

PROGETTO PRELIMINARE

INDICE

1. PREMESSA	3
2. RELAZIONE GEOLOGICA.....	4
2.1 INTRODUZIONE	4
2.2 INQUADRAMENTO GEOLOGICO.....	5
2.2.1 <i>Stratigrafia generale</i>	6
2.2.2 <i>Alloformazione emiliano romagnola superiore (AES)</i>	8
2.3 GEOMORFOLOGIA	11
2.3.1 <i>La pianura pedemontana</i>	12
2.3.2 <i>Il Torrente Baganza</i>	13
3. RELAZIONE GEOTECNICA.....	15
3.1 INTRODUZIONE	15
3.2 PROVE GEOTECNICHE	18
3.2.1 <i>Prove geotecniche previste da convenzione</i>	18
3.2.2 <i>Prove geotecniche svolte</i>	19
3.2.3 <i>Riferimenti normativi e prove certificate</i>	21
3.2.4 <i>Sintesi dei risultati</i>	22
3.3 PROVE IN SITO.....	24
3.3.1 <i>Tipologia di indagini e prove eseguite</i>	24
3.3.2 <i>Parametri indagati e metodi di interpretazione</i>	25
3.3.3 <i>Risultati dell'interpretazione</i>	27
3.4 PROVE DI LABORATORIO.....	37
3.4.1 <i>Tipologie di prove eseguite</i>	37
3.4.2 <i>Parametri indagati e metodi di interpretazione</i>	38
3.4.3 <i>Risultati dell'interpretazione</i>	39
3.5 DESCRIZIONE DEGLI ORIZZONTI STRATIGRAFICI	39
3.5.1 <i>Orizzonte 1</i>	40
3.5.2 <i>Orizzonte 2</i>	41
3.5.3 <i>Orizzonte 3</i>	43
3.5.4 <i>Orizzonte 4</i>	45
3.5.5 <i>Orizzonte 5</i>	46
3.5.6 <i>Orizzonte 6</i>	48
3.5.7 <i>Orizzonte 7</i>	49
3.5.8 <i>Orizzonte 8</i>	50
3.5.9 <i>Orizzonte 9</i>	51
3.5.10 <i>Orizzonte 10</i>	53

3.6	SISTEMA DI CONTROLLO E MONITORAGGIO	53
3.7	VERIFICHE DI STABILITÀ PRELIMINARI	62

1. PREMESSA

Il presente progetto preliminare ha come oggetto la realizzazione della “Cassa di espansione sul T. Baganza”, di cui tale relazione – in conformità con quanto previsto dal DPR 207/2010 – costituisce il contributo specialistico relativo agli aspetti geologici (cfr. Paragrafo 2) e geotecnici (cfr. Paragrafo 0).

Le due relazioni sono state redatte dal Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura (DICATeA) dell'Università degli Studi di Parma a completamento degli studi svolti nell'ambito della “*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*”(OPCM 3850/2010 – decreto n. 140/2010 “Piano degli Interventi Urgenti” della regione Emilia Romagna)” stipulata con l'AIPO, e nello specifico a cura del prof. ing. Andrea Segalini. La parte geologica è stata peraltro fatta propria dalla dott.ssa geol. Annamaria Belardi dell'AIPO.

2. RELAZIONE GEOLOGICA

2.1 Introduzione

La presente relazione geologica illustra l'assetto geologico delle aree interessate dal Progetto Preliminare della Cassa di Espansione del Torrente Baganza, derivando i dati generali da quanto riportato dalle Carte Geologiche regionali nonché, con un grado di maggior dettaglio, da quanto inserito nel Piano Strutturale Comunale del Comune di Sala Baganza del luglio 2010. Tali elementi di carattere generale sono ulteriormente supportati dai risultati delle campagne di indagini a più riprese svolte nell'ambito del presente studio e integralmente riportate in allegato alla Relazione Geotecnica. Una prima indagine preliminare è stata svolta attraverso la realizzazione di alcuni sondaggi geognostici nel luglio 2011, ad opera della ditta PARMAGEO S.r.l. Le tipologie di indagini sono quelle indicate in Tabella 1. Altre indagini, realizzate nell'estate 2012, constano di sondaggi a carotaggio continuo, pozzetti esplorativi, prove indirette di tipo penetrometrico e geofisico. Il sunto di tali indagini è riportato nella Tabella 2.

Tabella 1: Tipologia di indagini svolte nella campagna 2011.

Sondaggio S1		Sondaggio S2		Sondaggio S3	
Longitudine	1598852.5 E	Longitudine	1598624.3 E	Longitudine	1598393.8 E
Latitudine	4953862.6 N	Latitudine	4953580.7 N	Latitudine	4953290.2 N
Quota	133.93 m.s.l.m.	Quota	137.91 m.s.l.m.	Quota	141.76 m.s.l.m.

Tabella 2: Elenco indagini svolte nella campagna 2012 ad opera della ditta SOGEO s.r.l.

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

2.2 Inquadramento geologico

L'assetto fisico del territorio del Comune di Sala Baganza ha seguito le sorti della pianura padana e del fronte Appenninico settentrionale, nel corso della loro storia evolutiva.

Dal Cretaceo (circa 100 MA) fino ai giorni nostri la regione padana ed appenninica è stata soggetta ad alterne fasi di compressione e stasi tettoniche, instaurate dalle interazioni tra la placca africana e la placca euroasiatica e, più in dettaglio, dalla microplacca dell'Arco Appenninico Settentrionale e dalla microplacca Adriatica.

È a partire dall'Oligocene superiore che inizia la formazione della catena dell'Appennino settentrionale attraverso il meccanismo di sovrascorrimento della microplacca dell'Arco Appenninico Settentrionale a scapito della microplacca Adriatica e della sua copertura sedimentaria, che instaura un processo di deformazione continentale polifasica. In particolare, nell'ambito di tale processo, si possono riconoscere due stadi compressivi principali:

- primo stadio compressivo: si sviluppa dall'Oligocene superiore al Pliocene inferiore, durante il quale è definita la strutturazione dell'arco dell'Appennino Settentrionale (stadio collisionale) e, in zona antistante (avanfossa padana), la delimitazione del bacino perisuturale padano – adriatico (Bally e Snelson 1980); all'inizio del Pliocene tale bacino costituiva un grande golfo invaso dalle acque marine (propaggine occidentale del Mare Adriatico), limitato a nord dalle Alpi, a sud-ovest dagli Appennini e a nord-est dalle Dinaridi (Catena montuosa della Jugoslavia);
- secondo stadio compressivo: si sviluppa a partire dal Pliocene medio (circa 5,0 MA) in poi coinvolgendo anche il margine meridionale del bacino perisuturale padano nel processo di strutturazione della catena appenninica (in senso geografico dal margine appenninico settentrionale fino a circa l'asse del Fiume Po); il processo deformativo del margine meridionale del bacino perisuturale si sviluppa attraverso la formazione di sovrascorrimenti, faglie, duplicazioni e pieghe, in parte sepolte dalle coperture alluvionali quaternarie e in parte evidenti lungo il margine morfologico appenninico settentrionale.

Nell'epoca quaternaria, successivamente al pleistocene medio, la crescente estensione di terre emerse e soggette ad erosione consentì ai corsi d'acqua alpini ed appenninici di colmare di sedimenti il bacino padano conferendone l'attuale assetto e morfologia.

2.2.1 *Stratigrafia generale*

L'edificio Appenninico e padano, come già affermato, nasce in un contesto tettonico a stile compressivo nel quale le spinte orogenetiche attive dal terziario basso fino ai giorni nostri, quasi esclusivamente in ambiente sottomarino, hanno comportato un notevole raccorciamento crostale. Concettualmente il processo di struttu-

razione è sintetizzabile nella dislocazione e deformazione di potenti ammassi di rocce e terre, secondo un modello generale a falde di ricoprimento. Si tratta della sovrapposizione multipla (dall'inglese Thrusts) di sequenze sedimentarie ed ignee (in modo subordinato), staccatisi dal substrato oceanico di formazione e traslate e giustapposte verso nord est in rapporto all'azione delle spinte orogenetiche.

I depositi affioranti nell'area dei Comuni di Sala Baganza, Felino e Collecchio sono stati suddivisi dal Servizio Geologico Regionale in 3 Domini noti come:

- **Dominio Padano Adriatico:** si tratta di quella serie di unità cosiddette "Neoautoctoni", ovvero sedimentati posteriormente alle principali fasi orogenetiche dell'Appennino Settentrionale; hanno carattere regressivo, con sabbie e peliti torbiditiche alla base, seguite da un prisma sedimentario fluvio-deltizio, progrediente, ricoperto al tetto da depositi continentali; nei profili sismici si riconosce una sola direzione di progradazione nordest-vergente, originata dai sistemi deltizi ad alimentazione appenninica;
- **Dominio Successione Epiligure:** si tratta di unità pseudo-autoctone di mare profondo e poco profondo sedimentate nei bacini in corso di evoluzione durante le principali fasi orogenetiche dell'Appennino Settentrionale. In termini stratigrafici si collocano al tetto della catena appenninica ricoprendo le unità del Dominio Ligure. La loro sedimentazione e strutturazione tettonica è geneticamente legata alla rimobilizzazione delle unità liguri sulle quali giacciono;
- **Dominio Ligure:** rappresentano i sedimenti di fondo oceanico dell'estinto bacino della Tetide, depositati antecedentemente alla collisione della placca africana con la placca europea. Si tratta d'unità traslate ed intensamente deformate sopra le unità autoctone durante l'orogenesi appenninica. Si compongono di un Complesso di Base a composizione argillo-calcareo prevalente con inclusi potenti complessi ofiolitici (Complessi Ofiolitici di M. Aiona, M. Penna, M. Sillara, ecc.) e da una serie d'unità calareo-marnose (Unità Cassio, Unità Caio, Unità Solignano) e arenaceo-calcareo-pelitiche (Unità Dosso, Sporno, M. Gottero, M. Zatta).

In particolare, l'area di progetto della Cassa di Espansione (vedi Figura 1), si colloca nella porzione di pertinenza del Dominio Padano Adriatico le cui unità strati-

grafiche rientrano nella classe delle Sequenze Deposizionali sensu Mitchum et Al. (1977). Dal punto di vista gerarchico si distinguono 2 Sequenze Principali (Supersintemi, secondo la terminologia delle U.B.S.U.) denominate come segue:

- Supersintema del Quaternario Marino, costituito da depositi di ambiente marino;
- Supersintema Emiliano-Romagnolo, costituita da depositi di ambiente continentale.

Per scendere ulteriormente in dettaglio, il supersintema Emiliano-Romagnolo, che contiene le unità specifiche presenti nell'area di studio, può essere ulteriormente suddiviso in 2 sintemi principali (dal più antico al più recente):

- Sintema Emiliano Romagnolo inferiore (AEI) - (Pleistocene medio);
- Sintema Emiliano Romagnolo superiore (AES) - (Pleistocene medio - Olocene).

Tale supersintema, risulta essere costituito da terreni continentali alluvionali, depositi al di sopra di una superficie di discontinuità regionale. In particolare, sono presenti le formazioni descritte a seguire.

2.2.2 *Alloformazione emiliano romagnola superiore (AES)*

Unità alluvionale prevalentemente grossolana, di età Pleistocene medio - Olocene: è costituita nell'area in esame da depositi alluvionali intravallivi terrazzati. Il limite di tetto è rappresentato dalla superficie topografica, mentre il contatto di base è netto e discordante sull'Alloformazione Emiliano- Romagnola Inferiore e su tutte le altre unità. Nell'area in esame l'Alloformazione emiliano-romagnola superiore è rappresentata dagli allo membri di seguito descritti.

1. Allomembro di Ravenna AES8 (Pleistocene superiore - Olocene; post circa 20.000 anni B.P.). Lo spessore massimo dell'unità è di circa 20 metri. Il profilo di alterazione varia da qualche decina di cm fino ad 1 m ed è di tipo A/Bw/Bk(C). Il tetto dell'unità è rappresentato dalla superficie deposizionale, per gran parte relitta, corrispondente al piano topografico, mentre il contatto di base è discontinuo, spesso erosivo e discordante, sugli altri allomembri e sulle unità più antiche. Nelle zone di conoide alluvionale l'Allomembro di Ravenna è costituito da depositi prevalentemente ghiaiosi, strutturati in spessi corpi a geometria cuneiforme e organizzati in cicli elementari a base grossolana e tetto fine, mentre nelle zone d'interconoide è costituito principalmente da alluvioni sabbiose e

limo-argillose solcate localmente da canali di ghiaie. Nei bacini vallivi dell'area collinare l'Allomembro di Ravenna è costituito da ghiaie sabbiose, sabbie e limi stratificati con copertura discontinua di limi argillosi. Su base morfologica, archeologica e pedostratigrafica è distinto la parte più recente e superficiale dell'Allomembro di Ravenna con il nome di Unità di Modena:

- L'Unità di Modena AES8a (Olocene; post IV-VII sec. d.C.). Nelle zone di conoide alluvionale l'unità Modena caratterizza i depositi terrazzati più bassi, e quindi più recenti, che bordano i principali corsi d'acqua. E' costituita da una successione prevalentemente ghiaiosa, con intercalazioni sabbiose, a giacitura suborizzontale e geometria lenticolare ricoperte da una coltre limoso-argillosa discontinua. Lo spessore massimo dell'unità è di alcuni metri. Il profilo di alterazione è di esiguo spessore (poche decine di cm) e di tipo A/C, localmente A/Bw/C.

2. Allomembro di Agazzano (AES3) (Pleistocene medio). Nelle zone di conoide alluvionale e nei bacini intravallivi terrazzati la successione stratigrafica è costituita da ghiaie e ghiaie sabbioso-argillose prevalenti. Nelle zone d'interconoide la successione stratigrafica è costituita da sabbie e limi argillosi, con subordinati livelli di ghiaie, localmente stratificati. I depositi intravallivi sono generalmente costituiti da un intervallo basale con ghiaie prevalenti, sovrastato da un intervallo fine, limoso-argilloso. I depositi di conoide ghiaiosa, distali, invece, presentano comunemente un livello fine di spessore metrico alla base dell'unità. Spessore variabile da alcuni metri a 30 metri (nel sottosuolo della pianura). Nelle aree intravallive, in sinistra idraulica del Fiume Taro, si distinguono due depositi terrazzati separati da una scarpata erosiva di altezza decametrica. Il profilo di alterazione dell'unità è molto evoluto, raggiunge i 6-7 m di profondità ed è di tipo Bt/Btc/BC/Ck/C sulle litofacies grossolane e di tipo A/Bw/Bkss oppure A/E/Bt/Btc/Btb/Btcb/Btb/Btcb sulle litofacies fini. Alla sommità dell'intervallo fine delle aree terrazzate si rinvenivano manufatti del Paleolitico medio. Il contatto di base è erosivo e discordante sulle unità più antiche.

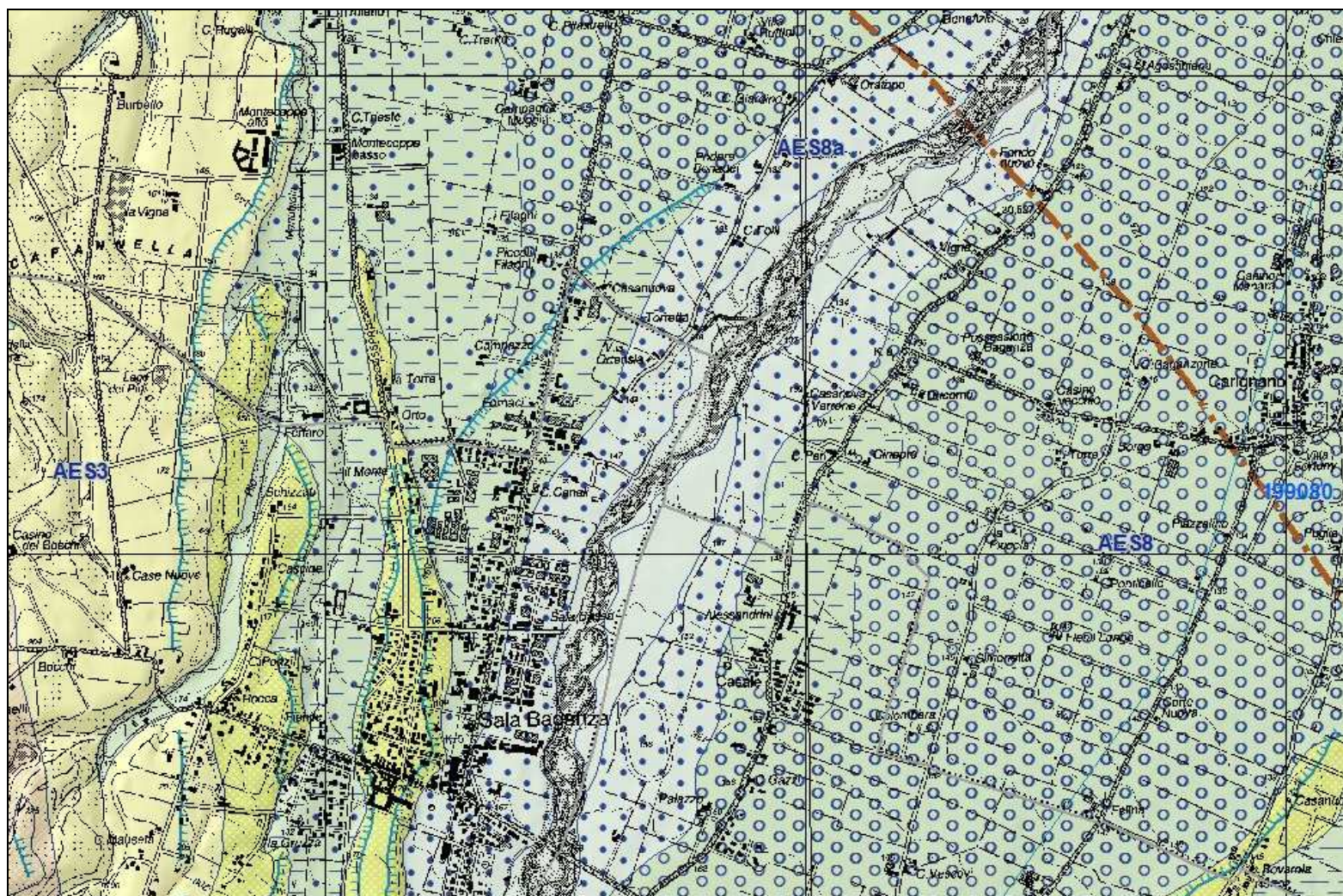


Figura 1: Estratto della Carta Geologica Regionale della Regione Emilia Romagna, relativa all'area oggetto di studio. La legenda di riferimento è riportata in Figura 2.

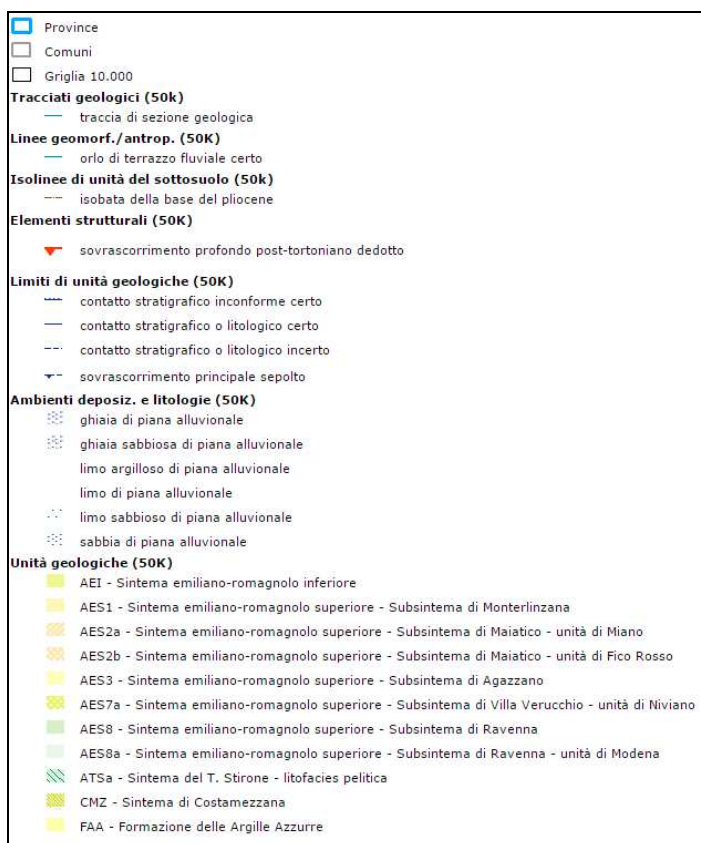


Figura 2: Legenda di riferimento dell'estratto della Carta Geologica Regionale della Regione Emilia Romagna. Vedi Figura 1.

2.3 Geomorfologia

L'attuale assetto geomorfologico dell'ambito geografico in esame è il risultato dell'effetto combinato di alterne vicende climatiche di varia intensità, lente deformazioni tettoniche ed interventi antropici, che si sono imposti negli ultimi millenni ed hanno direttamente interagito sulla rete idrografica. Il limite morfologico tra la pianura pedemontana e la fascia collinare è definito da un netto salto di pendenza (orlo di terrazzo fluviale) con scarpate di parecchi metri modellate dalla dinamica fluviale; il limite si presenta molto frastagliato in relazione alle depressioni vallive dei corsi d'acqua minori. Nell'ambito geografico in esame i corsi d'acqua sono rimaste le uniche zone che mantengono ancora, nonostante i massicci interventi di regimazione (arginature, pennelli, traverse, ecc.), un alto grado di naturalità con frequenti emergenze morfologiche. Contrariamente le aree perifluviali esprimono il congelamento di una situazione originatasi antecedentemente alla limitazione de-

gli alvei fluviali entro percorsi prefissati, in cui le opere di bonifica agraria, infrastrutturazione ed insediamento hanno conferito al rilievo un assetto costante ed uniforme livellando tutte le asperità del terreno. Le superfici del suolo conservano tuttavia, anche se in forma relittuale, ancora le tipiche geometrie dell'ambiente fluviale.

2.3.1 *La pianura pedemontana*

La pianura pedemontana, nell'ambito geografico in esame, è costituita dall'impalcatura della conoide alluvionale del T. Baganza e di rango inferiore del T. Scodogna. Il paesaggio, nel suo complesso, è contraddistinto dai seguenti aspetti:

- il T. Baganza che mostra un andamento tipicamente rettilineo, e il T. Scodogna, con andamento molto sinuoso, talora meandriforme, scorrono nelle aree topograficamente inferiori; nella zona nord al limite con la fascia collinare sono impostati in ampie depressioni vallive le quali procedendo verso valle si riducono a contenute incisioni nel piano campagna;
- le zone perifluviali, comprese tra i suddetti corsi d'acqua, sono caratterizzate da vari ordini di terrazzi fluviali impostati a quote gradualmente superiori, esprimendo un'età di formazione progressivamente più antica;
- le superfici di tali terrazzi fluviali sono generalmente sub-pianeggianti con deboli ondulazioni a seguito delle incisioni prodotte dalla rete idrica secondaria, e digradano leggermente verso N-NE con pendenze medie pari a 0,5 – 1,0%;
- le superfici di terrazzo, verso il lato fiume, sono interrotte lateralmente da scarpate di alcuni metri (orli di terrazzi fluviali) o da sensibili aumenti di pendenza; verso monte gli orli di terrazzo affiorano con sufficiente continuità, mantenendo un andamento circa parallelo all'asta fluviale, mentre verso la pianura a crescita verticale si riducono progressivamente fino a dileguarsi completamente;
- a rete idrica secondaria (Rio della Valline, Rio Manubiola,, ecc.) interessa le zone perifluviali comprese tra i corsi d'acqua principali (T. Baganza e T. Scodogna) e scorre nelle aree topograficamente inferiori generando deboli ondulazioni alle superfici del piano campagna.

Le caratteristiche stratigrafico - sedimentologiche della pianura pedemontana sono tipiche dei corsi d'acqua con le seguenti qualità specifiche: medio - alto trasporto

solido totale; medio - alto rapporto tra rasporto solido al fondo e trasporto solido totale, granulometria grossolana, medio - bassa sinuosità; medio - alto rapporto tra larghezza e profondità del talweg; medio – alta pendenza del talweg.

Il T. Baganza allo stato attuale non presentano le suddette caratteristiche, perché dal Pleistocene superiore, durante le glaciazioni, ai giorni nostri hanno subito una generale perdita di competenza. In passato essi, per effetto delle condizioni climatiche glaciali e quindi più umide con abbondanti precipitazioni, presentavano alvei più grandi con maggiore energia. Nell'Olocene invece, a seguito del miglioramento climatico l'attività dei corsi d'acqua è progressivamente scemata, determinando l'evoluzione dell'alveo fluviale verso forme maggiormente in equilibrio con la cadente morfologica e la natura dei sedimenti affioranti.

2.3.2 *Il Torrente Baganza*

Il T. Baganza nel tratto di interesse possiede una configurazione di drenaggio tipo “wandering”. Si tratta di un alveo fluviale inciso nel materasso ciottoloso caratterizzato da un unico canale principale attivo con barre laterali alternate, che sovente presentano una forma a semi-losanga più o meno allungata. Le barre e i canali rappresentano delle unità morfologicamente distinte che interagiscono tra loro; le barre si accrescono a scapito dei canali attivi, i quali a loro volta tendono a mantenere la sezione costante e, quindi, ad erodere le barre stesse.

Le barre fluviali presentano inoltre sponde ben definite e solo di rado, a parte quelle topograficamente più basse, sono sommerse dalle piene. Sulle barre più grandi, che costituiscono vere e proprie isole, è presente in genere una fitta copertura vegetale, costituita da essenze arboree, arbustive ed erbacee, che conferisce alle stesse una maggiore stabilità e resistenza all'erosione garantendo, contemporaneamente, una maggiore conservazione.

In alcuni tratti, affiancato al canale principale è presente un canale secondario, generalmente aderente ad una delle due sponde, con dimensioni variabili, fino ad un massimo pari alla grandezza di quello principale. Tale canale secondario è solitamente generato in concomitanza di piene di una certa entità, per taglio delle barre laterali longitudinali (per questo si definisce canale di taglio). Il canale di taglio a seguito delle piene successive può occludersi ed essere definitivamente abban-

donato, oppure allargarsi fino a diventare egli stesso il canale principale. Le sponde dell'alveo inciso hanno un andamento generale pressappoco parallelo e rettilineo. Durante le piene fluviali l'alveo ciottoloso è completamente o quasi sommerso dalle acque, le quali esercitano una debole azione erosiva capace, ad ogni evento, di modificare parzialmente la geometria delle barre e dei canali.

In questo tratto fluviale, il T. Baganza è contraddistinto da un assetto in equilibrio precario ed è sufficiente che avvengano piccole variazioni dei parametri idraulici e geomorfologici, perché il corso d'acqua cambi spontaneamente il suo tracciato e la sua configurazione di drenaggio.

Dott. Geol. Annamaria Belardi

3. **RELAZIONE GEOTECNICA**

3.1 **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 3.1). 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.

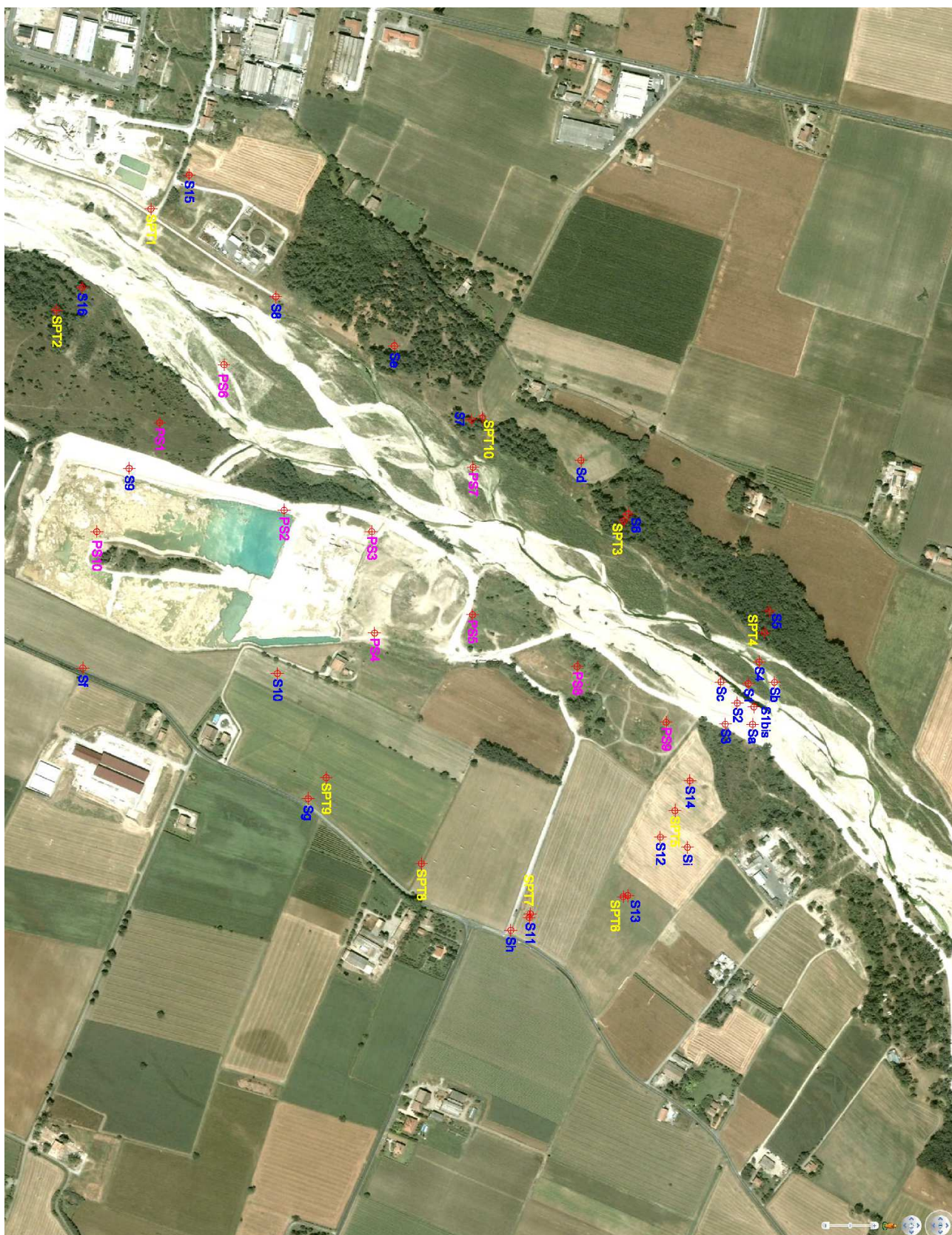


Figura 3.1. Planimetria con ubicazione dei sondaggi.



Figura 3.2. 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.

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 3.2).

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).

Nei successivi paragrafi vengono pertanto presentati gli esiti delle indagini eseguite, dalla descrizione delle prove eseguite all'esposizione degli orizzonti stratigrafici riscontrati. Negli ultimi due paragrafi vengono infine riportati, rispettivamente, il piano di monitoraggio e l'analisi preliminare di stabilità del rilevato arginale.

3.2 Prove geotecniche

3.2.1 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.

3.2.2 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 3.3).

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 3.3. 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 Δu misurati entro 10 min. dall'istante di applicazione dell'incremento di pressione di cella. I valori di Δu 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.

3.2.3 Riferimenti normativi e 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:

- 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.

3.2.4 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.

3.3 Prove in sito

3.3.1 Tipologia di indagini e prove eseguite

Nella Tabella 3.1 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 3.1. 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

Tipologia di indagine	Numero	Nome	Dettagli
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.

3.3.2 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 Φ' 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.

3.3.3 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.

Sezione trasversale D-D':

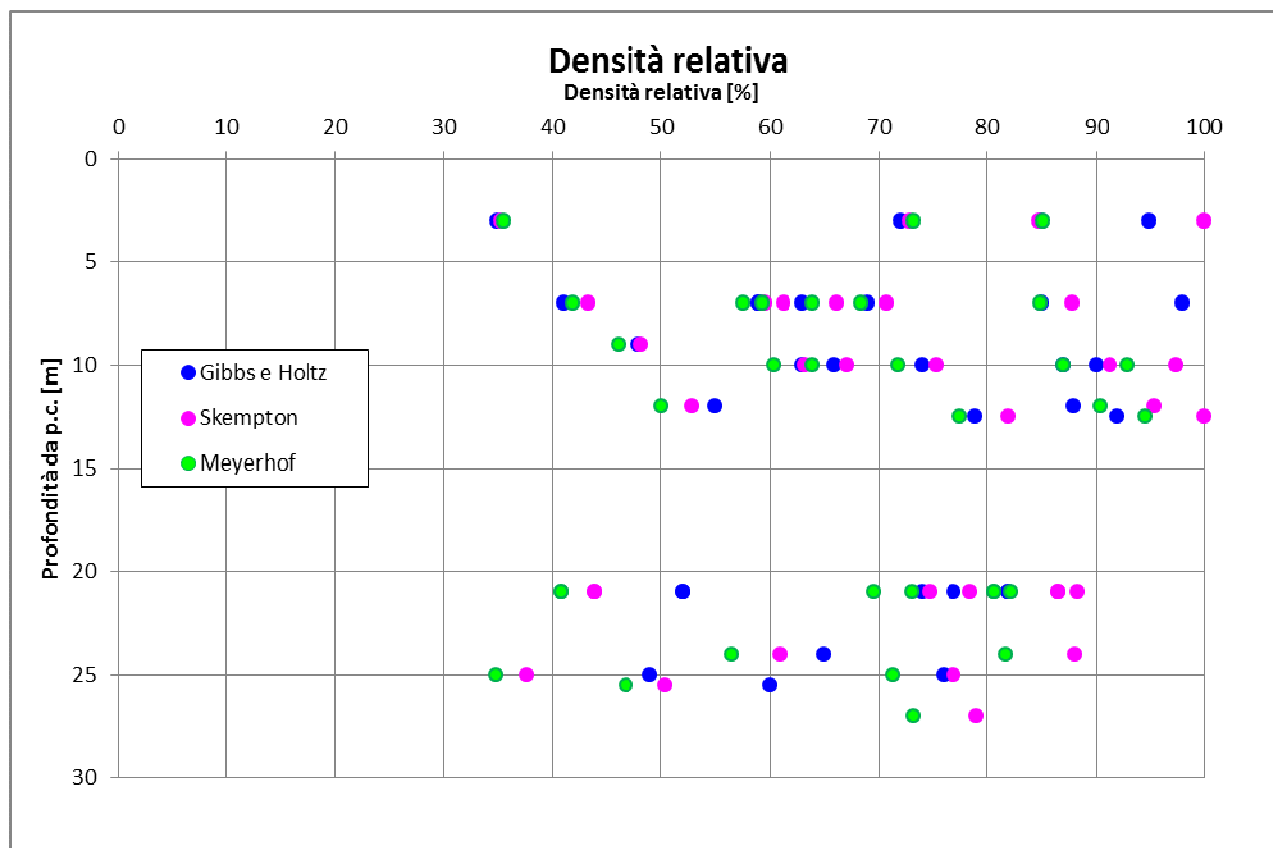


Grafico 3.1. Valori di densità relativa [%] in funzione del numero di colpi N_{SPT} alle diverse profondità per la sezione trasversale.

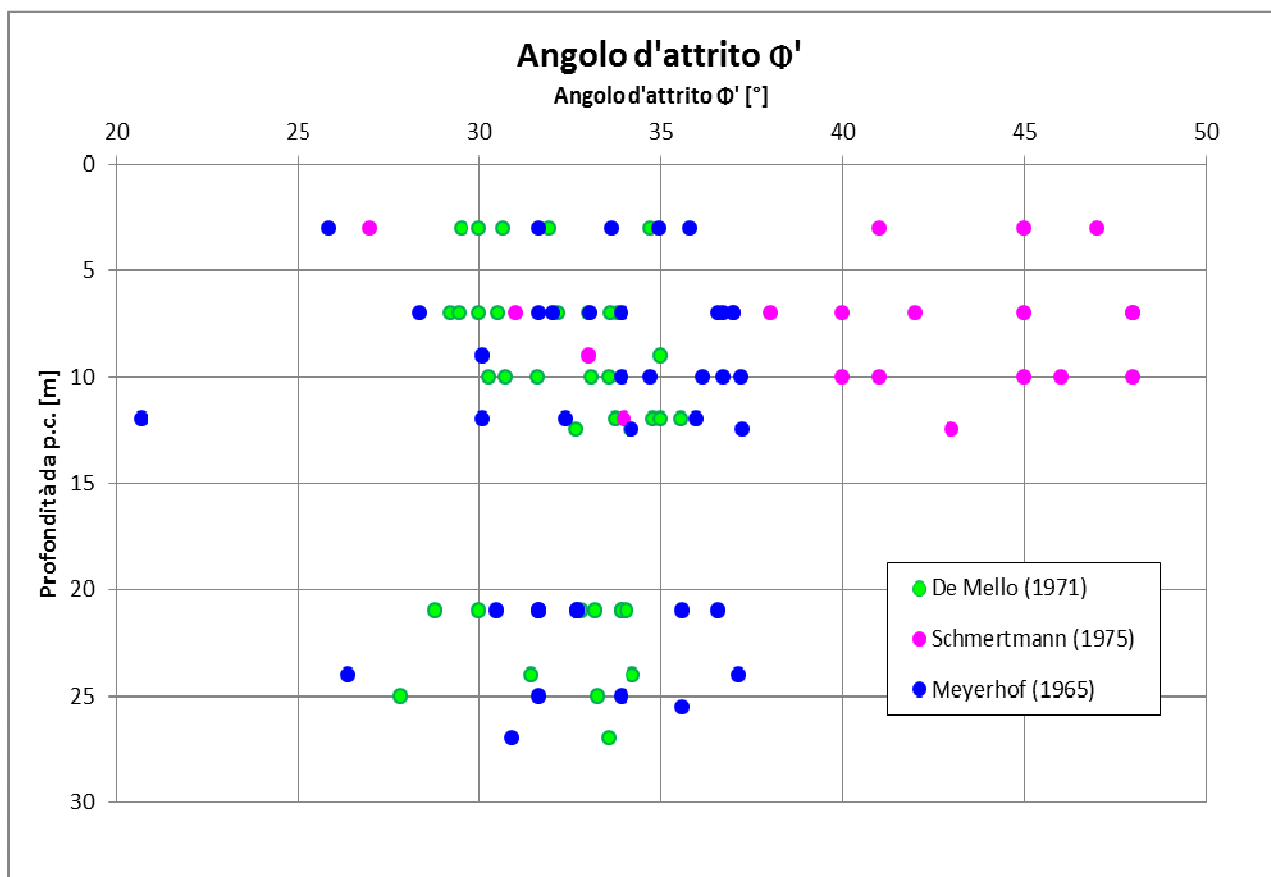


Grafico 3.2. Valori dell'angolo d'attrito in funzione del numero di colpi N_{SPT} alle diverse profondità per la sezione trasversale.

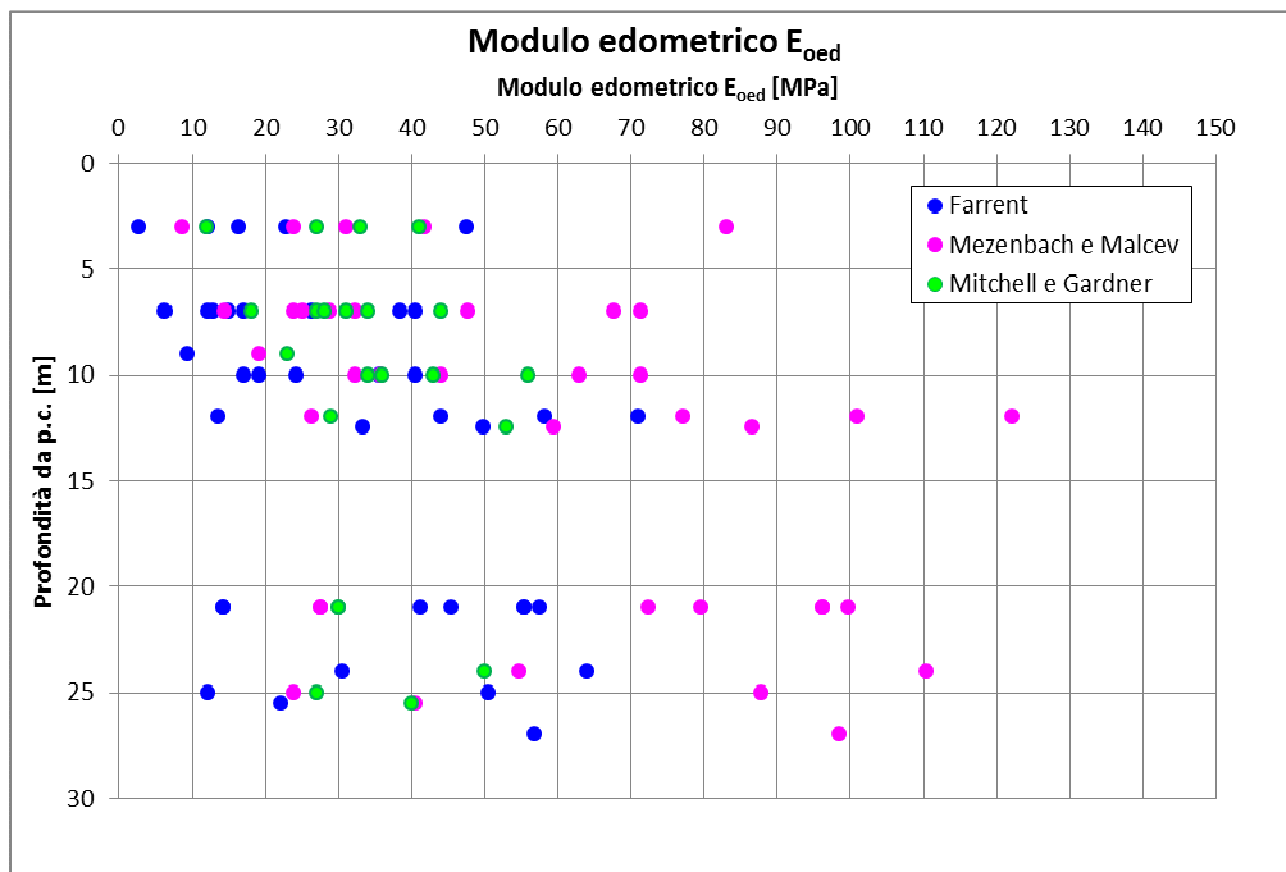


Grafico 3.3. Valori del modulo edometrico in funzione del numero di colpi NSPT alle diverse profondità per la sezione trasversale.

Tabella 3.2. 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
Sondaggio S3	27	80		79	73
	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 3.3. 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 3.4. Valori del modulo edometrico [MPa] per la sezione stratigrafica trasversale (Sezione D-D').

Sondaggio S1	prof. da p.c. [m]	NSPT	Farrent	Menzenbach e Malcev	Mitchell e Gardner
	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 A-A':

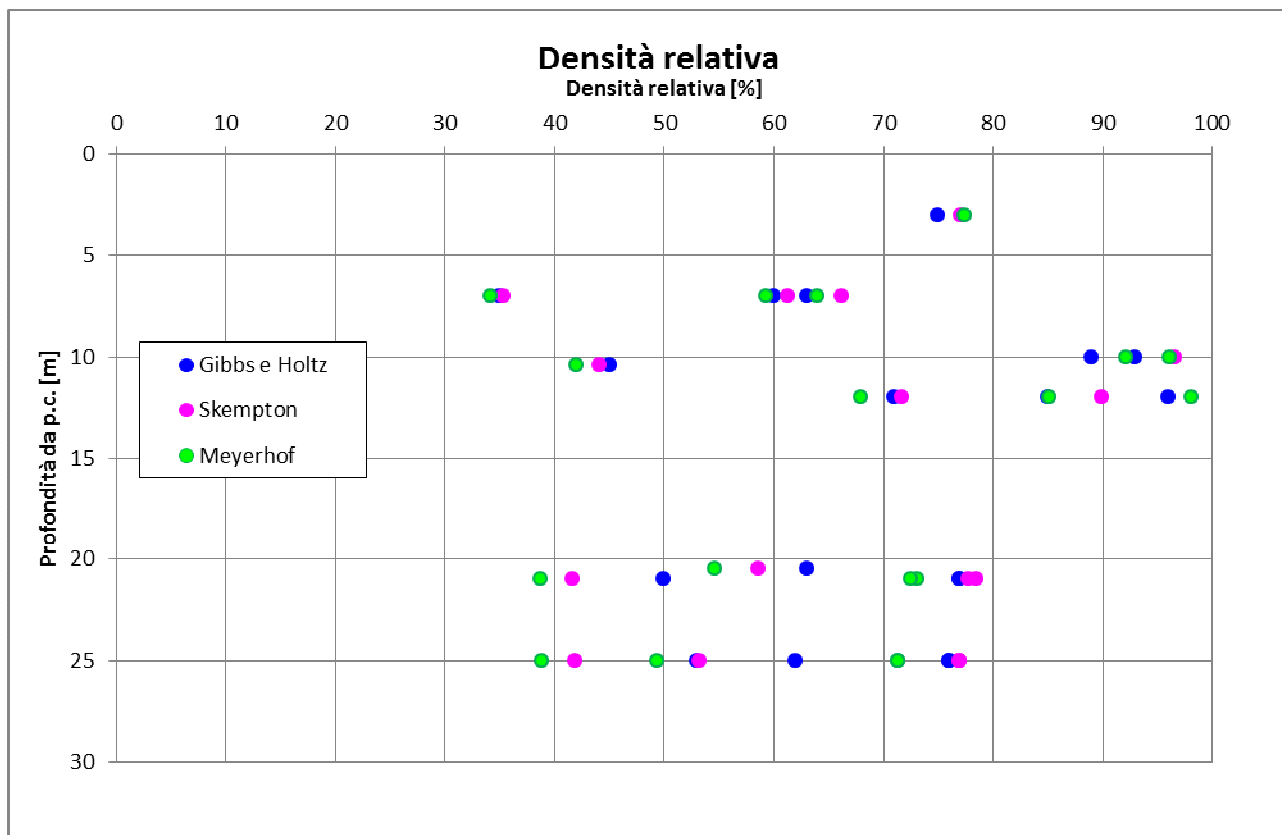


Grafico 3.4. Valori di densità relativa [%] in funzione del numero di colpi N_{SPT} alle diverse profondità per la sezione longitudinale.

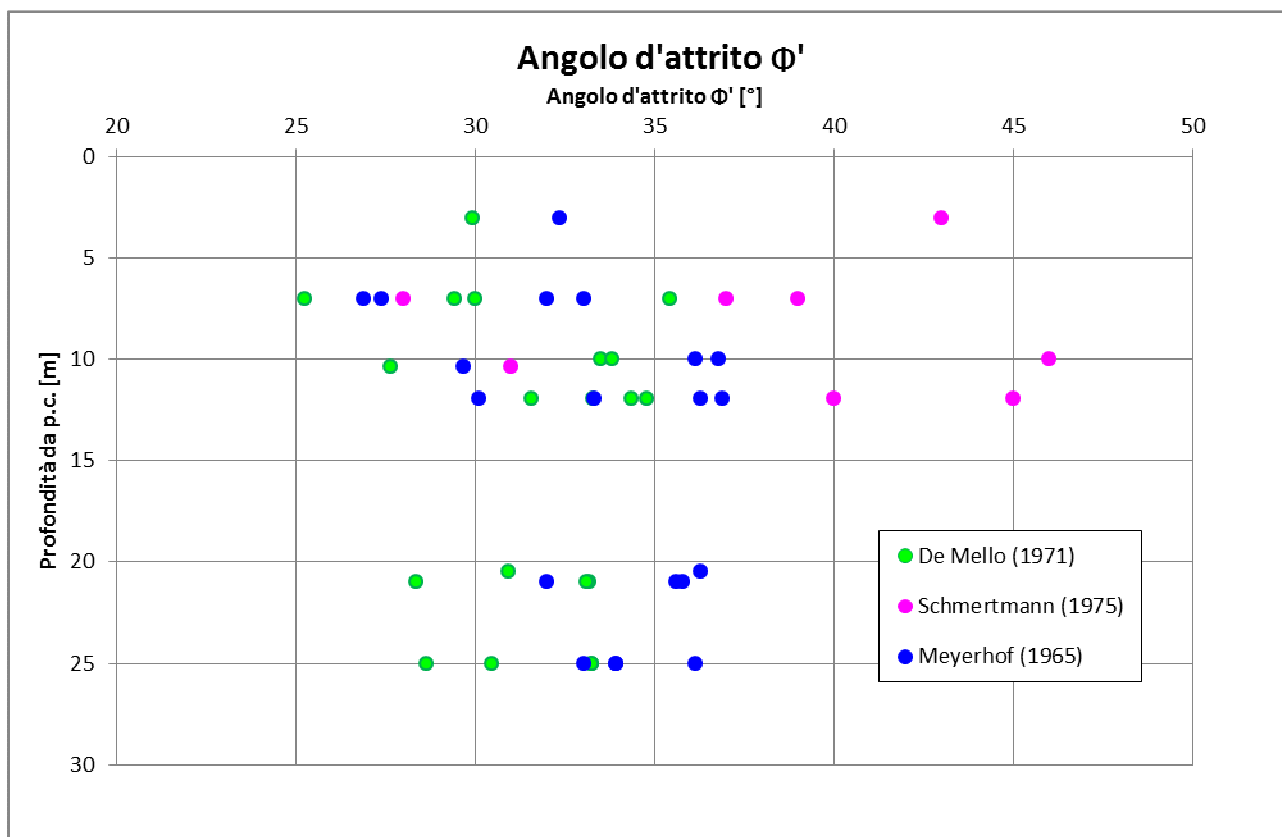


Grafico 3.5. Valori dell'angolo d'attrito in funzione del numero di colpi N_{SPT} alle diverse profondità per la sezione longitudinale.

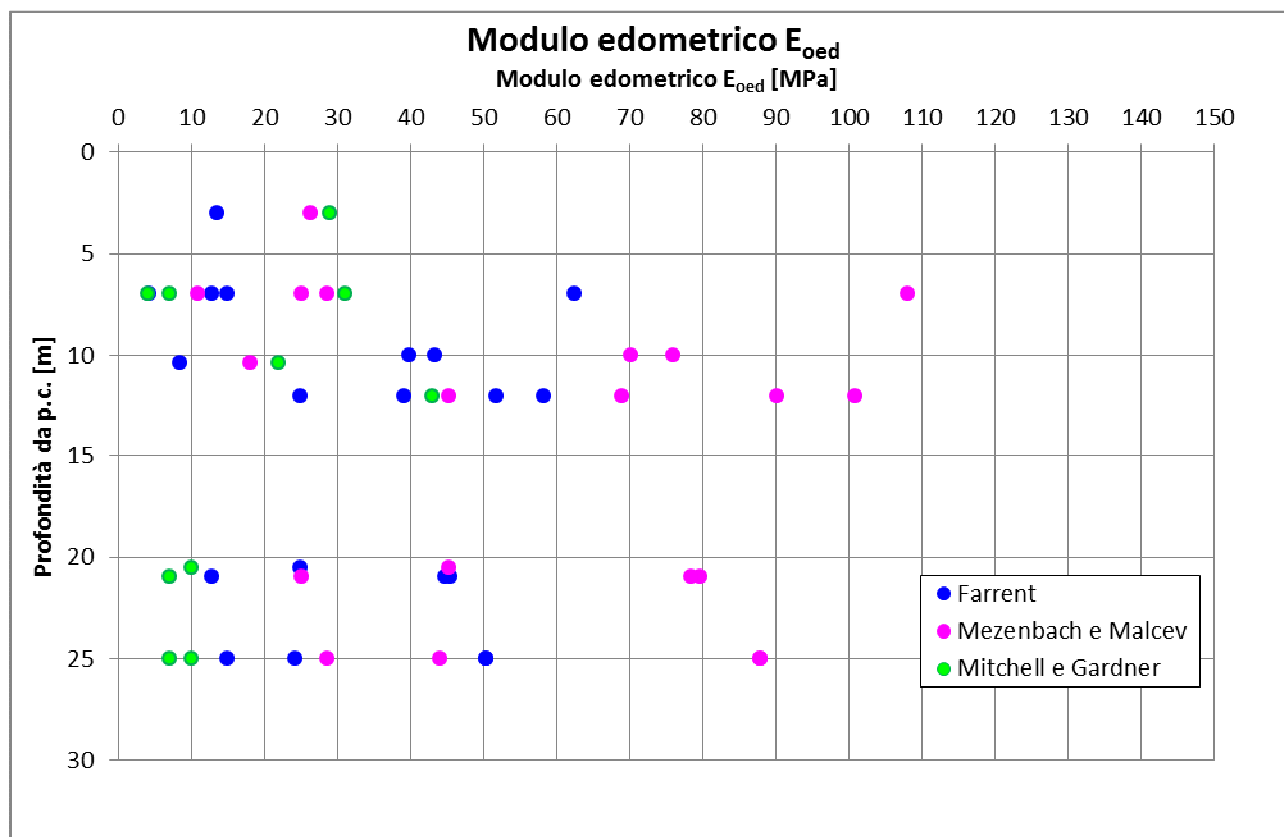


Grafico 3.6. Valori del modulo edometrico in funzione del numero di colpi NSPT alle diverse profondità per la sezione longitudinale.

Tabella 3.5. 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	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
	21	18	50	42	39

	25	34	62	53	49
Sondaggio S8	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 3.6. Valori dell'angolo d'attrito [°] per la sezione stratigrafica longitudinale (Sezione A-A').

Sondaggio S5	prof. da p.c. [m]	NSPT	Meyerhof (1965)	De mello (1971)	Schmertmann (1975)
	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 3.7. 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

3.4 Prove di laboratorio

3.4.1 Tipologie di prove eseguite

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

Tabella 3.8. 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.

3.4.2 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 (IP) e del limite dello stato liquido (wL) espressi in percentuale [%];
- valore della massa volumica dei granuli solidi ps [Mg/m³];
- variazione dell'indice dei vuoti e [-] e del modulo edometrico E_{oed} [kPa] in funzione della variazione del carico verticale agente sul provino;

- valori dell'angolo d'attrito [°] 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.

3.4.3 *Risultati dell'interpretazione*

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

3.5 ***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 della 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.

3.5.1 Orizzonte 1

L'Orizzonte 1 è caratterizzato da ghiaie sabbiose di colore grigio (Grafico 3.7). 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 queste 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.

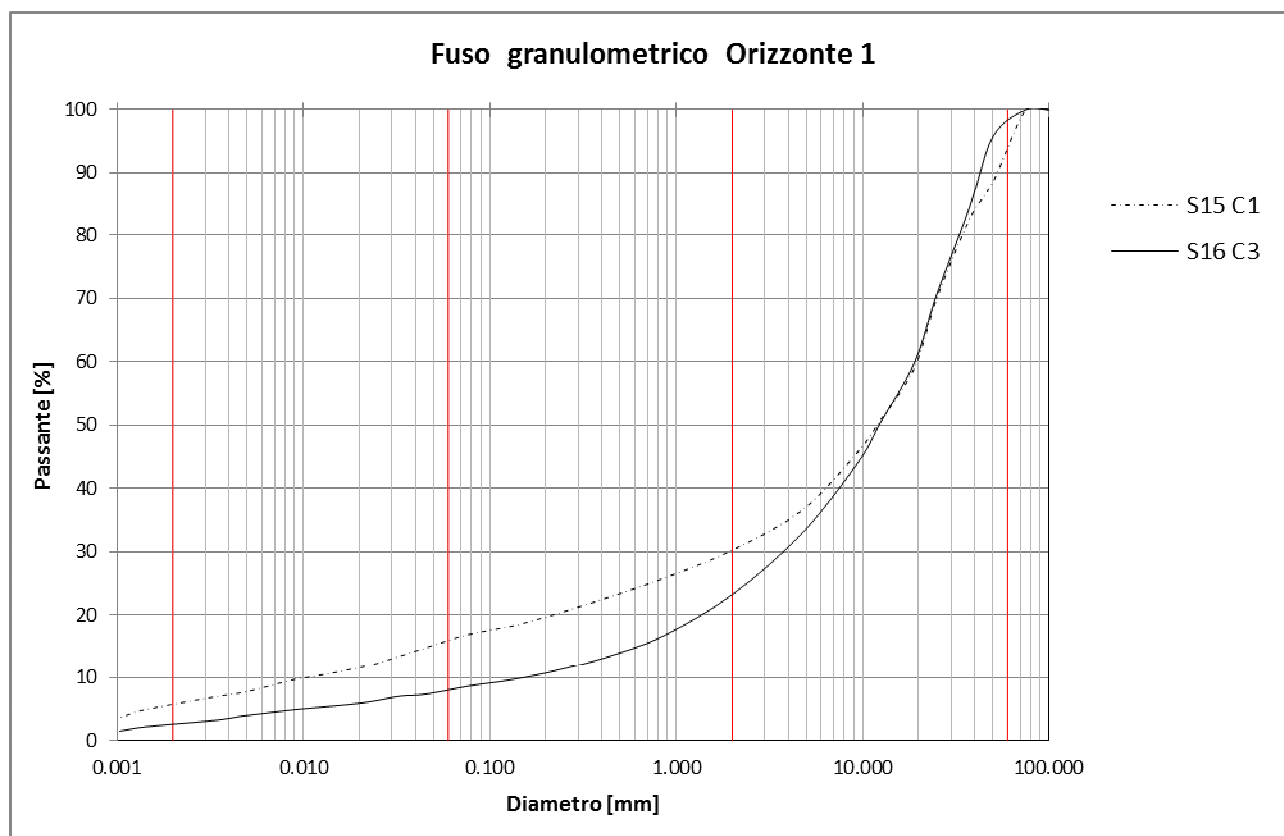


Grafico 3.7. Distribuzione granulometrica dei materiali prelevati dall'Orizzonte 1.

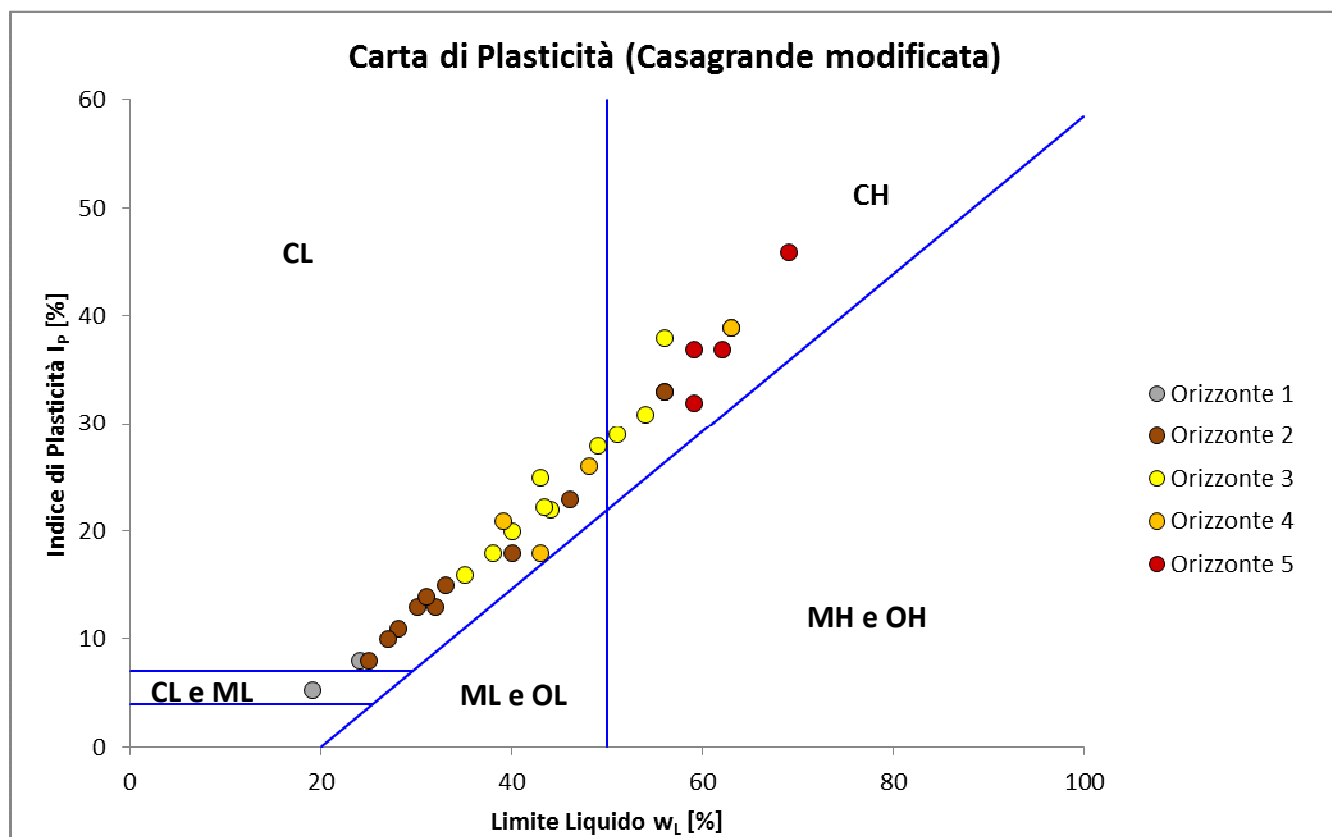


Grafico 3.8. Carta di plasticità di Casagrande – valori di indice di plasticità e limite liquido per i principali orizzonti.

3.5.2 Orizzonte 2

L'Orizzonte 2 è caratterizzato da un materiale prevalentemente ghiaioso, come mostrato nel Grafico 3.9, 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 particolare, 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 3.8) 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 3.9.

Pertanto le informazioni ricavate dall'elaborazione dei dati derivanti da queste prove vanno opportunamente utilizzate.

I grafici delle densità relative (Grafico 3.1 e Grafico 3.4) 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 3.2 e Grafico 3.5) appaiono concentrati nell'intervallo 27°÷37°. 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 3.3 e Grafico 3.6) appaiono dispersi. Si può affermare che essi sono maggiormente concentrati nell'intervallo 10÷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.

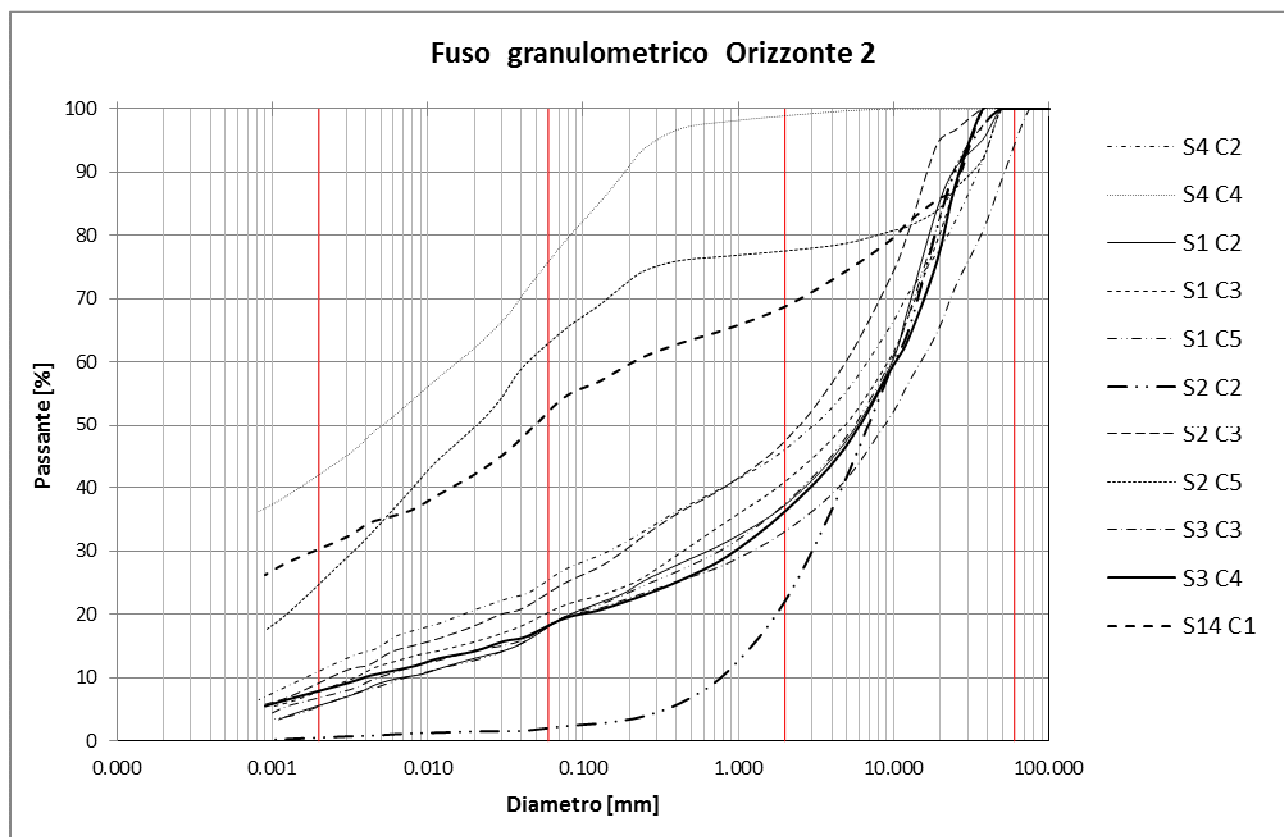


Grafico 3.9. Distribuzione granulometrica dei materiali prelevati dall'Orizzonte 2.

3.5.3 Orizzonte 3

L'Orizzonte 3 è costituito da materiali fini, definibili come limi e argille e limi argillo-si (Grafico 3.10). Questo orizzonte ha spessori variabili dai 6 ai 16 m.

Questi materiali hanno valori dell'indice di plasticità e del limite liquido variabili (Grafico 3.8), 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 3.2 e Tabella 3.5) 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 3.3 e Tabella 3.6) 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.

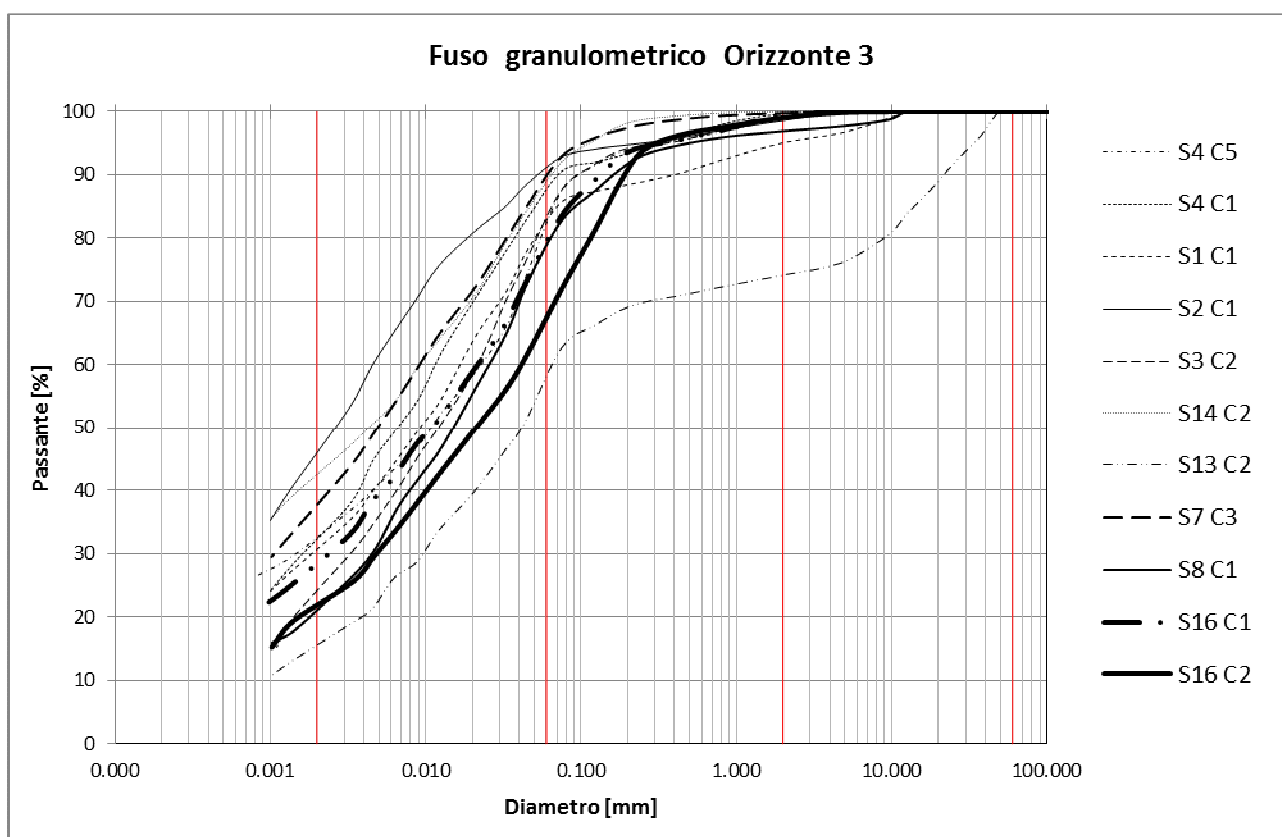


Grafico 3.10. Distribuzione granulometrica dei materiali prelevati dall'Orizzonte 3.

Per quanto riguarda i valori del modulo edometrico, l'interpretazione dei risultati delle prove SPT (Tabella 3.4 e Tabella 3.7) ha messo in evidenza un intervallo di variazione di tale parametro pari a $7\div30$ 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.

3.5.4 Orizzonte 4

L'orizzonte 4 è costituito prevalentemente da materiali fini quali limi con argille e limi argillosi (Grafico 3.11). 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 3.8).

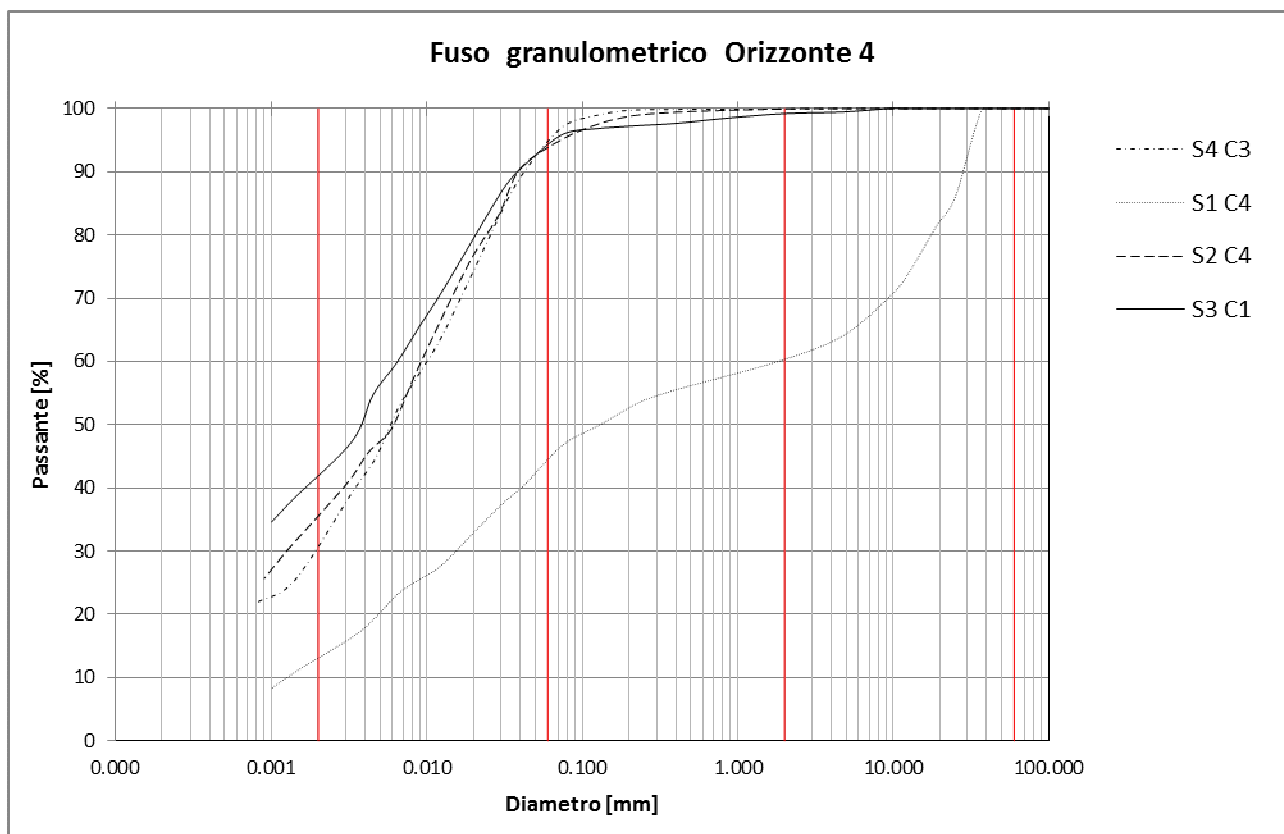


Grafico 3.11. Distribuzione granulometrica dei materiali prelevati dall'Orizzonte 4.

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.

3.5.5 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 3.12). 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.

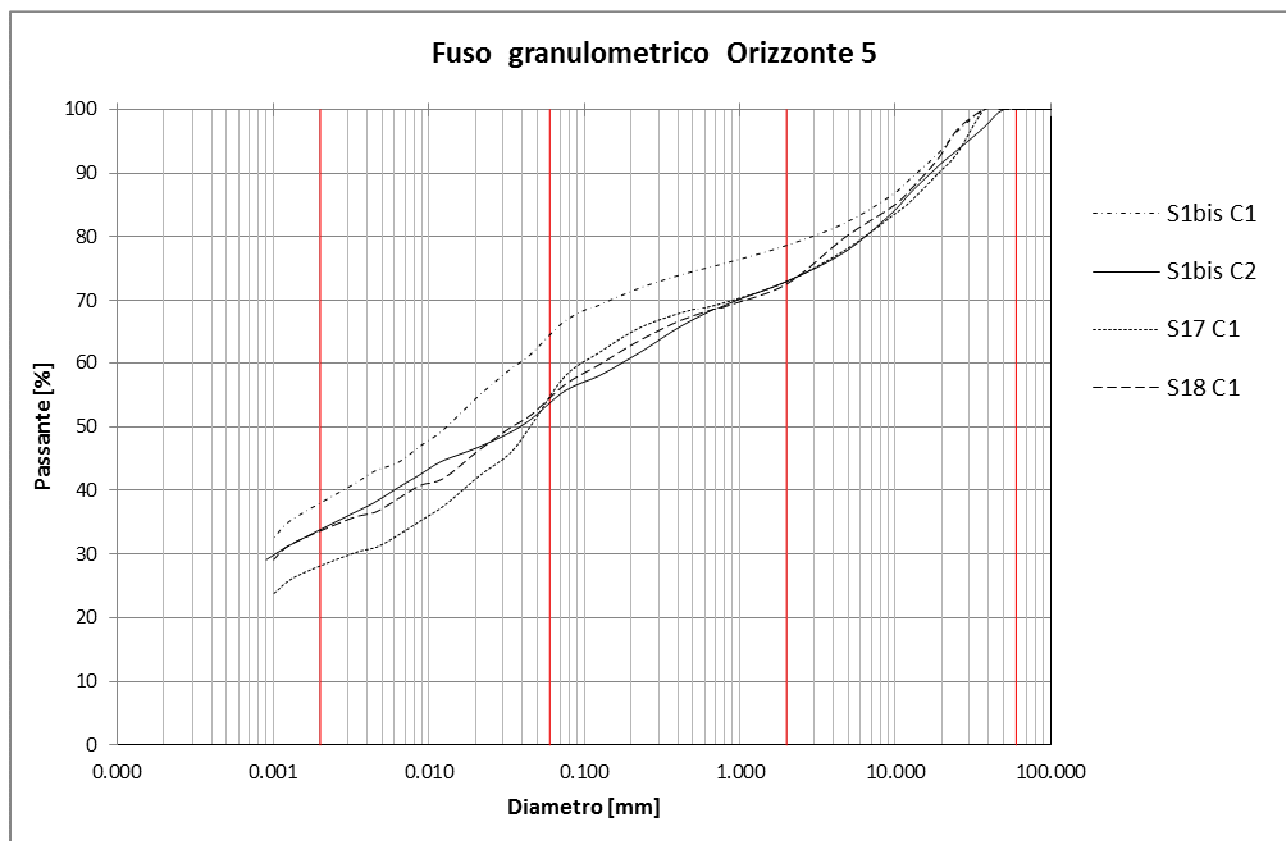


Grafico 3.12. Distribuzione granulometrica dei materiali prelevati dall'Orizzonte 5.

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 3.8).

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.

3.5.6 Orizzonte 6

L'Orizzonte 6 è caratterizzato da materiali fini, in particolare limi con argille di colore marrone chiaro (Grafico 3.13).

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 3.2) 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 3.3) risulta pari a 33° circa, mentre il valore medio del modulo edometrico è pari a 17 MPa (Tabella 3.4).

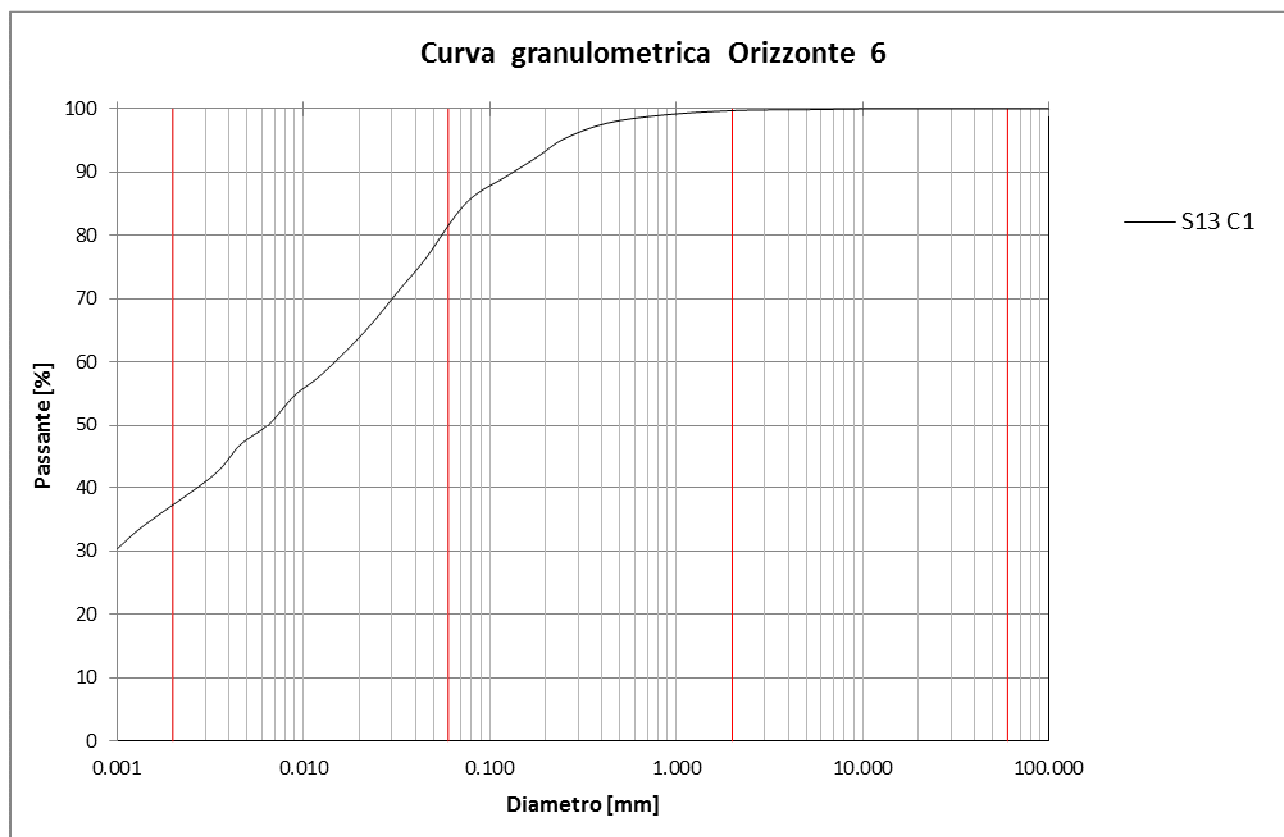


Grafico 3.13. Curva granulometrica del campione prelevato dall'Orizzonte 6.

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

3.5.7 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 3.2, Tabella 3.3 e Tabella 3.4.

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.

3.5.8 Orizzonte 8

L'Orizzonte 8 è definito come una lente di materiale fine, nello specifico limo con argilla (Grafico 3.14).

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).

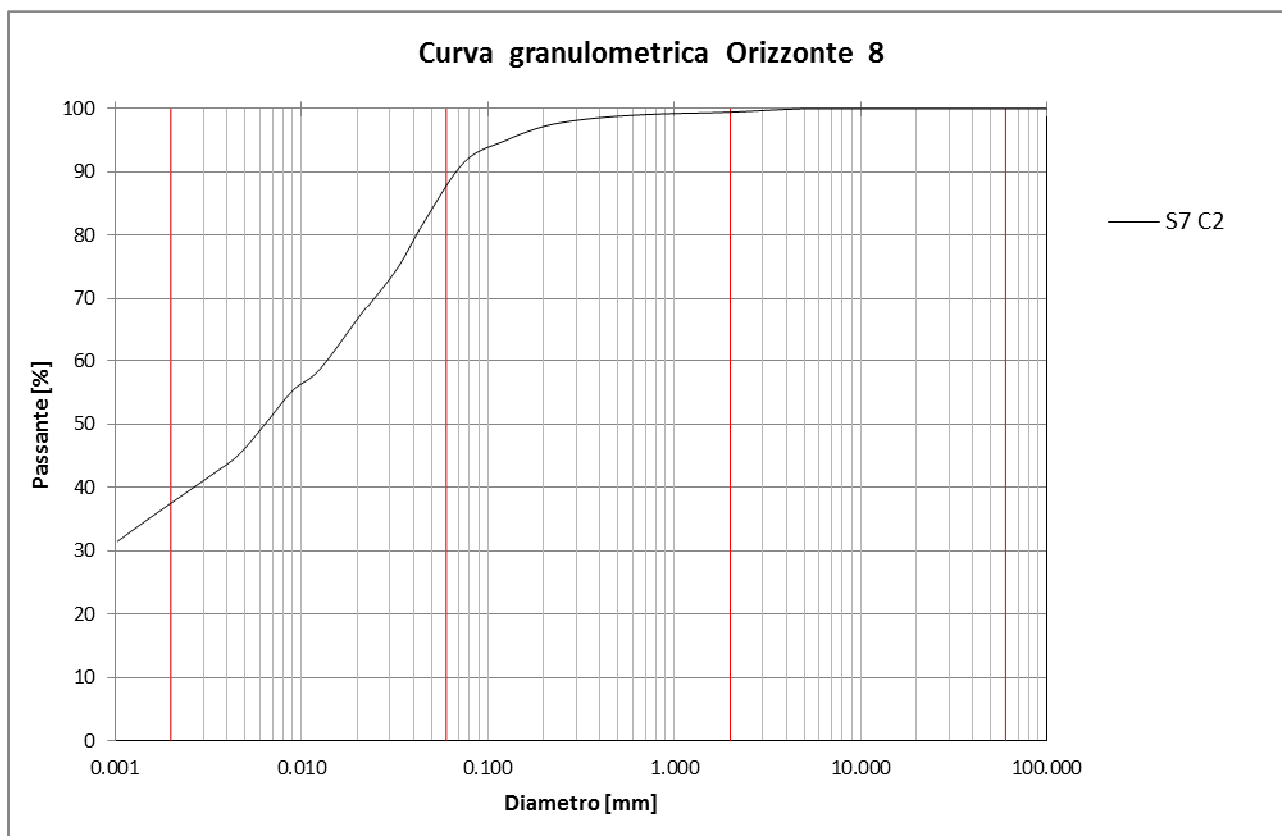


Grafico 3.14. Curva granulometrica del materiale prelevato dall'Orizzonte 8.

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.

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°.

3.5.9 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 3.15) 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 3.7). 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 3.5). 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 3.6) 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.

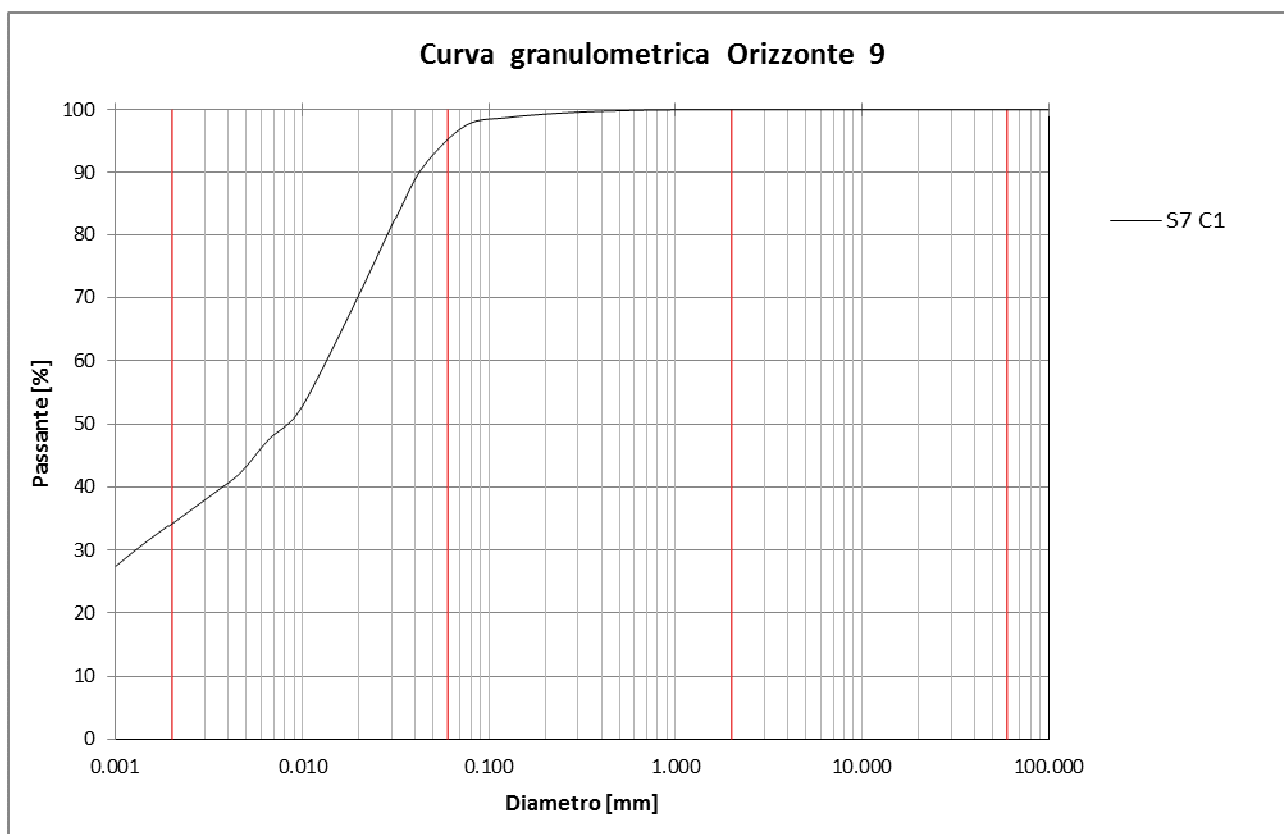


Grafico 3.15. Curva granulometrica del materiale prelevato dall'Orizzonte 9.

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.

3.5.10 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.

3.6 Sistema di controllo e monitoraggio

Il progetto di una struttura di significativa importanza per la sicurezza del territorio e dei cittadini, quale una cassa di laminazione delle piene, deve necessariamente prevedere un sistema di monitoraggio che consenta di valutare, nelle fasi preliminari alla costruzione dei manufatti, in ogni fase di realizzazione dell'opera e durante tutta la sua vita utile, le variazioni spaziali e temporali dei parametri significativi e la loro corrispondenza con i valori previsti sia negli stati limite di esercizio sia, in caso di eventi eccezionali, negli stati limite ultimi.

Nello specifico, i parametri significativi da monitorare dal punto di vista idraulico sono quelli che identificano i livelli istantanei di invaso, i valori delle sottopressioni idrauliche nei livelli acquiferi individuati durante la campagna di indagine geologica e geotecnica e la loro reciproca correlazione, nonché il rapporto tra i valori di pressione neutra nell'area interna ed in quella esterna alle arginature. Un ulteriore elemento di interesse per l'analisi di tali dati e la loro valutazione critica risulta essere la portata in ingresso in prossimità delle briglie di monte.

Dal punto di vista strutturale, i parametri significativi riguardano il manufatto di sbarramento, del quale sarà necessario monitorare eventuali rotazioni e/o spostamenti, nonché le condizioni dello stato tensionale agente in particolari posizioni significative o su alcuni elementi strutturali campione. Sempre dal punto di vista strutturale sarà necessario prevedere dei sistemi di monitoraggio del funzionamento delle paratie allo scopo di ottenere un riscontro immediato sull'avvenuta movimentazione delle stesse quando comandate in remoto; questa funzionalità

del sistema di monitoraggio potrebbe essere integrata/messa in comunicazione con il sistema meccanico di movimentazione delle stesse. A tal proposito occorre ricordare che la funzione del monitoraggio rimane quella di registrare i dati e renderli disponibili per analisi successive quindi, nel caso delle paratie, sarebbe opportuno mantenere separate le funzioni di monitoraggio e quelle di manovra, predisponendo due sistemi di sensori indipendenti, prevedendo eventualmente delle funzioni automatiche di controllo reciproco dei dati. A completamento e controllo del monitoraggio automatico degli spostamenti e delle rotazioni, dovrebbe essere prevista una (o più) colonnina topografica dalla quale poter rilevare sporadicamente un numero di capisaldi da stabilirsi una volta terminata la costruzione dell'opera. Infine, dal punto di vista geotecnico, i parametri significativi sono legati alla stabilità delle pareti dei rilevati arginali, da controllare con sistemi di monitoraggio degli spostamenti che permettano di localizzare le eventuali criticità con precisione temporale e di localizzazione. A tal fine, si dovrebbero prevedere delle catene di sensori inclinometrici che possano essere letti con frequenza arbitrariamente stabilita e rimangano in posizione per tutta la durata della vita utile della struttura. Le condizioni maggiormente critiche per la stabilità del rilevato si ritiene possano essere previste nell'area di maggiore altezza dello stesso (e di maggior profondità dell'invaso), anche in considerazione del fatto che i terreni sui quali verranno poste le fondazioni di tale struttura geotecnica sono sostanzialmente analoghe lungo tutto il suo sviluppo.

La progettazione del sistema di monitoraggio per la cassa di espansione del torrente Baganza è stata realizzata sulla base del progetto definitivo dell'opera idraulica. Tale progetto prevede la realizzazione di una cassa caratterizzata da un unico vaso in linea. L'area allagabile è delimitata da arginature perimetrali che si interrompono in corrispondenza dell'intersezione con l'alveo del torrente per consentire la realizzazione del manufatto regolatore nella porzione di valle e di una serie di briglie in corrispondenza della zona a monte.

Il sistema di monitoraggio delineato prevede l'installazione delle seguenti strumentazioni:

- n. 7 piezometri;

- n. 7 piezometri cluster;
- n. 3 catene inclinometriche attrezzate con piezometro (o piezometri cluster);
- n. 3 misuratori di livello;
- n. 1 clinometro;
- n. 1 colonnina topografica;
- n. 3 sensori di controllo del posizionamento delle paratie;
- n. 5-10 sensori strutturali da prevedere sul manufatto di regolazione della cassa ed il cui numero totale e posizionamento dovranno essere definiti in sede di progetto esecutivo.

Data la numerosità dei sensori e la loro distribuzione spaziale su di un'area piuttosto vasta, la soluzione migliore potrebbe essere quella di utilizzare una tecnologia SmartMesh IP che prevede il collegamento di diversi “cluster” a basso consumo mediante l'impiego di una rete wireless WIFI. Il sistema è un sistema “intelligente”, che riesce a sfruttare i ponti di trasmissione dei vari cluster, in modo da ridurre le distanze di trasmissione dei dati e fornire una maggiore garanzia di successo della stessa anche in casi di presenza di disturbi elevati. Nel caso specifico della cassa, i cluster potrebbero avere la funzione di alimentare e registrare i dati di uno o più sensori vicini e trasmetterli a due o più datalogger “master” che provvederebbero alla registrazione ridondante dei dati ed alla loro comunicazione tramite portale web e/o server FTP. Questa tecnologia è disponibile da alcuni anni, ma è finora scarsamente utilizzata in ambito geotecnico e di monitoraggio ambientale poiché fino a poco tempo fa i “cluster” avevano consumi piuttosto elevati e necessitavano di una alimentazione significativa. Le recenti tecnologie hanno permesso di sviluppare “cluster” a bassissimo consumo che possono funzionare per anni con normali batterie, eventualmente integrate da piccoli pannelli fotovoltaici.

Un sistema di questo genere consentirebbe di effettuare un monitoraggio automatico programmato e, nel caso ve ne fosse bisogno, un monitoraggio puntuale, di alcuni sensori o dell'intera rete, semplicemente attraverso la pressione di un tasto in una pagina web. Il database di misure così costruito fungerebbe sia come controllo del funzionamento della struttura e della sua interazione con l'ambiente cir-

costante, sia come popolazione di dati sui quali effettuare delle analisi statistiche ai fini di determinare, verificare e/o ridefinire, le soglie di attenzione.

L'ubicazione della strumentazione relativa all'intera opera viene riportata in Figura 6.

L'ubicazione della strumentazione relativa al dettaglio del manufatto regolatore viene riportata in Figura 5.

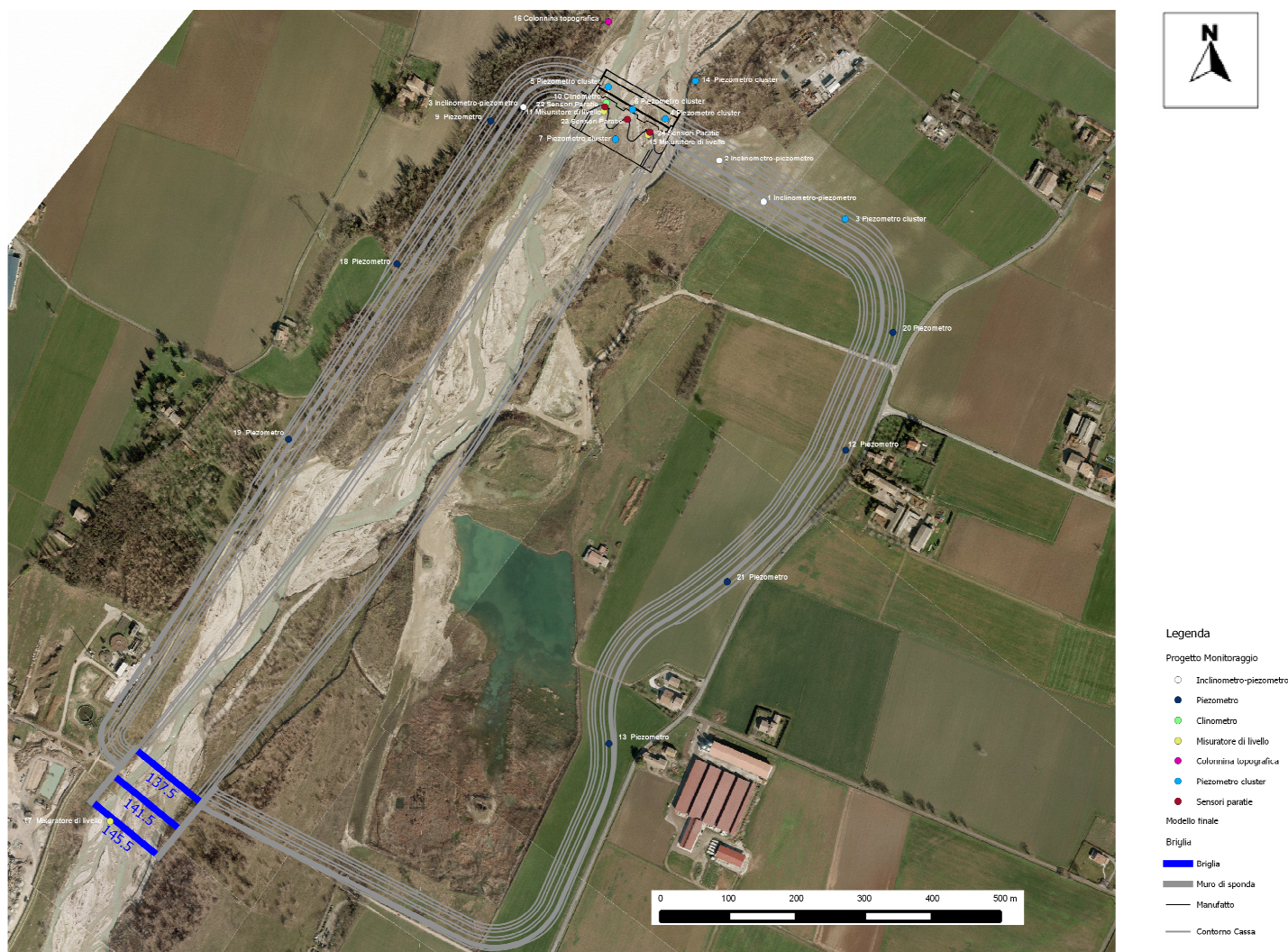


Figura 6: Ubicazione degli strumenti di monitoraggio

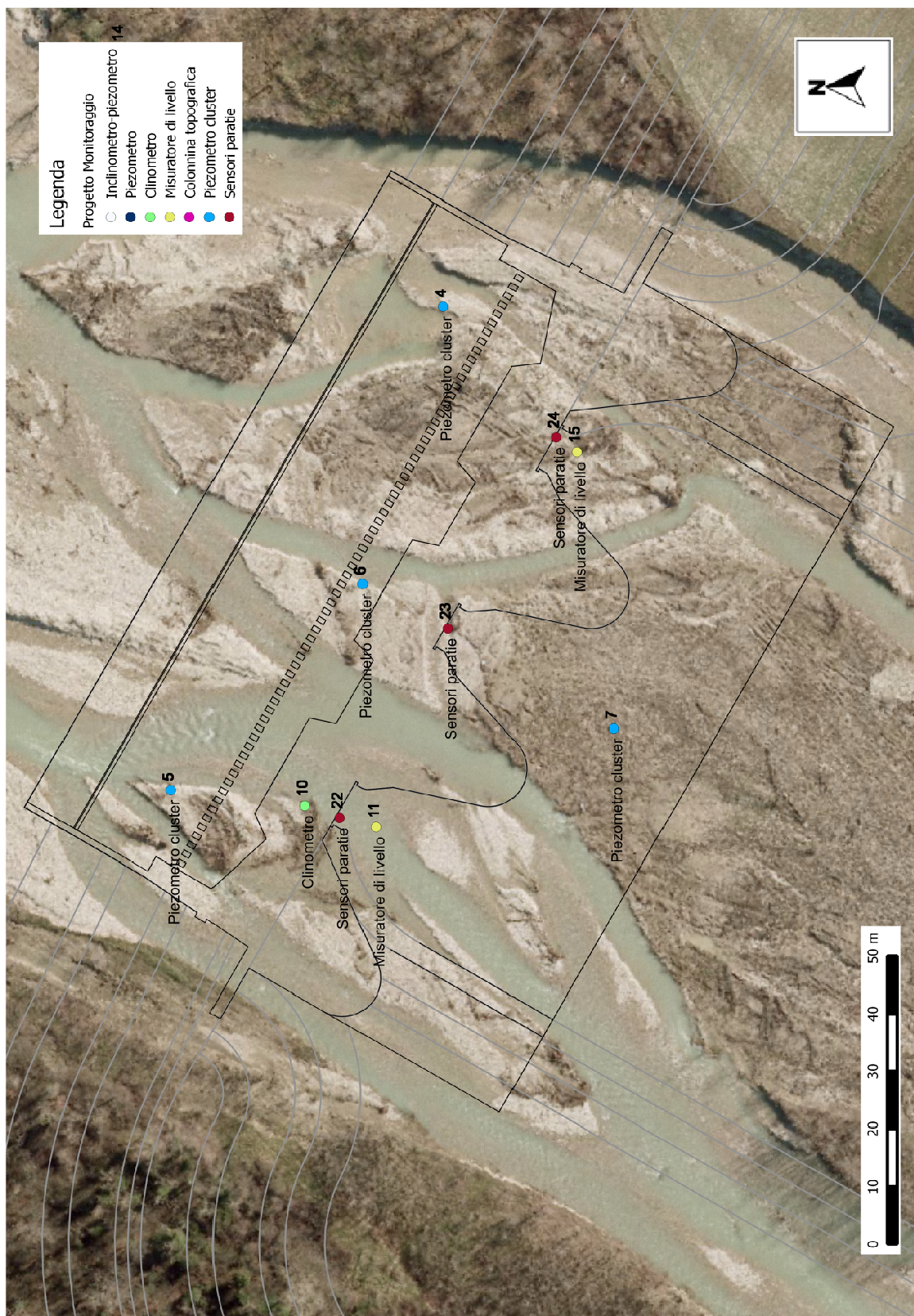


Figura 5. Ubicazione degli strumenti in corrispondenza del manufatto regolatore.

Le specifiche relative ai singoli strumenti vengono di seguito riportate.

Si consideri che con il termine “prima banca” si fa riferimento alla banca a quota inferiore, mentre il termine “seconda banca” fa riferimento alla banca a quota intermedia tra la sommità del rilevato arginale e la base dello stesso. Al fine di garantire il funzionamento dei piezometri elettrici per un lungo periodo, si prevede di installarli in modo che risultino costantemente sotto il livello della falda (le quote indicate sono state definite opportunamente) e posti all’interno di un pacchetto filtrante di sabbia fine protetto da un tessuto non tessuto di adeguata resistenza. La scelta delle pietre porose dei piezometri e le procedure di installazione dovranno essere tali da garantire il mantenimento della saturazione della camera di misura. Nel caso di installazione di più piezometri in un medesimo foro, risulta imperativo sigillare i singoli livelli monitorati attraverso l’impiego di tappi di argilla realizzati a regola d’arte.

- **Inclinometro – piezometro 1:** la catena inclinometrica attrezzata con piezometro dovrà essere installata in corrispondenza della seconda banca del rilevato arginale nella porzione in destra idraulica del manufatto regolatore. Tale strumento dovrà raggiungere la profondità di -10.0 m da p.c. e sarà costituito da un sensore inclinometrico ogni 0.50 m dalla sommità fino alla profondità di $(1/3 - \frac{1}{2})$ larghezza del rilevato in quel punto) ed un sensore piezometrico posto alla profondità di -10.0 m dal p.c.;
- **Inclinometro - piezometro 2:** il piezometro dovrà essere installato in corrispondenza della seconda banca, lato campagna e in destra idraulica del manufatto regolatore. I piezometri elettrici dovranno essere collocati a -15.0 m e -40.0 m da p.c. ed opportunamente sigillati al fine di garantire la discontinuità idraulica lungo il foro di installazione;
- **Piezometro cluster 3:** il piezometro dovrà essere installato in corrispondenza della prima banca, lato campagna e in destra idraulica del manufatto regolatore. I piezometri elettrici dovranno essere collocati a -18.0 m e -35.0 m da p.c. ed opportunamente sigillati al fine di garantire la discontinuità idraulica lungo il foro di installazione;

- **Piezometro cluster 4:** il piezometro dovrà essere installato al di sotto del manufatto regolatore, in corrispondenza della spalla destra. I piezometri elettrici dovranno essere collocati a -15.0 m e -25.0 m da p.c. ed opportunamente sigillati al fine di garantire la discontinuità idraulica lungo il foro di installazione;
- **Piezometro cluster 5:** il piezometro dovrà essere installato al di sotto del manufatto regolatore, in corrispondenza della spalla sinistra. I piezometri elettrici dovranno essere collocati a -15.0 m e -25.0 m da p.c. ed opportunamente sigillati al fine di garantire la discontinuità idraulica lungo il foro di installazione;
- **Piezometro cluster 6:** il piezometro dovrà essere installato al di sotto del manufatto regolatore, in corrispondenza della zona centrale. I piezometri elettrici dovranno essere collocati a -15.0 m e -25.0 m da p.c. ed opportunamente sigillati al fine di garantire la discontinuità idraulica lungo il foro di installazione;
- **Piezometro cluster 7:** il piezometro dovrà essere installato al di sotto del manufatto regolatore, lato invaso. I piezometri elettrici dovranno essere collocati a -6.0 m e -15.0 m da p.c. ed opportunamente sigillati al fine di garantire la discontinuità idraulica lungo il foro di installazione;
- **Inclinometro – piezometro 8:** la catena inclinometrica attrezzata con piezometro dovrà essere installata in corrispondenza della seconda banca del rilevato arginale nella porzione in destra idraulica del manufatto regolatore. Tale strumento dovrà raggiungere la profondità di -10.0 m da p.c. e sarà costituito da un sensore inclinometrico ogni 0.50 m dalla sommità fino alla profondità di $(1/3 - 1/2$ larghezza del rilevato in quel punto) ed un sensore piezometrico posto alla profondità di -10.0 m dal p.c.;
- **Piezometro 9:** il piezometro dovrà essere installato nell'argine in sponda sinistra, lato campagna. La finestratura dovrà essere collocata a -20.0 m da p.c.;
- **Clinometro 10:** il clinometro biassiale dovrà essere installato sulla struttura in posizione da definirsi;
- **Misuratore di livello 11:** il misuratore di livello dovrà essere installato sul manufatto regolatore, lato invaso;

- **Piezometro 12:** il piezometro dovrà essere installato nell'argine in sponda destra, lato campagna, in corrispondenza dell'abitazione più a valle. La finestratura dovrà essere collocata a -10.0 m da p.c.;
- **Piezometro 13:** il piezometro dovrà essere installato nell'argine in sponda destra, lato campagna, in corrispondenza dell'abitazione più a monte. La finestratura dovrà essere collocata a -15.0 m da p.c.;
- **Piezometro cluster 14:** il piezometro dovrà essere installato a valle della cassa di espansione, in sponda destra del torrente. I piezometri elettrici dovranno essere collocati a -15.0 m e -25.0 m da p.c. ed opportunamente sigillati al fine di garantire la discontinuità idraulica lungo il foro di installazione;
- **Misuratore di livello 15:** il misuratore di livello dovrà essere installato sul manufatto regolatore, lato invaso;
- **Colonnina topografica 16:** la colonnina topografica andrà installata a valle dell'invaso, in corrispondenza della sponda sinistra del torrente, a debita distanza dall'alveo e dalla boscaglia;
- **Misuratore di livello 17:** il misuratore di livello dovrà essere installato in corrispondenza della briglia posizionata più a monte;
- **Piezometro 18:** il piezometro dovrà essere installato nell'argine in sponda sinistra, lato campagna. La finestratura dovrà essere collocata a -20.0 m da p.c.;
- **Piezometro 19:** il piezometro dovrà essere installato nell'argine in sponda sinistra, lato campagna. La finestratura dovrà essere collocata a -13.0 m da p.c.;
- **Piezometro 20:** il piezometro dovrà essere installato nell'argine in sponda destra, lato campagna. La finestratura dovrà essere collocata a -15.0 m da p.c.;
- **Piezometro 21:** il piezometro dovrà essere installato nell'argine in sponda destra, lato campagna. La finestratura dovrà essere collocata a -15.0 m da p.c.;
- **Sensore di posizionamento delle paratie 22:** sensore di posizionamento installato sulla paratia sinistra del manufatto regolatore;
- **Sensore di posizionamento delle paratie 23:** sensore di posizionamento installato sulla paratia centrale del manufatto regolatore;
- **Sensore di posizionamento delle paratie 24:** sensore di posizionamento installato sulla paratia destra del manufatto regolatore.

3.7 Verifiche di stabilità preliminari

A completamento della presente relazione geotecnica, sono state sviluppate delle analisi di stabilità con il metodo dell'equilibrio limite globale volte a fornire all'estensore del progetto definitivo un quadro introduttivo della stabilità del rilevato arginale della suddetta opera.

Queste analisi di stabilità preliminari, sono state eseguite prendendo a riferimento una singola sezione arginale considerata essere rappresentativa dell'intero complesso arginale e certamente critica in termini di altezza e di dimensioni del rilevato.

E' evidente che in sede di progetto esecutivo le verifiche di stabilità andranno estese con i medesimi criteri esaminando ogni eventuale sezione che possa essere reputata potenzialmente critica o differisca significativamente per geometria e caratteristiche meccaniche del rilevato artificiale e/o del sottosuolo sul quale esso è fondato.

La sezione trasversale del rilevato arginale presa a riferimento è posizionata in destra idraulica del T. Baganza, lungo il rilevato di valle della cassa di espansione, ad una distanza di una cinquantina di metri dalla spalla destra del manufatto scoltatore; essa risulta collocata, grossomodo, in corrispondenza del sondaggio S14 (vd. paragrafi precedenti).

La sezione prevista di progetto del rilevato e le caratteristiche stratigrafiche dell'area esaminata sono visibili in tutte le Figure a seguire. Tali figure, esemplificative delle singole condizioni esaminate, riportano le mappe di distribuzione del fattore di sicurezza della varie superfici di scivolamento circolari esaminate, associabili ad una estesa maglia di centri soltanto in parte rappresentata.

I fattori di sicurezza sono stati determinati con l'impiego di diversi metodi di calcolo, sia semplificati che rigorosi; in particolare si sono calcolati i risultati con i metodi semplificati di Janbu e Bishop e con quelli rigorosi del GLE (Morgestern e Price) e di Spencer. Nelle Figure esemplificative riportate a seguire sono tracciate unicamente le superfici di scivolamento che determinano un F_s minimo globale, calcolato utilizzando i quattro approcci sopradescritti.

Le caratteristiche geotecniche degli orizzonti litostratigrafici sono riportate in Tabella 9 e corrispondono ai valori caratteristici derivanti dalla campagna di indagini e già riportate in precedenza nella presente relazione. Il rilevato arginale è stato considerato uniforme, con angolo di attrito pari a 35° e coesione nulla. Tali assunzioni hanno ovviamente un carattere preliminare e dovranno essere verificate ed eventualmente aggiornate in sede di progetto esecutivo. I livelli di invaso e di falda considerati nelle verifiche, sono quelli massimi previsti con il bacino completamente riempito fino alla quota dello sfioratore di superficie. Per la verifica in caso di rapido svaso il livello della falda è mantenuto coincidente con la superficie del paramento di monte fino allo svuotamento completo del bacino. Queste situazioni rappresentano i casi limite maggiormente critici per la stabilità del rilevato e sono dunque quelle maggiormente cautelative.

I valori minimi dei Fattori di Sicurezza globali, ottenuti con questa analisi di stabilità preliminare, sono riportati nella Tabella 11 a seguire, riferiti alla sezione esaminata e suddivisi per condizione di carico e per approccio normativo prescelto (Tabella 12).

Data la sostanziale simmetria del rilevato arginale, si è ritenuto superfluo realizzare la verifica di stabilità lato campagna ricordando tuttavia che, ove lungo le arginature si prevedessero conformazioni geometriche diverse, sarebbe necessario provvedere a verifiche di stabilità puntuali.

Sempre in sede di progetto esecutivo dovranno essere realizzate anche le verifiche di stabilità in condizioni sismiche, in accordo con quanto descritto e riportato nella relazione relativa all'Analisi di Risposta Sismica Locale e Definizione dell'Azione Sismica di Progetto (vd. elaborato BAG 1.02 Relazione tecnica). In tale documento, al Cap. 4, si evidenzia come le Verifiche di sicurezza allo Stato Limite Ultimo andrebbero sviluppate, per questa categoria di opera, considerando il Limite di Salvaguardia della Vita (SLV); in accordo al D.M. 14/01/2008 tale limite risulta associato ad un tempo di ritorno dell'azione sismica di 1898 anni che determina una accelerazione orizzontale massima attesa sul sito di riferimento rigido pari a 0.237 g. Per le verifiche allo Stato Limite di Esercizio occorre considerare lo Stato Limite di Danno (SLD) per il quale il tempo di ritorno sull'azione sismica risulta pari

a 201 anni ed la corrispondente accelerazione orizzontale massima attesa sul sito di riferimento rigido pari a 0.112 g. La suddetta relazione fornisce anche i valori di amplificazione attesi in relazione alle diverse profondità del bedrock sismico e dovrebbe essere considerata per definire i valori dei coefficienti moltiplicativi orizzontale e verticale da impiegarsi nell'analisi pseudostatica.

Tabella 9: Valori caratteristici delle proprietà meccaniche dei vari orizzonti utilizzati nelle verifiche di stabilità.

Property	Rilevato Arginale	Ghiaie attuali - Orizzonte 1	Alternanze Ghiaie Sabbie - Orizzonte 2	Argille - Orizzonte 3	Diaframma
Color					
Strength Type	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb	Mohr-Coulomb
Unit Weight [kN/m3]	19	17	18	20	22
Cohesion [kPa]	0	0	0	25	15
Friction Angle [deg]	35	32	30	23	35
Water Surface	Water Table	Water Table	Water Table	Water Table	None
Hu Value	1	1	1	1	
Ru Value					0

Tabella 12: Riepilogo dei coefficienti moltiplicativi riferiti agli approcci di calcolo basati sull'Eurocodice 7.

	Design Approach 1, Combination 1	Design Approach 1, Combination 2
Type	Partial Factor	Partial Factor
Permanent Actions: Unfavourable	1.35	1
Permanent Actions: Favourable	1	1
Variable Actions: Unfavourable	1.5	1.3
Variable Actions: Favourable	0	0
Effective cohesion	1	1.25
Coefficient of shearing resistance	1	1.25
Undrained strength	1	1.4
Weight density	1	1
Shear strength (other models)	1	1.25
Earth resistance	1	1
Tensile and plate strength	1.1	1.1
Shear strength	1.1	1.1
Compressive strength	1.1	1.1
Bond strength	1.1	1.1
Seismic Coefficient	1	1

Tabella 11: Riepilogo dei Fattori di Sicurezza Globali minimi determinati nelle varie condizioni di carico e con diversi Approcci Normativi

Design Standard	Load Condition	Minimum Global Safety Factors			
		Bishop Simplified	Janbu simplified	GLE Morgenstern-Price	Spencer
Eurocode 7 - Design Approach 1, Combination 1	Full Reservoir	1.78	1.68	1.79	1.78
Eurocode 7 - Design Approach 1, Combination 2	Full Reservoir	1.39	1.35	1.39	1.39
Eurocode 7 - Design Approach 1, Combination 1	Empty Reservoir	1.87	1.85	1.86	1.86
Eurocode 7 - Design Approach 1, Combination 1	Empty Reservoir	1.87	1.85	1.86	1.86
Eurocode 7 - Design Approach 1, Combination 1	Rapid Drawdown	1.22	1.06	1.22	1.22
Eurocode 7 - Design Approach 1, Combination 2	Rapid Drawdown	0.73	0.72	0.73	0.73

Il Responsabile della Convenzione
Prof. Ing. Andrea Segalini

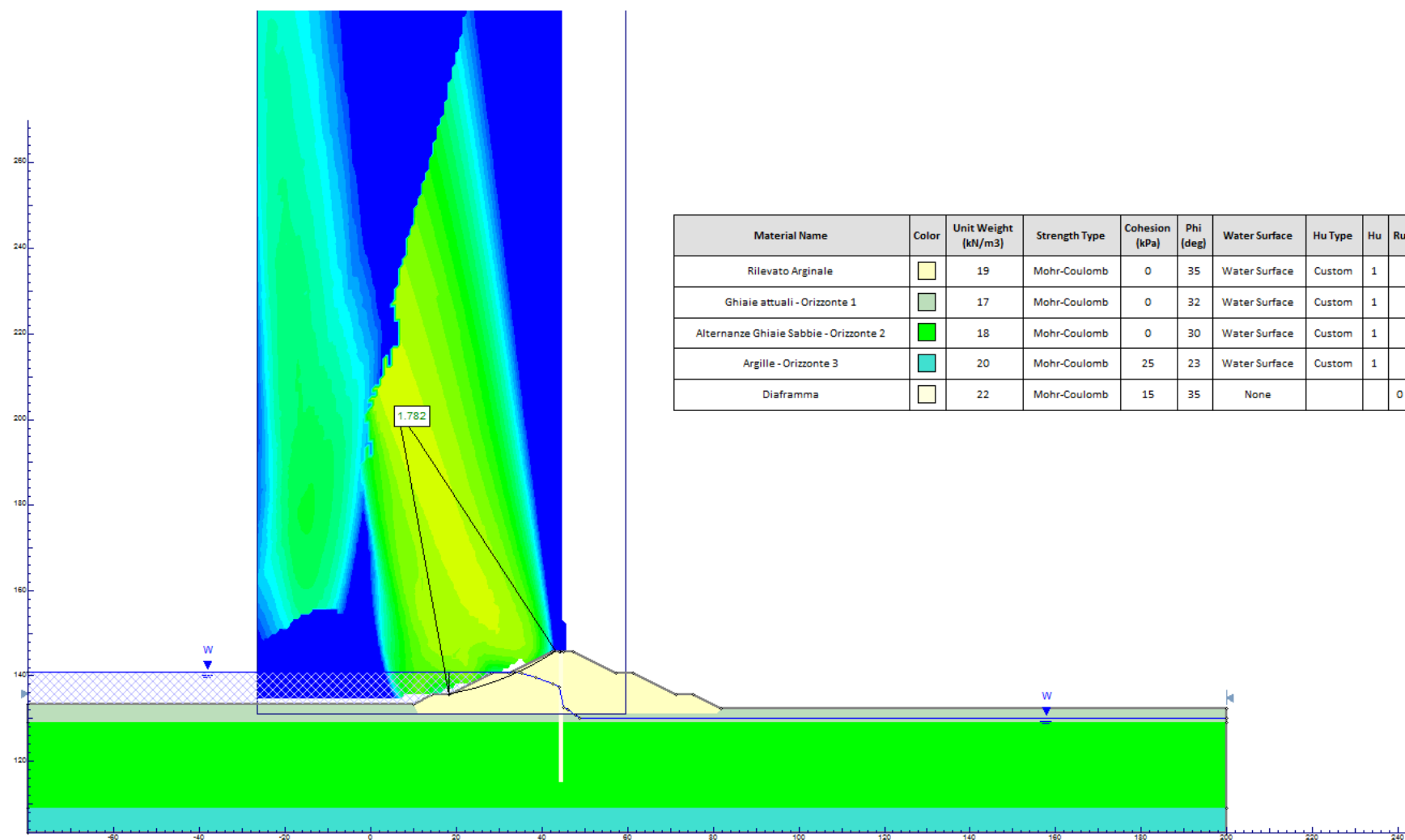


Figura 8: Analisi di stabilità del rilevato con bacino pieno fino alla quota di sfioro; EC7, Approccio 1 Combinazione 1

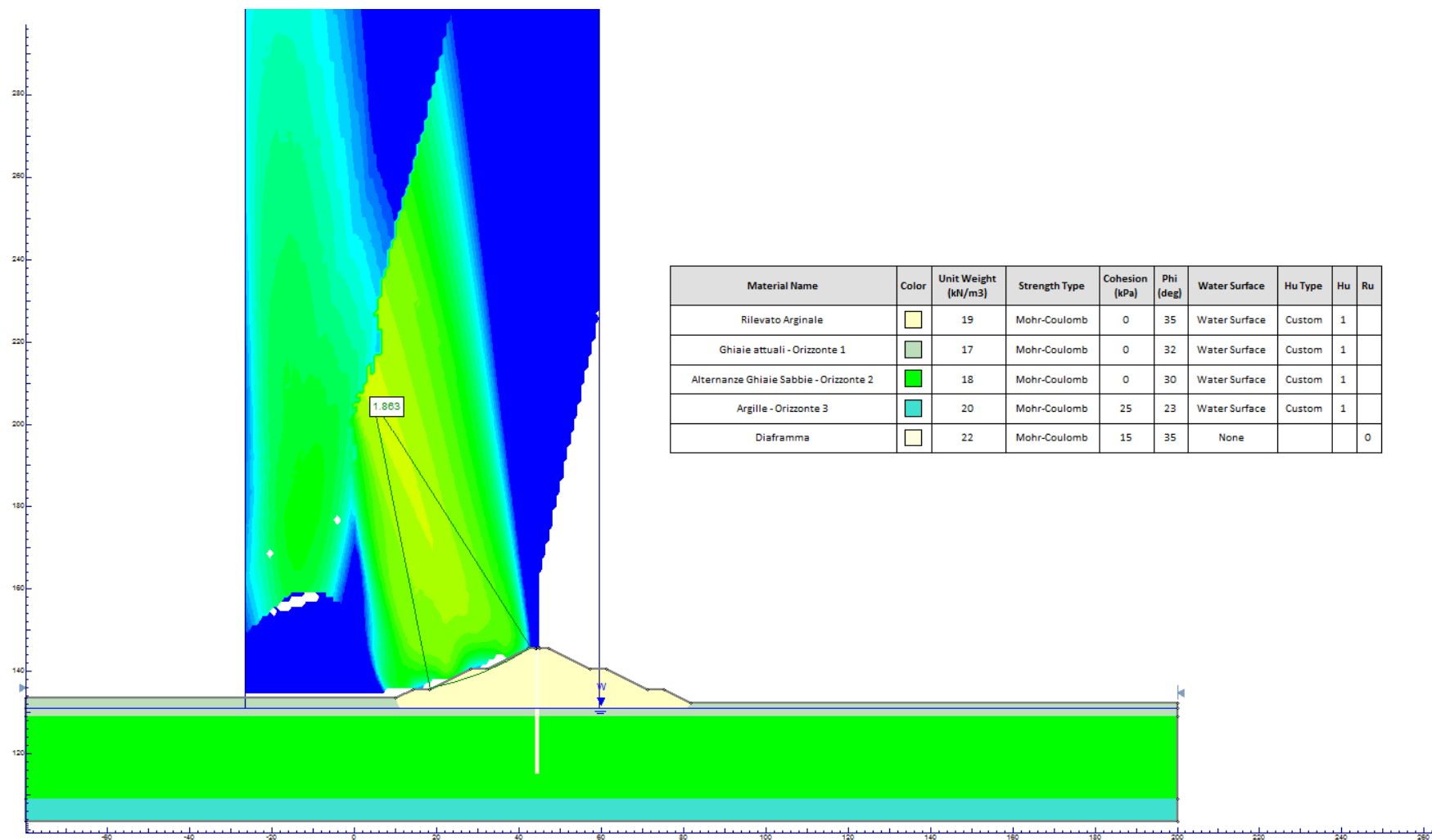


Figura 9: Analisi di stabilità con bacino completamente vuoto, EC7 Approccio 1 Combinazione 2

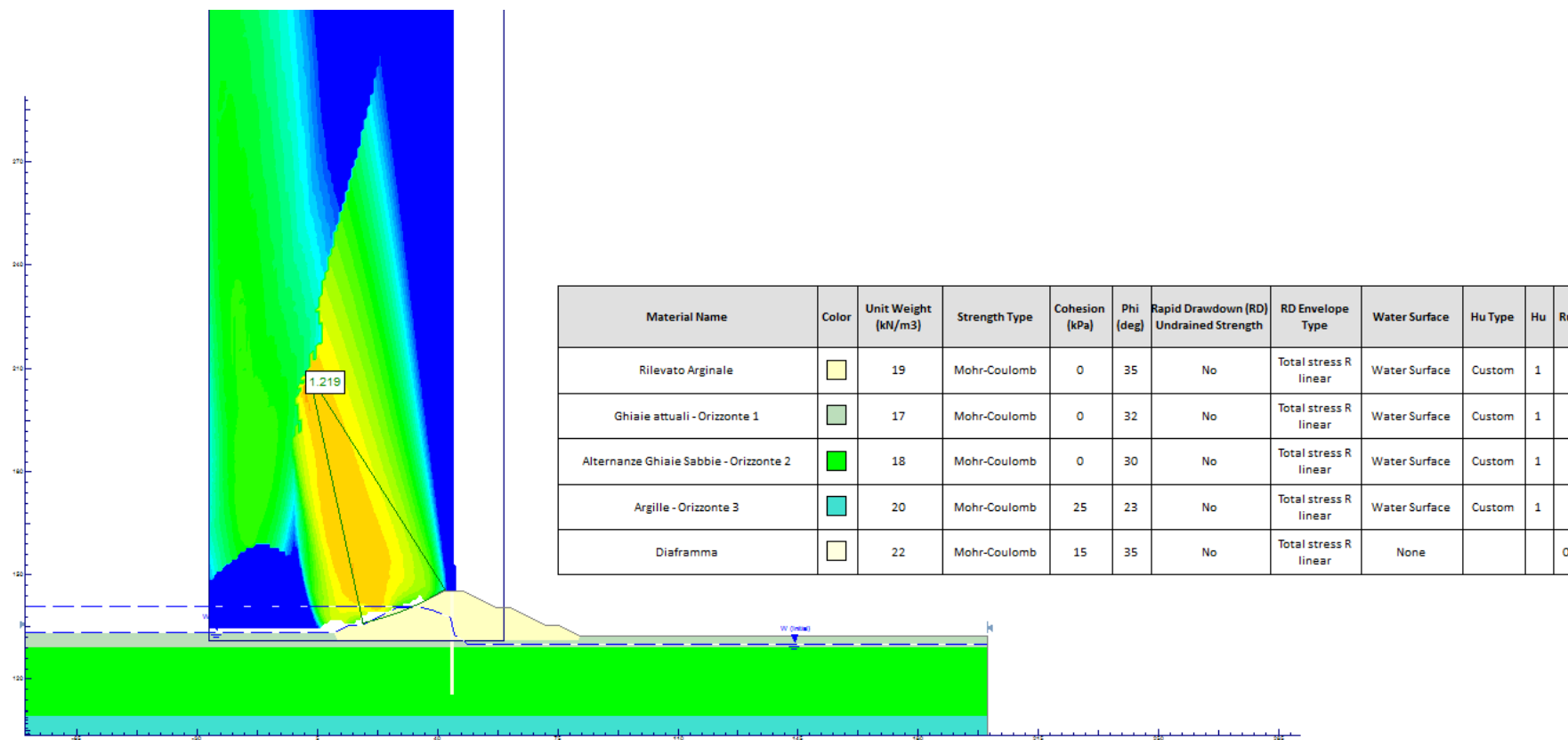


Figura 10: Analisi di stabilità in caso di rapido svasso a partire dalla quota di sfioro, EC7 Approccio 1 Combinazione