a rifiuto			
	7	21	63	66	64
	10	a rifiuto			
	12	82			
	21	64	77	78	73
	25	71	76	77	71
Sondaggio S6	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	a rifiuto			
	7	88		135	131
	10.4	12	45	44	42
	12	35	71	72	68
	21	63	77	78	73
Sondaggio S7	25	71	76	77	71
	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	19	75	77	77
	7	6	35	35	34
	10	56	89	97	92
	12	73	96	104	98
Sondaggio S8	21	18	50	42	39
	25	34	62	53	49
	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	a rifiuto			
	7	18	60	61	59
	10	61	93	101	96
	12	55	85	90	85
	20.5	35	63	59	55
	25	21	53	42	39



**Tabella 7.6.** Valori dell'angolo d'attrito [°] per la sezione stratigrafica longitudinale (Sezione A-A').

	prof. da p.c. [m]	NSPT	Meyerhof (1965)	De mello (1971)	Schmertmann (1975)
Sondaggio S5	3	a rifiuto			
	7	21	33	30	39
	10	a rifiuto			
	12	82	30	35	
	21	64	36	33	
	25	71	34	33	
Sondaggio S6	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	a rifiuto			
	7	88	27	35	
	10.4	12	30	28	31
	12	35	36	32	40
	21	63	36	33	
	25	71	34	33	
Sondaggio S7	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	19	32	30	43
	7	6	27	25	28
	10	56	37	34	46
	12	73	33	34	
	21	18	32	28	
	25	34	36	30	
Sondaggio S8	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	a rifiuto			
	7	18	32	29	37
	10	61	36	34	
	12	55	37	33	45
	20.5	35	36	31	
	25	21	33	29	

**Tabella 7.7.** Valori del modulo edometrico [MPa] per la sezione stratigrafica longitudinale (Sezione A-A').

Sondaggio S5	prof. da p.c. [m]	NSPT	Farrent	Menzenbach e Malcev	Mitchell e Gardner
	3	a rifiuto			
	7	21	15	29	31
	10	a rifiuto			
	12	82	58	101	
	21	64	45	80	
	25	71	50	88	
Sondaggio S6	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	a rifiuto			
	7	88	63	108	
	10.4	12	9	18	22
	12	35	25	45	43
	21	63	45	78	
	25	71	50	88	
Sondaggio S7	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	19	14	26	29
	7	6	4	11	4
	10	56	40	70	
	12	73	52	90	
	21	18	13	25	7
	25	34	24	44	10
Sondaggio S8	prof. da p.c. [m]	NSPT			
	3	a rifiuto			
	7	18	13	25	7
	10	61	43	76	
	12	55	39	69	
	20.5	35	25	45	10
	25	21	15	29	7

## 8. PROVE DI LABORATORIO

### 8.1 TIPOLOGIA DI PROVE ESEGUITE

Nella vengono riportati i campioni di laboratorio analizzati e la tipologia di prove eseguite.

**Tabella 8.1.** Tipologia di prove eseguite in laboratorio.

Sondaggio	Campione	Profondità di prelievo [m]	Tipologia di campione	Prove di caratterizzazione	Prova edometrica	Prova di taglio diretto
S1bis	C1	5.40 - 5.90	Indisturbato	x	x	x *
S1bis	C2	6.50 - 7.00	Indisturbato	x		x *
S1	C1	33.60 - 34.00	Indisturbato	x		
S1	C2	5.00 - 5.50	Rimaneggiato	x		
S1	C3	14.50 - 15.00	Rimaneggiato	x		
S1	C4	19.60 - 20.00	Rimaneggiato	x		
S1	C5	22.00 - 22.50	Rimaneggiato	x		
S2	C1	30.40 - 31.00	Indisturbato	x	x	x *
S2	C2	9.70 - 10.00	Rimaneggiato	x		
S2	C3	13.70 - 14.00	Rimaneggiato	x		
S2	C4	18.00 - 18.30	Rimaneggiato	x		
S2	C5	24.50 - 25.00	Rimaneggiato	x		
S3	C1	17.80 - 18.40	Indisturbato	x	x	
S3	C2	32.80 - 33.00	Rimaneggiato	x		
S3	C3	5.00 - 5.50	Rimaneggiato	x		
S3	C4	12.50 - 12.80	Rimaneggiato	x		
S4	C1	32.50 - 33.00	Indisturbato	x	x	
S4	C2	9.00 - 9.50	Rimaneggiato	x		
S4	C3	17.30 - 17.70	Rimaneggiato	x		
S4	C4	21.50 - 22.00	Rimaneggiato	x		
S4	C5	29.50 - 30.00	Rimaneggiato	x		
S7	C1	6.00 - 6.60	Indisturbato	x	x	x
S7	C2	15.00 - 15.60	Indisturbato	x	x	x
S7	C3	20.40 - 21.00	Indisturbato	x	x	
S8	C1	16.80 - 17.40	Indisturbato	x	x	
S13	C1	8.40 - 9.00	Indisturbato	x	x	x
S13	C2	23.00 - 23.50	Indisturbato	x	x	
S14	C1	8.20 - 8.70	Indisturbato	x		
S14	C2	23.30 - 23.90	Indisturbato	x	x	
S15	C1	2.00 - 3.00	Rimaneggiato	x		
S16	C1	13.00 - 13.50	Indisturbato	x	x	x
S16	C2	23.00 - 23.50	Indisturbato	x	x	
S16	C3	2.00 - 3.00	Rimaneggiato	x		
S17	C1	5.00 - 5.60	Indisturbato	x	x	
S18	C1	5.00 - 5.60	Indisturbato	x		

x \*: la prova è stata eseguita su un campione ricostituito.

### 8.2 PARAMETRI INDAGATI E METODI DI INTERPRETAZIONE

Le prove di caratterizzazione eseguite sono di seguito riportate:

- analisi granulometrica;
- determinazione della massa volumica dei grani solidi;
- determinazione dei limiti di Atterberg.

Le prove meccaniche realizzate sono di seguito riportate:

- prova edometrica ad incrementi di carico;
- prova di taglio diretto.

Queste prove hanno permesso di valutare le seguenti caratteristiche e i seguenti parametri:

- composizione granulometrica dei diversi campioni;
- valori dell'indice di plasticità ( $I_p$ ) e del limite dello stato liquido ( $w_L$ ) espressi in percentuale [%];
- valore della massa volumica dei granuli solidi  $\rho_s$  [ $\text{Mg/m}^3$ ];
- variazione dell'indice dei vuoti  $e$  [-] e del modulo edometrico  $E_{\text{oed}}$  [kPa] in funzione della variazione del carico verticale agente sul provino;
- valori dell'angolo d'attrito [ $^\circ$ ] e della coesione apparente [kPa].

Le normative alle quali si è fatto riferimento per l'esecuzione delle prove sopra riportate e per l'elaborazione dei dati di prova sono di seguito riportate:

- Analisi granulometrica di una terra – Raccomandazioni sulle prove geotecniche di laboratorio (A.G.I., 1994);
- Determinazione della massa volumica dei granuli solidi - Metodo del picnometro - UNI CEN ISO/TS 17892-3:2005;
- Determinazione dei limiti di consistenza (o di Atterberg) di una terra – CNR UNI 10014 (1964);
- Classifiche geotecniche – Raccomandazioni per l'esecuzione e la interpretazione delle indagini geotecniche (A.G.I., 1977);
- Prova edometrica ad incremento di carico – UNI CEN ISO/TS 17892-5:2004;
- Prove di taglio diretto – UNI CEN ISO/TS 17892-10: 2005.

### 8.3 RISULTATI DELL'INTERPRETAZIONE

I risultati delle prove di laboratorio verranno riportati in seguito. Essi verranno associati a ciascun orizzonte e commentati nei successivi paragrafi.

## 9. DESCRIZIONE DEGLI ORIZZONTI STRATIGRAFICI

Gli orizzonti stratigrafici complessivamente individuati nelle sezioni rappresentate sono 9.

Nei successivi paragrafi verranno descritti i singoli orizzonti con riferimento ai risultati delle prove in sito e delle prove di laboratorio. I risultati delle prove in sito verranno richiamati poiché già esposti nei precedenti paragrafi.

I risultati delle prove di laboratorio verranno associati a ciascun orizzonte.

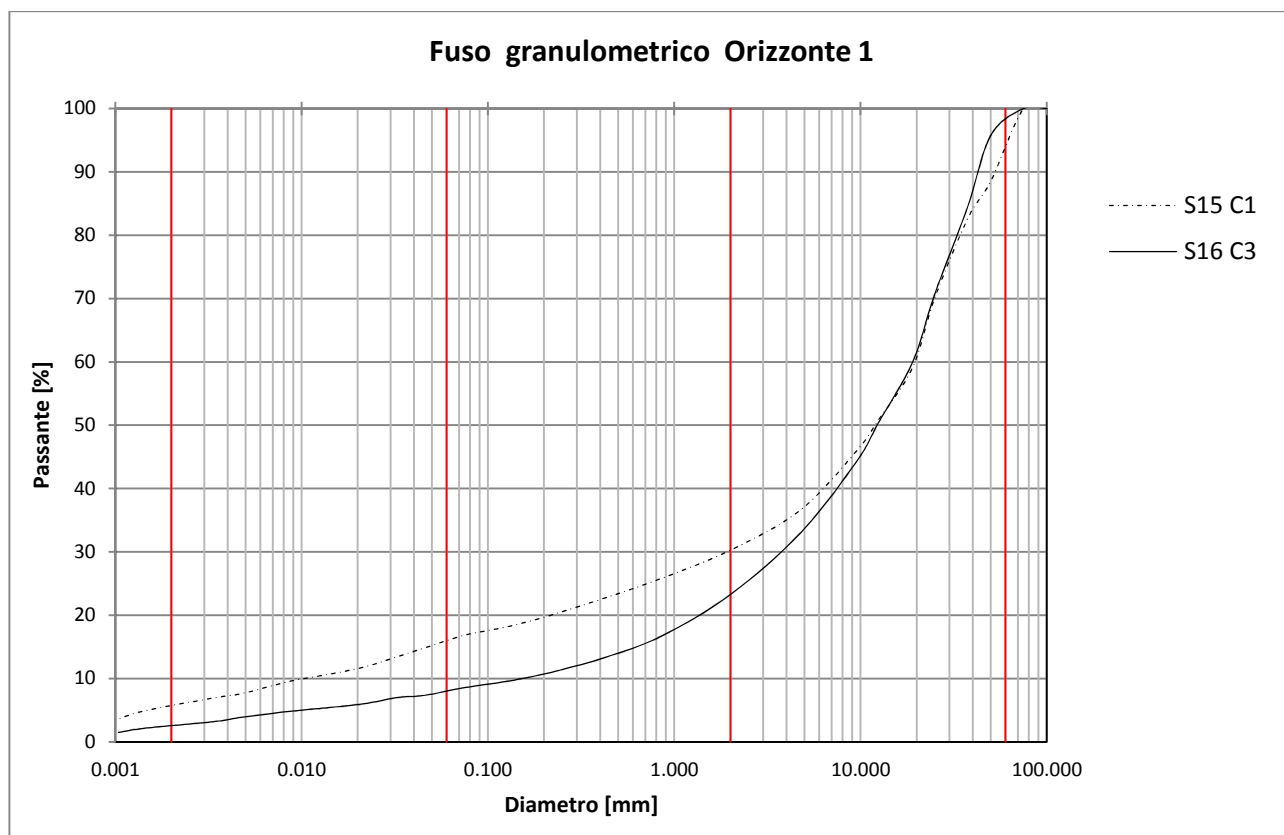
Per ciascun orizzonte verrà fornita una descrizione che ne mette in evidenza le caratteristiche fisiche e le proprietà meccaniche del litotipo presente.

### 9.1 ORIZZONTE 1

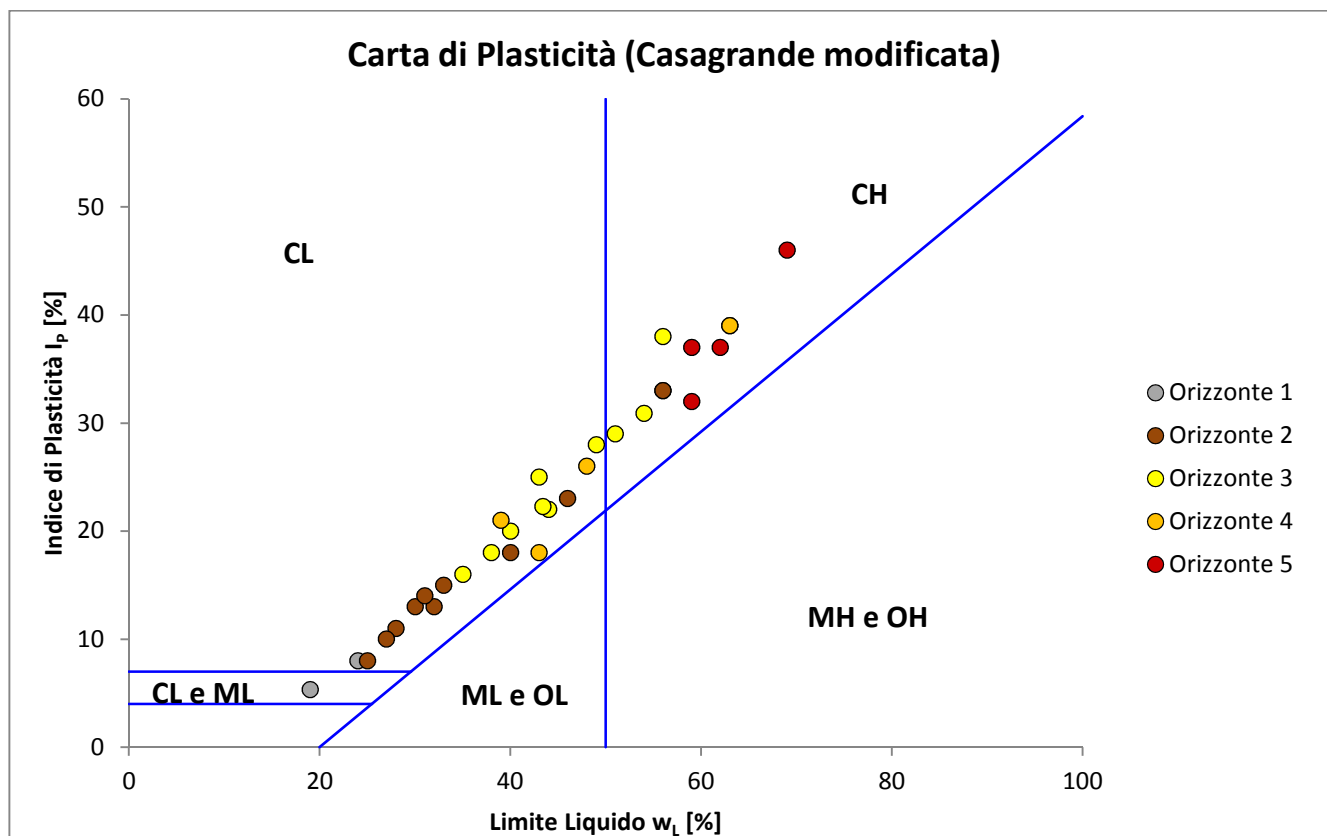
L'Orizzonte 1 è caratterizzato da ghiaie sabbiose di colore grigio (Grafico 9.1). Si tratta di materiali costituenti l'alveo del Torrente Baganza. Lo spessore di questo strato varia da circa 2.5 m a 7 m.

La frazione di materiale fine è molto ridotta e anche i corrispondenti valori dell'indice di plasticità sono molto bassi.

Le prove SPT eseguite in questo orizzonte riportano quasi tutte la dicitura “rifiuto”, per cui non è stato possibile portare a termine lo step di prova secondo quanto previsto dalle procedure.



**Grafico 9.1.** Distribuzione granulometrica dei materiali prelevati dall'Orizzonte 1.



**Grafico 9.2.** Carta di plasticità di Casagrande – valori di indice di plasticità e limite liquido per i principali orizzonti.

## 9.2 ORIZZONTE 2

L'Orizzonte 2 è caratterizzato da un materiale prevalentemente ghiaioso, come mostrato nel Grafico 9.3, contenuto in una matrice di materiale fine presente in percentuale variabile da scarsa ad abbondante. Inoltre, dalle curve granulometriche sotto riportate è possibile riconoscere anche la presenza di lenti di materiale fine di ridotto spessore distribuite all'interno del materiale prevalente. In particolar modo, le tre curve più alte rappresentano materiali a prevalente componente fine. Si tratta tuttavia di piccole lenti che spesso non vengono nemmeno registrate sulle stratigrafie.

L'Orizzonte 2 ha spessori variabili tra 7 m (nella zona di monte della cassa – arginatura in sponda sinistra) e 23 m.

I valori di indice di plasticità e limite liquido (Grafico 9.2) individuano una matrice fine a comportamento poco plastico (classe CL – argille inorganiche di bassa plasticità).

Le prove SPT sono state eseguite prevalentemente in questo strato. Le caratteristiche di eterogeneità dello strato in questione sono messe in evidenza dalle distribuzioni granulometriche del Grafico 9.3. Pertanto le informazioni ricavate dall'elaborazione dei dati derivanti da queste prove vanno opportunamente utilizzate.

I grafici delle densità relative (Grafico 7.1 e Grafico 7.4) mostrano una grande variabilità nella stima di questo parametro. I valori in questione variano dal 35% al 100%, con una maggiore concentrazione nell'intervallo 60÷95%.

Secondo la classificazione di Terzaghi e Peck (1948) si parla pertanto di materiali da mediamente a molto densi.

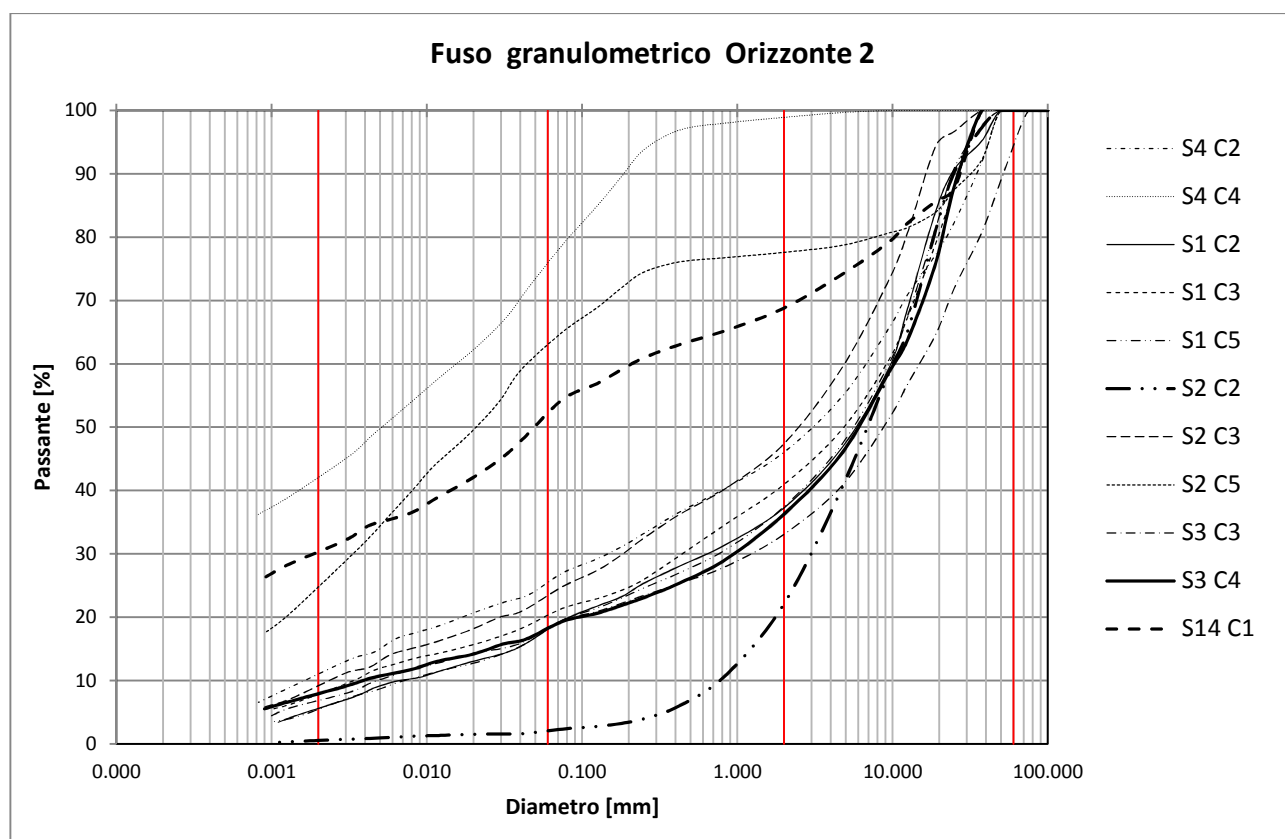
I valori più bassi di densità relativa possono essere attribuibili alle piccoli lenti di materiale più fine che sono state individuate anche attraverso le analisi granulometriche.

I valori dell'angolo d'attrito (Grafico 7.2 e Grafico 7.5) appaiono concentrati nell'intervallo  $27^{\circ}\div 37^{\circ}$ . L'interpretazione secondo Schmertmann (1975) non appare in linea con quelle di De Mello (1971) e Meyerhof (1965). Essa sembra sovrastimare i valori dell'angolo d'attrito.

Anche i valori del modulo edometrico (Grafico 7.3 e Grafico 7.6) appaiono dispersi. Si può affermare che essi sono maggiormente concentrati nell'intervallo  $10\div 60$  MPa, ma si tratta comunque di un intervallo molto ampio.

Si ritiene dunque che i risultati delle prove SPT non siano particolarmente attendibili data l'estrema eterogeneità del materiale e, di conseguenza, la notevole differenza rispetto alle condizioni ideali di applicazione della prova.

I dati forniti devono essere considerati come un'indicazione approssimativa dei valori dei parametri indagati.



**Grafico 9.3.** Distribuzione granulometrica dei materiali prelevati dall'Orizzonte 2.

### 9.3 ORIZZONTE 3

L'Orizzonte 3 è costituito da materiali fini, definibili come limi e argille e limi argillosi (Grafico 9.4). Questo orizzonte ha spessori variabili dai 6 ai 16 m.

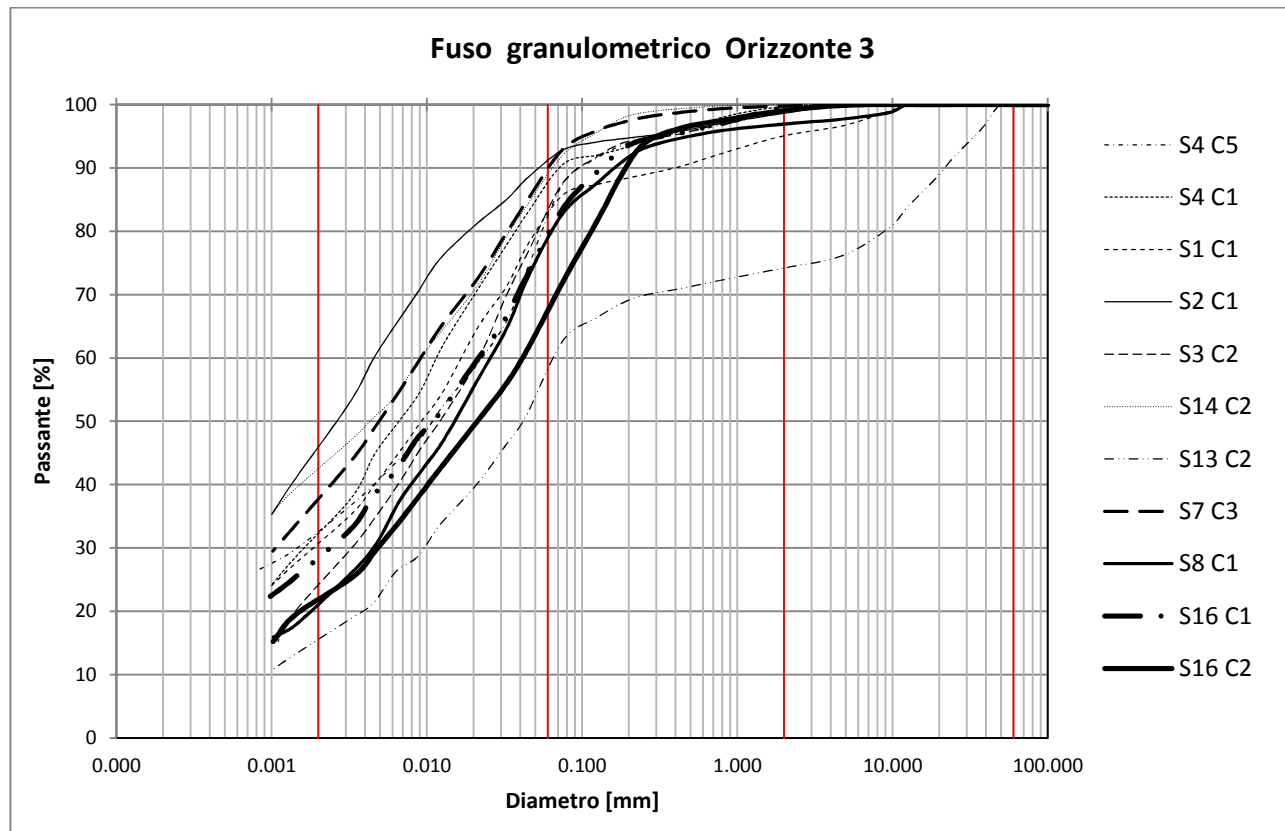
Questi materiali hanno valori dell'indice di plasticità e del limite liquido variabili (Grafico 9.2), per cui è possibile distinguere sia argille di bassa plasticità (CL) che argille di elevata plasticità (CH).

Le prove SPT eseguite in questo orizzonte sono poche, ma i valori che ne derivano sono meno dispersi rispetto a quello dell'Orizzonte 2.

In particolar modo, per quanto riguarda la densità relativa (Tabella 7.2 e Tabella 7.5) si osservano valori compresi nell'intervallo 38÷63%, riconducibili a materiali mediamente addensati (classificazione di Terzaghi e Peck -1948).

I valori dell'angolo d'attrito (Tabella 7.3 e Tabella 7.6) risultano variabili nell'intervallo 28÷36°. Su questo materiale è stata eseguita una prova di taglio in scatola di Casagrande: la prova è stata eseguita sul campione indisturbato S16 C1 che non appare nelle sezioni allegate. Tuttavia l'orizzonte di appartenenza di questo campione è l'Orizzonte 3.

Dalla prova di taglio su campione indisturbato è stato individuato un valore dell'angolo d'attrito pari a 23° con una coesione di 25 kPa. È pertanto possibile che l'interpretazione dei risultati delle prove in sito tenda a sovrastimare i valori dell'angolo d'attrito.



**Grafico 9.4.** Distribuzione granulometrica dei materiali prelevati dall'Orizzonte 3.

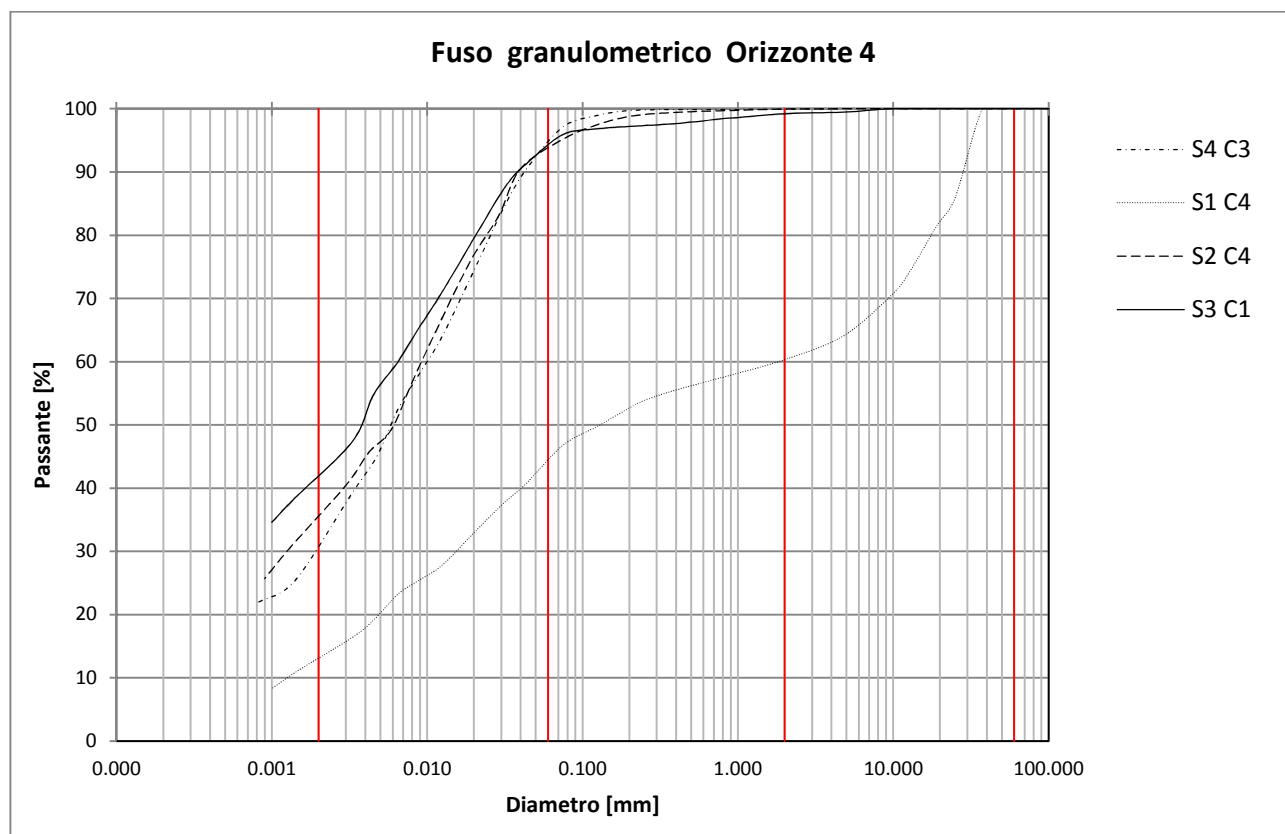


Per quanto riguarda i valori del modulo edometrico, l'interpretazione dei risultati delle prove SPT (Tabella 7.4 e Tabella 7.7) ha messo in evidenza un intervallo di variazione di tale parametro pari a  $7 \div 30$  MPa (non considerando i valori di 40 MPa, decisamente troppo elevati). Prove edometriche di laboratorio sono state eseguite su n.6 campioni indisturbati di materiale appartenente a tale orizzonte. I campioni in questione sono: S4 C1, S7 C3, S8 C1, S13 C2, S14 C2 e S16 C1. Le profondità di prelievo di tali campioni variano dai 13 ai 33 m dal p.c. I valori del modulo edometrico corrispondenti alle profondità di prelievo variano tra 7 e 19 MPa. Si ritiene pertanto che i risultati delle prove in sito tendano in parte a sovrastimare il valore del modulo edometrico. Il *range* di variazione più attendibile è quello suggerito dalle prove di laboratorio.

#### 9.4 ORIZZONTE 4

L'orizzonte 4 è costituito prevalentemente da materiali fini quali limi con argille e limi argillosi (Grafico 9.5). Questo orizzonte ha uno spessore ridotto, variabile da 0.9 a 2 m, e si sviluppa a profondità variabili da 17 a 20 m dal p.c. Il ridotto spessore di questo strato e la presenza di materiali ghiaiosi al contorno giustificano la presenza di un campione di materiale eterogeneo (S1 C4) in corrispondenza della zona in cui la lente di materiale fine appare più sottile.

I valori dell'indice di plasticità e del limite liquido identificano il materiale come un'argilla inorganica di bassa plasticità (Grafico 9.2).



**Grafico 9.5.** Distribuzione granulometrica dei materiali prelevati dall'Orizzonte 4.

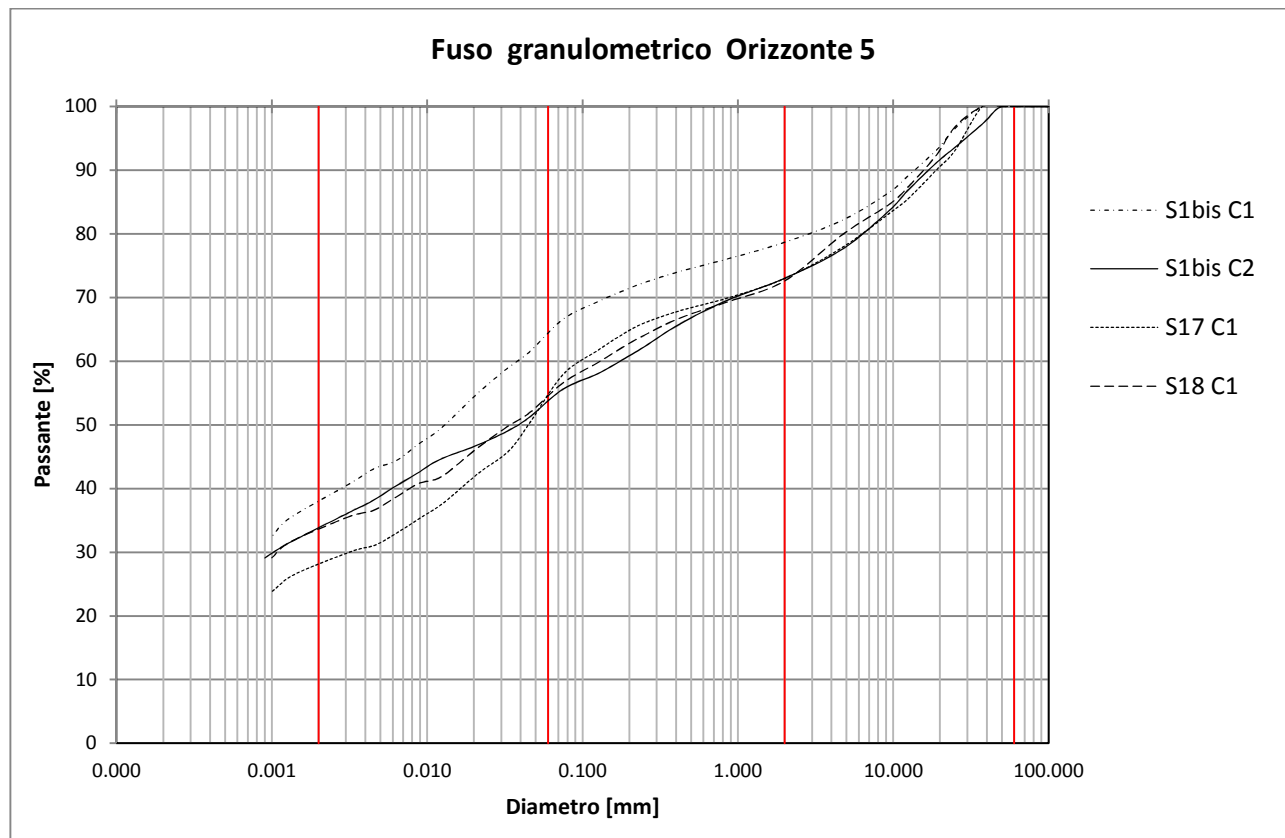
In questo orizzonte non sono state eseguite prove SPT. È stata eseguita una prova edometrica sul campione indisturbato S3 C1. A tale orizzonte è possibile associare un valore del modulo edometrico di circa 7 MPa, si tratta tuttavia di un valore puntuale poiché è stato prelevato un solo campione indisturbato.

## 9.5 ORIZZONTE 5

L'Orizzonte 5 è una lente di materiale eterogeneo caratterizzata da percentuali quasi uguali tra loro di materiali grossolani e materiali fini (Grafico 9.6). L'orizzonte in questione ha spessori variabili tra 1.5 e 2.5 m circa ed è situata ad una profondità di 6÷7 m dal p.c.. Si riconosce la presenza di questa lente nei sondaggi S1, S4, S1bis, S17 ed S18, mentre non viene individuata nel sondaggio S2.

Si ritiene pertanto che tale lente si estenda solo in parte nella porzione di terreno al di sotto del manufatto regolatore.

Per la caratterizzazione di tale orizzonte verranno prese in considerazione solo le informazioni derivanti dalle prove di laboratorio, dal momento che in tale strato è stata eseguita una sola prova SPT.



**Grafico 9.6.** Distribuzione granulometrica dei materiali prelevati dall'Orizzonte 5.

Due prove edometriche sono state eseguite su campioni indisturbati appartenenti a questo orizzonte (S1bis C1 e S17 C1). Le prove sono state eseguite su una porzione della matrice fine che caratterizza il materiale. Sono stati individuati valori del modulo edometrico alla profondità di riferimento pari a 7 MPa. I valori di cedimento totale al termine della prove (step di carico di 6400 kPa) si attestano attorno ai 4.5 mm.

I valori di indice di plasticità e di limite liquido mostrano un materiale con caratteristiche di elevata plasticità (Grafico 9.2).

Sui materiali dei campioni indisturbati S1bis C1 e S1bis C2 sono state eseguite prove di taglio diretto in scatola di Casagrande (campioni ricostituiti). Queste prove suggeriscono un valore dell'angolo d'attrito di 20° e 23°.

Vista l'elevata plasticità riscontrata per il materiale in questione e visti i valori di cedimento edometrico registrati durante le prove si suggerisce di prestare attenzione in fase progettuale alla presenza di questa lente.

L'estensione di questo orizzonte ad un'area limitata del terreno di fondazione del manufatto regolatore potrebbe indurre l'insorgere di cedimenti differenziali nell'opera stessa.

## 9.6 ORIZZONTE 6

L'Orizzonte 6 è caratterizzato da materiali fini, in particolare limi con argille di colore marrone chiaro (Grafico 9.7).

Questo orizzonte viene individuato solo nel sondaggio S13 ad una profondità di 8 m da p.c. e con uno spessore di 4 m. Secondo la carta di plasticità di Casagrande, si tratta di un'argilla inorganica di media-bassa plasticità.

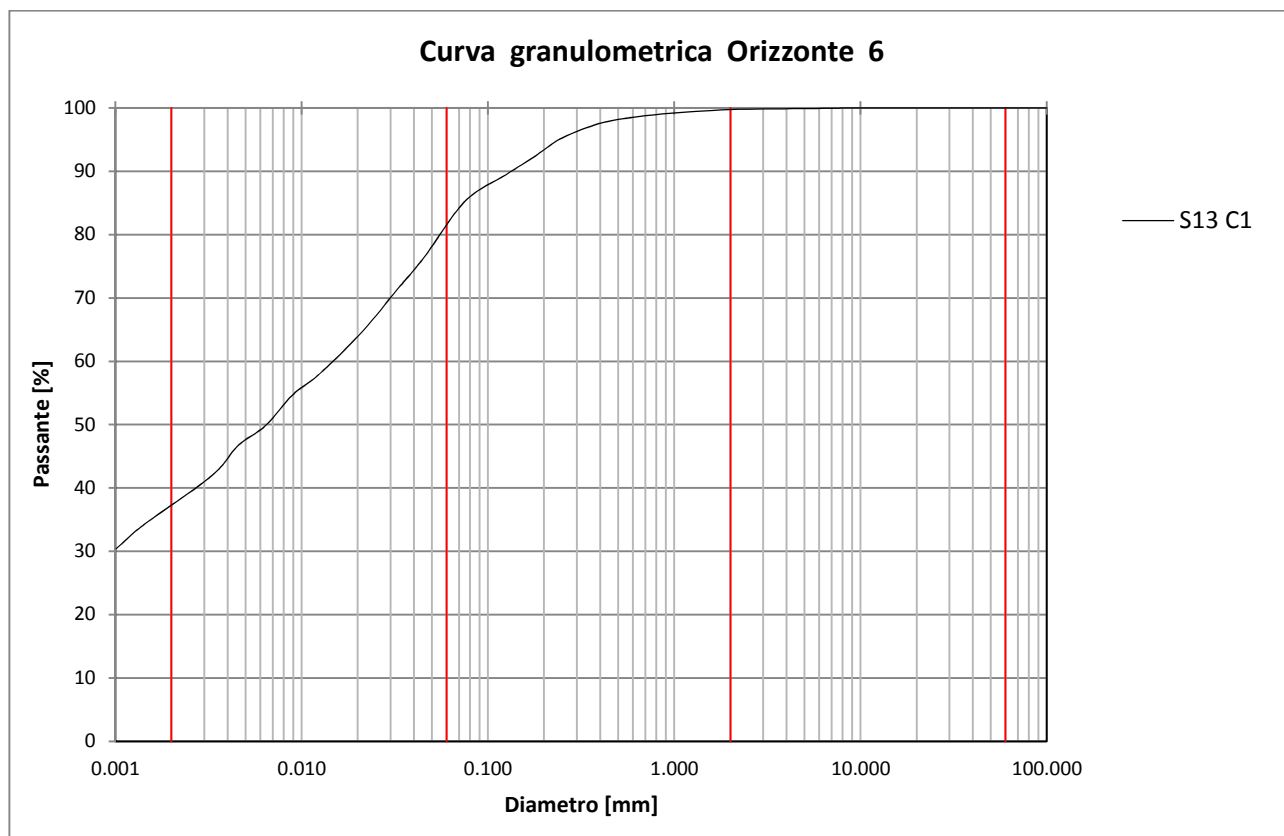
L'orizzonte analizzato è stato intercettato dalla prova penetrometrica dinamica DPSH 6 che individua un valore medio di resistenza alla punta per questo strato pari a 4 MPa. La prova edometrica di laboratorio eseguita sul campione indisturbato S13 C1 individua un valore del modulo edometrico pari circa 6 MPa.

La prova di taglio eseguita sul campione indisturbato individua un valore dell'angolo d'attrito di 17° ed un valore di coesione pari a circa 40 kPa.

Sulla base dei risultati ottenuti si associano al materiale scarse caratteristiche meccaniche.

I risultati dell'interpretazione della prova SPT eseguita in questo strato indicano un valore di densità relativa (Tabella 7.2) pari a circa il 48%, ovvero materiali mediamente addensati secondo la classificazione di Terzaghi e Peck (1948).

Il valore medio dell'angolo d'attrito (Tabella 7.3) risulta pari a 33° circa, mentre il valore medio del modulo edometrico è pari a 17 MPa (Tabella 7.4).



**Grafico 9.7.** Curva granulometrica del campione prelevato dall'Orizzonte 6.

Si ritiene che i risultati delle prove di laboratorio siano da considerarsi più attendibili rispetto all'interpretazione dei risultati delle prove SPT in sito.

#### 9.7 ORIZZONTE 7

L'Orizzonte 7 risulta definito come una ghiaia prevalentemente fine – media in abbondante matrice limosa di colore marrone – rossastro. Questo orizzonte viene individuato nei sondaggi S12 ed S13 con spessori compresi tra 4.5 e 6.5 m, ad una profondità di circa 25 m dal p.c.

Non si dispone di prove di laboratorio eseguite su questo specifico orizzonte, per cui la descrizione fornita è quella che deriva dalle stratigrafie dei sondaggi S12 ed S13. Una sola prova penetrometrica SPT ha intercettato questo orizzonte (sondaggio S13). I risultati dell'interpretazione dei dati derivanti dalla prova in sito sono riportati in Tabella 7.2, Tabella 7.3 e Tabella 7.4.

Tuttavia, data la natura del materiale e data la scarsità delle informazioni a disposizione, si ritiene che l'attendibilità di queste ultime sia molto ridotta.

#### 9.8 ORIZZONTE 8

L'Orizzonte 8 è definito come una lente di materiale fine, nello specifico limo con argilla (Grafico

9.8).

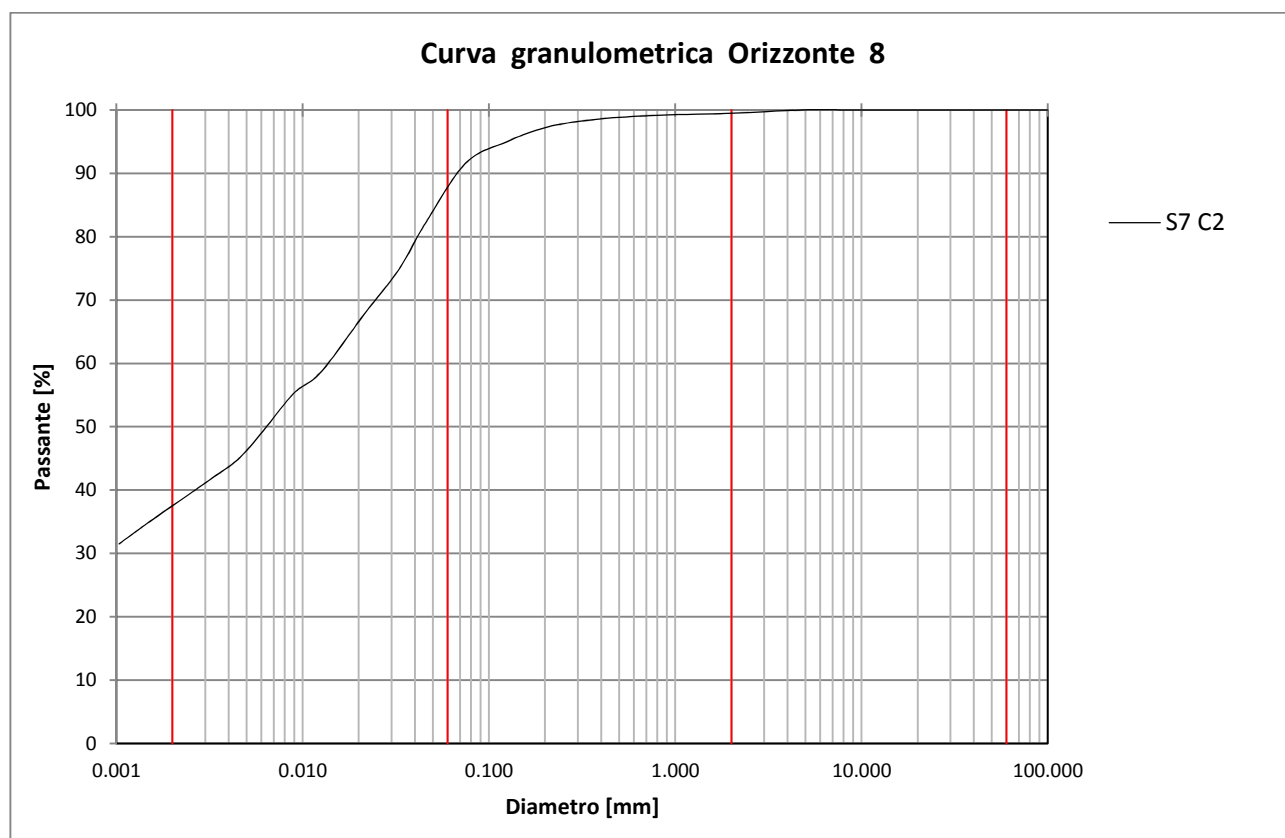
La lente in questione si riconosce nel sondaggio S7. Essa ha uno spessore massimo di 1 m e si trova a 15 m di profondità da p.c.

Analoghe lenti di materiale fine sono state rinvenute anche nel sondaggio S8 e nelle perforazioni a distruzione di nucleo Sd ed Se, sempre caratterizzate da ridotti spessori e analoghe profondità da p.c.

La distanza tra i singoli sondaggi utilizzati per ricostruire la sezione longitudinale e il ridotto spessore di ciascuna lente non permette di poter considerare queste stesse lenti come orizzonti continui (e.g. lenti S8 – Se e lenti S7 – Sd).

Pur non essendo riconducibili ad un unico orizzonte continuo, queste lenti sono state raggruppate sotto il nome di Orizzonte 8, poiché tutte caratterizzate da materiali fini secondo quanto indicato nelle stratigrafie.

Le uniche informazioni relative a queste lenti riguardano le prove di laboratorio eseguite sul campione indisturbato S7 C2.



**Grafico 9.8.** Curva granulometrica del materiale prelevato dall'Orizzonte 8.

Il campione S7 C2, classificabile come un'argilla inorganica di alta plasticità (cfr. certificato n.3687 del 20.01.2014), è stato sottoposto a prova edometrica e a prova di taglio diretto in scatola di Casagrande.

La prova edometrica a gradini di carico ha restituito un valore del modulo edometrico in

corrispondenza della profondità di riferimento pari a circa 9 MPa, mentre la prova di taglio diretto ha restituito un valore dell'angolo d'attrito pari a 24°.

## 9.9 ORIZZONTE 9

L'Orizzonte 9 è caratterizzato da una lente di materiale fine riconoscibile in corrispondenza del sondaggio S7. Questa lente è costituita limo con argilla (Grafico 9.9) di media – bassa plasticità (secondo la carta di plasticità di Casagrande) di colore marrone con striature rossastre e nere. Il suo spessore in corrispondenza del sondaggio S7 è pari a 3.5 m ed è collocata ad una profondità di 5.5 m da p.c.

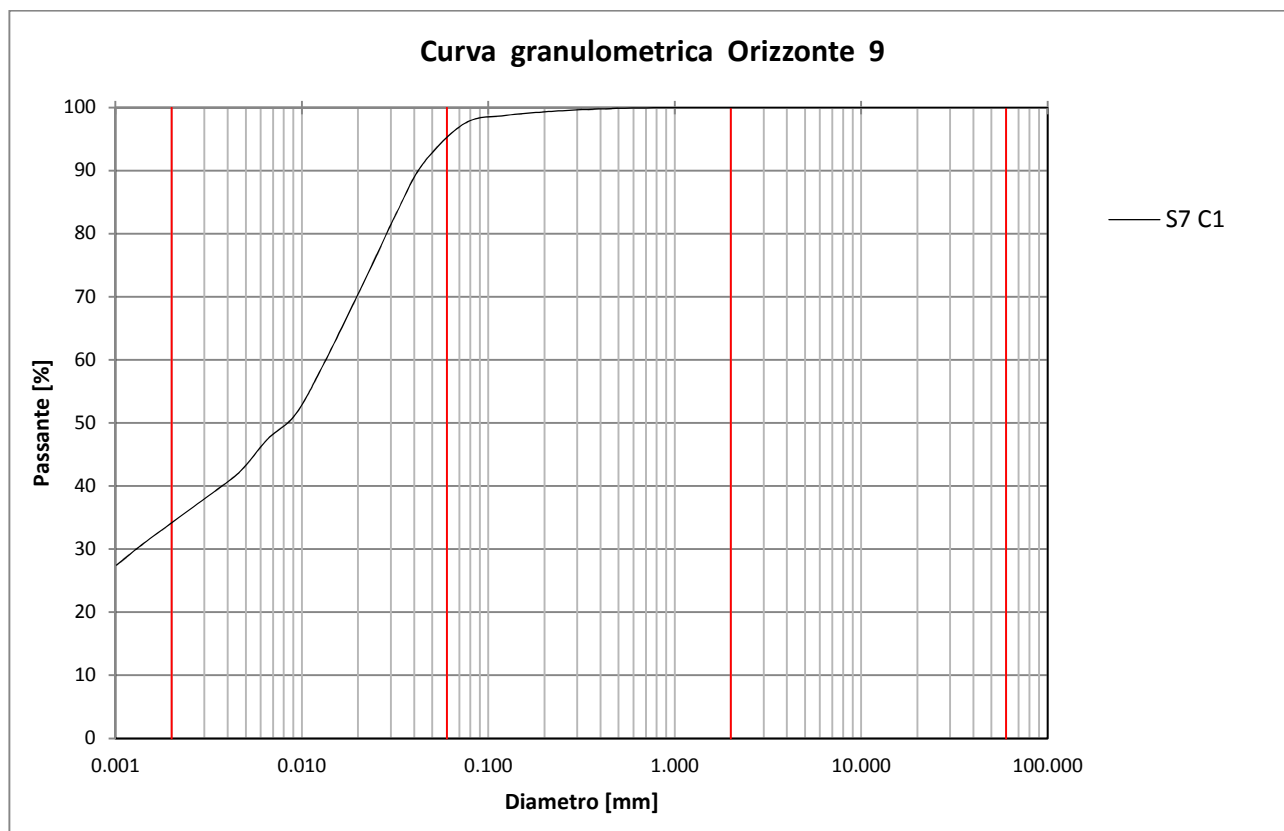
Questo orizzonte è stato indagato sia attraverso una prova SPT che attraverso prove di laboratorio (prova edometrica e prova di taglio diretto in scatola di Casagrande).

Il modulo edometrico individuato tramite la prova edometrica di laboratorio è pari a circa 4 MPa, confermato anche dai valori derivanti dalle elaborazioni dei risultati di prove in sito (Tabella 7.7). Nella prova di laboratorio i valori di cedimento totale ottenuti con step di carico fino a 3200 kPa raggiungono quasi i 4.5 mm, ovvero un valore non trascurabile in vista della realizzazione delle arginature in sponda sinistra della cassa d'espansione.

I valori di densità relativa ricavati dai risultati della prova SPT sono risultati pari a circa il 35% (Tabella 7.5). Secondo la classificazione di Terzaghi e Peck (1948) un materiale con tali caratteristiche è da considerarsi al limite tra sciolto e mediamente addensato.

Per quanto riguarda i valori di resistenza a taglio si è ottenuto un angolo d'attrito pari a 25° attraverso la prova di taglio diretto in laboratorio, risultato sostanzialmente confermato dalle elaborazioni derivanti dai risultati della prova SPT (Tabella 7.6) che mostrano un valore medio dell'angolo d'attrito pari a 27°.

L'estensione di questa lente non può essere definita in modo corretto poiché essa viene rinvenuta nella sola stratigrafia del sondaggio S7. Tuttavia si suppone che tale lente possa avere un raggio di estensione anche importante dal momento che essa determina la formazione di una falda sospesa (come si vede dalla stratigrafia del sondaggio S7). Inoltre il medesimo tipo di materiale (limo argilloso di colore marrone rossastro) è stato individuato anche in corrispondenza del pozzetto esplorativo PS 5, situato a circa 80 m di distanza in pianta da S7 e ad una profondità di 3.5 m circa da p.c. Il pozzetto esplorativo si trova ad una quota assoluta di circa 3 m inferiore rispetto alla quota di S7, pertanto la quota assoluta dello strato indagato è sostanzialmente identica nel sondaggio S7 e nel pozzetto esplorativo PS 5.



**Grafico 9.9.** Curva granulometrica del materiale prelevato dall'Orizzonte 9.

Data l'elevata deformabilità di questo strato confermata sia da prove in sito che in laboratorio, si suggerisce di prestare attenzione alla presenza di questo strato durante la fase progettuale al fine di evitare problemi di cedimento differenziale per le arginature in sponda sinistra durante la fase di esecuzione dei lavori e durante la fase di esercizio dell'opera stessa.

#### 9.10 ORIZZONTE 10

L'Orizzonte 10 appare caratterizzato da una lente di materiale fine simile a quello riscontrato per l'Orizzonte 4. Questa lente non è stata oggetto di specifiche prove di laboratorio e dunque è definita soltanto per confronto visivo. La sua limitata estensione fa sì che essa si configuri come elemento poco significativo nell'esame complessivo del problema dal punto di vista geotecnico.

Il Responsabile della Convenzione  
Prof. Ing. Andrea Segalini