



**REGIONE
LAZIO**

**DIREZIONE REGIONALE INFRASTRUTTURE,
AMBIENTE E POLITICHE ABITATIVE**

**LAVORI DI RIPRISTINO DELL'OFFICIOSITA' DEL FOSSO DI
PRATOLUNGO COMPRESA LA M.S. DELL'ALVEO E LA COSTITUZIONE
DI OPPORTUNE OPERE DI ACCUMULO E
LAMINAZIONE DELLE PIENE - II LOTTO**

**PROGETTO ESECUTIVO
PERIZIA DI VARIANTE E SUPPLETIVA**

**STUDI SPECIALISTICI
GEOTECNICA
Relazione Geotecnica**

IMPRESA DI COSTRUZIONE:
ATI:

RESPONSABILE DEL PROCEDIMENTO
Dott. Dario Maturro



(capogruppo)



(mandante)

PROGETTISTI:

DIREZIONE DEI LAVORI
Ing. Severino Marasco



(mandataria)
Prof. Ing. Marco Petrangeli
Ing. Geol. Massimo Pietrantonì



(mandante)
Ing. Luciano Landolfi
Ing. Roberto De Gennaro
Ing. Antonio Petti

STUDI GEOLOGICI:

Ing. Geol. Massimo Pietrantonì

CODICE ELABORATO	RIFERIMENTO ELABORATO							SCALA
	R	IN	122	GT	-	RE 101	-	R 2
	RIN122GT-RE101-R2							-

rev	Data	Redazione	Verifica	Approvazione	Visto committente	Descrizione
0	11/2013	A. Tagliaferri	M. Pietrantonì	M. Petrangeli		
1	11/2013	A. Tagliaferri	M. Pietrantonì	M. Petrangeli		A seguito di istruttoria del Servizio Dighe
2	08/07/2015	A. Tagliaferri	M. Pietrantonì	M. Petrangeli		Ottemperanza prescrizioni. Consegna definitiva

INDICE

1	PREMESSA.....	3
2	NORMATIVA E RACCOMANDAZIONI DI RIFERIMENTO.....	4
3	INQUADRAMENTO GEOLOGICO SINTETICO	5
4	INDAGINI GEOTECNICHE.....	5
4.1	Indagini eseguite	5
4.2	Elenco e risultati delle indagini	7
4.2.1	Premessa. Suddivisione in Unità geotecniche	7
4.2.2	Sondaggi a carotaggio continuo (2009-2013)	8
4.2.3	Pozzetti geognostici (2013)	8
4.2.4	Prove Penetrometriche dinamiche in foro SPT (2009-2013)	9
4.2.5	Prove dilatometriche DMT(2009)	10
4.2.6	Prove di permeabilità in foro tipo Lefranc (2009-2013).....	15
4.2.7	Prove di laboratorio (2009-2013).....	17
5	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI.....	21
5.1	Sequenza lito-stratigrafica e modello geotecnico	21
5.2	Unità geotecnica A. Depositi alluvionali.....	23
5.2.1	Caratteristiche fisiche	23
5.2.2	Caratteristiche meccaniche	26
5.2.3	Caratteristiche di permeabilità	28
5.3	Unità geotecnica B: Piroclastiti (Complesso vulcanico)	30
5.3.1	Caratteristiche fisiche	30
5.3.2	Caratteristiche meccaniche	31
5.3.3	Caratteristiche di permeabilità	32
5.4	Unità geotecnica C1: Sabbie e ghiaie.....	32
5.4.1	Caratteristiche fisiche	32
5.4.2	Caratteristiche meccaniche	32
5.4.3	Caratteristiche di permeabilità	33
5.5	Unità geotecnica C2: Limi argillosi ocra	33
5.5.1	Caratteristiche fisiche	33
5.5.2	Caratteristiche meccaniche	34
5.5.3	Caratteristiche di permeabilità	34
5.6	Unità geotecnica D: limi argillosi del substrato pleistocenico	35
5.6.1	Caratteristiche fisiche	35
5.6.2	Caratteristiche meccaniche	37
5.6.3	Caratteristiche di permeabilità	38
5.7	Modello geotecnico.....	39
6	IDROGEOLOGIA	40
6.1	Inquadramento generale	40
6.2	Misure piezometriche.....	40



1 PREMESSA

Il presente documento fa parte del Progetto Esecutivo degli interventi di protezione idraulica del fosso di Pratolungo, nel Comune di Roma.

Il progetto prevede la realizzazione di una vasca di laminazione in linea, tramite uno sbarramento in terra trasversale al corso d'acqua, ubicato poco più di 2 km a monte della confluenza nel fiume Aniene, circa 150m a monte di via di S. Alessandro. Lo sbarramento ha una lunghezza di circa 400m, con una quota di coronamento a m 33 s.l.m. ed una altezza dell'ordine della decina di metri rispetto al piano di campagna.

La regolazione avviene tramite un manufatto in calcestruzzo lungo 48m, formato da uno sfioratore composto di 4 soglie libere, con sistemi di regolazione e controllo delle portate presidiati da paratoie e panconi. A valle è prevista una vasca di dissipazione per riconvogliare le portate sfiorate nel fosso.

Nella presente Relazione viene esposta e commentata la caratterizzazione geotecnica dei terreni e il modello geotecnico di specifico interesse per il dimensionamento delle opere in progetto.

Per la definizione del modello geotecnico si è fatto riferimento ai risultati delle indagini eseguite per il progetto definitivo e delle indagini integrative effettuate dall'Impresa nella fase esecutiva. Il presente documento costituisce quindi un aggiornamento dei precedenti studi geotecnici.

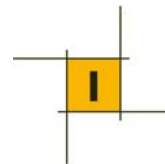
La documentazione sulle indagini integrative è contenuta nell'elaborato n. IN-RE101 facente parte del progetto esecutivo. La documentazione sulle precedenti indagini è invece allegata alla documentazione di gara messa a disposizione dall'Amministrazione Appaltante.

Dal punto di vista geotecnico, le opere di maggiore importanza comprese in questo progetto sono rappresentate dalla diga in terra con il relativo manufatto di regolazione e dall'argine a protezione degli edifici storici.

A seguito dell'istruttoria della Commissione pre-Comitato Tecnico Regionale l'argine a protezione degli edifici storici è stato stralciato dal progetto; dunque ogni riferimento a quest'ultimo, contenuto all'interno della presente relazione, è da considerarsi superato. L'esame dei risultati eseguiti in questo sito è comunque utile per l'analisi globale delle condizioni geotecniche.

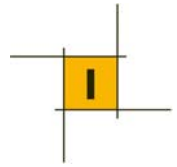
I risultati delle verifiche geotecniche della diga in terra sono contenuti nella relazione geotecnica di calcolo RA-RE101. Le verifiche delle fondazioni del manufatto in calcestruzzo sono riportate nella relazione ST-RE104.

L'area in esame ricade in zona sismica 2B secondo la vigente classificazione (ordinanza n. 3274 del 08/05/2003 e s.m.i. e DGR n. 387 del 22.05.2009). Le verifiche sismiche sono state condotte secondo quanto previsto nella citata ordinanza e successivi aggiornamenti, facendo riferimento alle Norme Tecniche per le Costruzioni D.M. 14/01/2008 e Circolare Min. del 02/02/2009 n. 617. E' stato effettuato uno studio di Risposta Sismica Locale.



2 **NORMATIVA E RACCOMANDAZIONI DI RIFERIMENTO**

- D. .M. 11 marzo 1988. “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”.
- Circ. LL.PP. 24 settembre n. 30483. “Istruzioni riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, l’esecuzione ed il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”.
- Eurocodice 7. Progettazione geotecnica. 2004.
- Eurocodice 8. Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture. Parte 5: Fondazioni, strutture di contenimento ed aspetti di geotecnica. 2004.
- Ordinanza n. 3274 del 08/05/2003 della Presidenza del Consiglio dei Ministri "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" e relativi allegati e s.m.i.
- Ordinanza n. 3519 del PdCM del 28 aprile 2006 “Criteri generali per l’individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l’aggiornamento degli elenchi delle medesime zone”.
- Norme Tecniche per le Costruzioni. DM 14 gennaio 2008.
- Istruzione per l’applicazione delle Norme Tecniche. Circ. Min. 2 febbraio 2009 n. 617
- D.M. 24 marzo 1982. “Norme tecniche per la progettazione e la costruzione delle dighe di sbarramento”.
- D.M. 26 giugno 2014 “Norme tecniche per la progettazione e la costruzione degli sbarramenti di ritenuta (dighe e traverse)”.
- Delibera della Giunta regionale del Lazio n. 387 del 22.05.2009 Nuova classificazione sismica del territorio della Regione Lazio in applicazione dell’Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n° 3519 del 28 Aprile 2006 e della DGR Lazio 766/03.
- Deliberazione 17 ottobre 2012, n. 489 Modifica dell’Allegato 2 della DGR Lazio n. 387 del 22 maggio 2009.
- Raccomandazioni AGI sulla Programmazione ed Esecuzione delle Indagini Geotecniche (1977)
- Raccomandazioni AGI sui pali di fondazione (1988).
- Raccomandazioni AGI sulle Prove Geotecniche di Laboratorio (1994).
- Raccomandazioni AGI Aspetti Geotecnici della Progettazione in Zona Sismica (1995)



3 INQUADRAMENTO GEOLOGICO SINTETICO

Dal punto di vista **geologico** il sito di progetto ricade nell'area di fondovalle del Fosso di Pratolungo, nell'ambito del dominio vulcanico dei Colli Albani.

Le sponde della valle sono incise nelle formazioni vulcaniche delle "pozzolane rosse" e del "tufo lionato".

La serie vulcanica è sovrapposta ad una formazione di transizione di ambiente fluvio-palustre costituita da limi di colore avana-ocra con inclusioni di travertino; sulla sponda sinistra i sondaggi hanno attraversato uno strato dello spessore di alcuni metri di ghiaie sabbiose, stratigraficamente attribuibile alla formazione fluvio-palustre, ma distinte granulometricamente dal resto della formazione, prevalentemente limosa. I depositi ghiaiosi sono da attribuire ad un paleoalveo dell'antico corso d'acqua.

I terreni fluvio-palustri ricoprono la serie argillosa marina plio-pleistocenica che costituisce il substrato geologico dell'intera zona romana.

I terreni sedimentari sottostanti la serie vulcanica non sono affioranti sulle sponde (perché a quote inferiori a quelle del piede delle sponde stesse), mentre nell'area di fondovalle sono coperti dai terreni alluvionali di recente messa in posto, a granulometria prevalentemente limo-argillosa.

L'idrogeologia dell'area è caratterizzata dalla presenza di una falda idrica corrispondente al livello del corso d'acqua. La falda trae alimentazione dall'infiltrazione nei terreni vulcanici, mediamente o molto permeabili, che costituiscono le sponde della valle. La falda emerge in alcuni punti localizzati e alimenta la falda di sub-alveo del corso d'acqua.

Per maggiori dettagli si rimanda alla Relazione Geologica.

4 INDAGINI GEOTECNICHE

4.1 *Indagini eseguite*

Si è fatto riferimento ai risultati della campagna di indagini geognostiche e geotecniche eseguita nell'ottobre 2009, a supporto del **progetto definitivo**, che è consistita nelle seguenti attività:

- 6 sondaggi a carotaggio continuo;
- 7 prove dilatometriche Marchetti delle quali 3 con dilatometro sismico per la misura della velocità delle onde di taglio e con 14 prove di dissipazione.
- 13 prove penetrometriche dinamiche SPT;
- 13 prove Lefranc di permeabilità a carico costante e variabile;
- installazione di 3 piezometri Casagrande in altrettanti sondaggi;
- 1 prova geosismico down-hole in foro di sondaggio;
- 5 stendimenti geoelettrici;

- prelievo di 17 campioni per le prove di laboratorio geotecnico, dei quali 12 indisturbati e 5 rimaneggiati, sui quali sono state effettuate le seguenti prove.
 - 17 analisi granulometriche;
 - 12 determinazioni del peso di volume naturale;
 - 12 determinazioni del contenuto naturale d'acqua;
 - 11 determinazioni dei limiti di Atterberg;
 - 11 prove di taglio diretto;
 - 3 prove triassiali non consolidate non drenate (UU);
 - 10 prove di compressione edometrica.

Le suddette indagini hanno riguardato esclusivamente la zona dello sbarramento principale con il relativo manufatto in calcestruzzo di regolazione.

In fase di **progetto esecutivo** è stata eseguita una integrazione d'indagine che ha riguardato la zona del rilevato arginale a protezione degli edifici storici (opera successivamente stralciata), non precedentemente indagata, la zona dell'invaso e, infine, lo sbarramento principale a completamento della precedente indagine.

Complessivamente sono quindi state eseguite le seguenti indagini.

Argine a protezione degli edifici storici

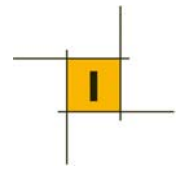
- 2 sondaggi a carotaggio continuo della profondità di 15 m (S1 e S2);
- installazione di due piezometri a tubo aperto;
- 5 pozzetti geognostici;
- 10 prove penetrometriche dinamiche SPT;
- 6 prove Lefranc di permeabilità;
- prelievo di 11 campioni per le prove di laboratorio geotecnico, dei quali 6 indisturbati e 5 rimaneggiati (da pozzetti), sui quali sono state effettuate le seguenti prove.
 - 11 analisi granulometriche;
 - 6 determinazioni del peso di volume naturale;
 - 6 determinazioni del contenuto naturale d'acqua;
 - 11 determinazioni dei limiti di Atterberg;
 - 2 prove di taglio diretto;
 - 2 prove triassiali non consolidate non drenate (UU);
 - 2 prove triassiali consolidate non drenate con misura delle pressioni neutre (CIU);
 - 3 prove di compressione edometrica.

Zona dell'invaso

- 2 sondaggi a carotaggio continuo della profondità di 12 m (S3 e S4);
- installazione di due piezometri a tubo aperto;
- 6 prove Lefranc di permeabilità.

Sbarramento principale

- 2 sondaggi a carotaggio continuo della profondità di 30 e 38.5 m;



- installazione di due piezometri a tubo aperto;
- 9 pozzetti geognostici;
- 16 prove penetrometriche dinamiche SPT;
- 10 prove Lefranc di permeabilità;
- prelievo di 28 campioni per le prove di laboratorio geotecnico, dei quali 8 indisturbati e 20 rimaneggiati (da pozzetti), sui quali sono state programmate le seguenti prove.
 - 23 analisi granulometriche;
 - 3 determinazioni del peso di volume naturale;
 - 3 determinazioni del contenuto naturale d'acqua;
 - 23 determinazioni dei limiti di Atterberg;
 - 1 prova di taglio diretto;
 - 1 prova triassiale non consolidata non drenata (UU);

La documentazione su queste indagini è contenuta nell'elaborato IN-RE-101, mentre l'ubicazione di tutte le indagini (comprese quelle del progetto definitivo) è illustrata nella planimetria dell'elaborato IN-PL-101. I sondaggi del progetto esecutivo sono indicati con la sigla /2013.

4.2 Elenco e risultati delle indagini

4.2.1 Premessa. Suddivisione in Unità geotecniche

Nel progetto definitivo era stata proposta una suddivisione in unità geotecniche che traeva origine dalla sequenza litostratigrafia illustrata nel profilo geologico allegato al progetto.

A seguito delle integrazioni di indagini e della conseguente reinterpretazione anche delle precedenti indagini (v. nel dettaglio la Relazione Geologica del progetto esecutivo), il modello geologico è stato leggermente cambiato e di conseguenza anche il modello geotecnico. Nella sostanza non sono state apportate modifiche importanti ai parametri geotecnici dei terreni, ma per congruenza è stato necessario rivedere la suddivisione in unità geotecniche e il loro andamento nel sottosuolo. Per evitare incomprensioni è stata modificata anche la nomenclatura delle unità, utilizzando sigle in lettere invece che in numeri. Tale nuova catalogazione è descritta e commentata nel Capitolo 5 seguente: in questo capitolo viene anche indicata, per comparazione, la corrispondenza tra le sigle delle unità geotecniche utilizzate nel progetto esecutivo e in quello definitivo.

Nei paragrafi seguenti, elencando i risultati delle indagini, si farà riferimento a volte anche alle corrispondenti unità geotecniche cui si riferiscono i dati di indagine: in questo caso si farà riferimento alle sigle in lettere della suddivisione del progetto definitivo e, tra parentesi, la sigla in numero (laddove indicata nella Relazione geotecnica del progetto definitivo). Quando viene inserito un punto interrogativo l'attribuzione non è sicura trattandosi di una interpretazione delle stratigrafie e delle foto delle cassette del progetto definitivo.

4.2.2 Sondaggi a carotaggio continuo (2009-2013)

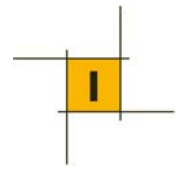
Sondaggio	Quota boccaforo	Profondità	Prof. falda dal p.c.	Prove S.P.T.	Campioni prelevati	Prove Lefranc	Attrezzatura foro
	(m s.l.m.)	(m)	(m)	n.	n.		
S1	25,04	30	- 2,80	3	2	4	Piezometro
S2	23,60	30	- 2,00	3	2	3	Piezometro
S3	23,31	40	- 1,90	3	7	3	Down hole
S4	31,17	30	- 9,60	0	4		Piezometro
S4B	23,86	12	- 2,30	2	0	3	----
S5	24,41	20	- 3,00	2	2		----
S1/2013	26,03	15	-1,50	5	3	3	Piezometro
S2/2013	27,97	15	-3,33	5	3	3	Piezometro
S3/2013	24,24	12	-2,35			3	Piezometro
S4/2013	23,55	12	-1,70			3	Piezometro
S5/2013	32,88	38	-9,80	6	3	5	Piezometro
S6/2013	23,09	30	-1,65	10	5	5	Piezometro

4.2.3 Pozzetti geognostici (2013)

Sondaggio	Quota	Profondità	Prof. falda dal p.c.	Campioni prelevati
	(m s.l.m.)	(m)	(m)	n.
Pz1	26,20	2,8	- 1,3	1
Pz2	26,08	3,0	- 1,5	1
Pz3	25,96	2,6	- 1,3	1
Pz4	26,5	2,8	- 1,4	1
Pz5	25,21	2,8	- 1,3	1
Pz6	23,34	5,5	n.d.	3
Pz7	23,57	5,5	n.d.	5
Pz8	23,19	5,5	n.d.	5
Pz9	23,09	5,5	n.d.	3
Pz10	23,38	5,3	-2.5 (uscita acqua, liv. non stab.)	
Pz10bis	23,35	5,0	-3.5 (uscita acqua, liv. non stab.)	
Pz11	24,07	5,0	-2.5 (uscita acqua, liv. non stab.)	
Pz12	25,62	1,3	n.d.	
Pz13	23,46	6,0	-1,63	

4.2.4 Prove Penetrometriche dinamiche in foro SPT (2009-2013)

Sondaggio	Profondità (m)	Unità geotecnica	Numero colpi N	N _{SPT}
S 1	3.00	A	1-2-4	6
S 1	6.00	B2	3-4-7	11
S 1	15.00	D (?)	11-17-24	41
S 2	3.00	A	5-3-2	5
S 2	9.00	A o C2 (?)	4-5-8	13
S 2	18.00	A o C2 (?)	1-2-2	4
S 3	3.00	A	6-8-10	18
S 3	9.00	A	5-8-10	18
S 3	15.00	A	6-7-9	16
S 4b	3.00	A	1-1-1	2
S 4b	9.00	C1	30-31-24	55
S 5	3.00	A	2 (45 cm)	-
S 5	6.00	B2 (?)	4-5-5	10
S1/2013	3.00	A	3-3-4	7
S1/2013	6.00	A	3-3-4	7
S1/2013	9.00	A	2-2-4	6
S1/2013	12.00	A	6-11-14	25
S1/2013	15.50	A	5-8-14	22
S2/2013	3.00	A	4-30-33	63
S2/2013	6.00	A	5-8-10	18
S2/2013	9.00	A	8-12-17	29
S2/2013	12.00	A	7-10-13	23
S2/2013	15.50	A	9-8-12	20
S5/2013	3.00	B1	RIF	-
S5/2013	6.00	B1	13-22-33	55
S5/2013	9.00	B1	16-28-32	60
S5/2013	12.50	B2	10-11-15	26
S5/2013	15.00	B2	10-10-12	22
S5/2013	18.50	C2	14-18-12	30
S6/2013	3.50	A	4-4-5	9
S6/2013	7.50	A	3-5-7	12
S6/2013	11.00	A	3-5-6	11
S6/2013	13.50	A	3-4-6	10
S6/2013	15.00	A	2-3-2	5
S6/2013	18.00	A	3-2-5	7
S6/2013	20.00	A	3-3-4	7



S6/2013	23.00	A	4-4-5	9
S6/2013	25.00	D	3-5-6	11
S6/2013	27.00	D	8-7-9	16

4.2.5 Prove dilatometriche DMT(2009)

Per il progetto definitivo sono state eseguite 7 prove DMT lungo l'asse del rilevato arginale di progetto. In particolare 5 prove sono state ubicate in corrispondenza delle spalle dell'argine o ai piedi della spalle stesse (DMT1 e DMT2 in destra, SDMT4, DMT5 e DMT5b in sinistra) mentre le altre due prove (SDMT3 e SDMT3b) sono state condotte sulla piana.

Tre delle prove eseguite (SDMT3, SDMT3b e SDMT4) sono state effettuate con dilatometro sismico al fine di misurare la velocità delle onde sismiche. Nella tabella seguente sono riassunte le prove eseguite.

Prova dilatometrica	Quota (m s.l.m.)	Profondità (m)	Indagine sismica V_{s30}
DMT1	26,13	4	
DMT2	23,37	40	
SDMT3	22,84	30	X
SDMT3B	23,28	30	X
SDMT4	23,40	30	X
DMT5	28,22	4	
DMT5B	27,81	30	

L'attrezzatura e le metodologie di misura utilizzate sono conformi alle raccomandazioni contenute nei documenti ASTM, Eurocode 7 e ISSMGE TC16.

Nella documentazione sulle indagini, oltre ai risultati delle misure dirette strumentali (pressioni p_o e p_i) e ai valori dei tre parametri indice (I_d Indice di materiale, K_d Indice di spinta orizzontale, E_d Modulo dilatometrico), sono riportati anche i parametri ricavati dall'applicazione delle correlazioni del TC16 (2001):

- M Modulo edometrico (terreni sia coesivi che granulari)
- c_u Coesione non drenata (terreni coesivi)
- K_o Coefficiente di spinta a riposo (terreni coesivi)
- OCR Grado di sovraconsolidazione (terreni coesivi)
- Angolo di attrito (terreni incoerenti)

Nelle prove eseguite con il dilatometro sismico (SDMT) è stato ricavato il profilo del terreno caratterizzato dalla velocità di propagazione delle onde di taglio V_s . Il metodo è analogo alla prova down-hole in quanto si effettuano le misure delle velocità a varie profondità, tramite un ricevitore che è calato nel terreno insieme alla lama dilatometrica, a seguito di una energizzazione effettuata in superficie.

Nelle figure seguenti sono riassunti i risultati delle prove dilatometriche in termini di andamento lungo la verticale indagata dell'indice di materiale, del modulo edometrico, della resistenza al taglio non drenata e della velocità delle onde di taglio.

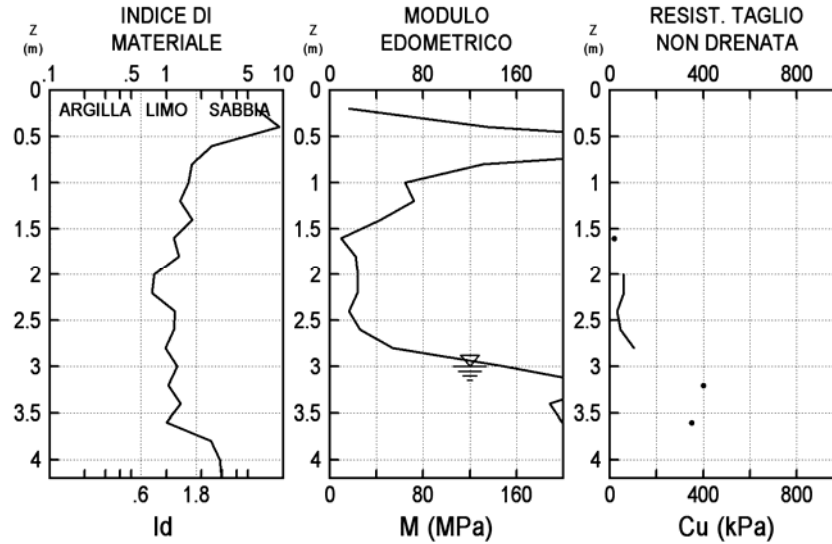


Figura 1 - Risultati prova dilatometrica DMT1

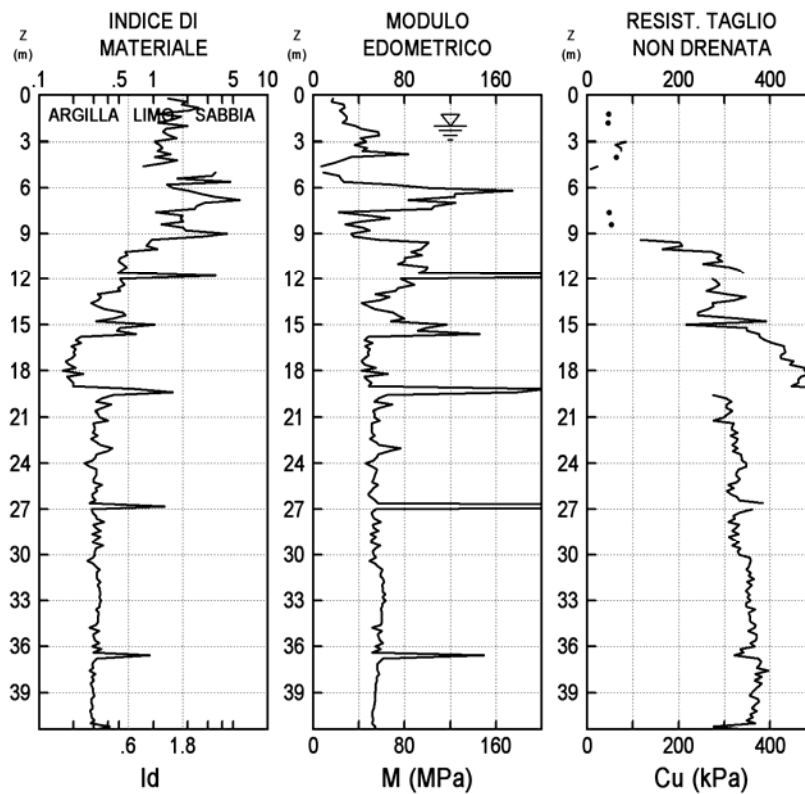


Figura 2 - Risultati prova dilatometrica DMT2

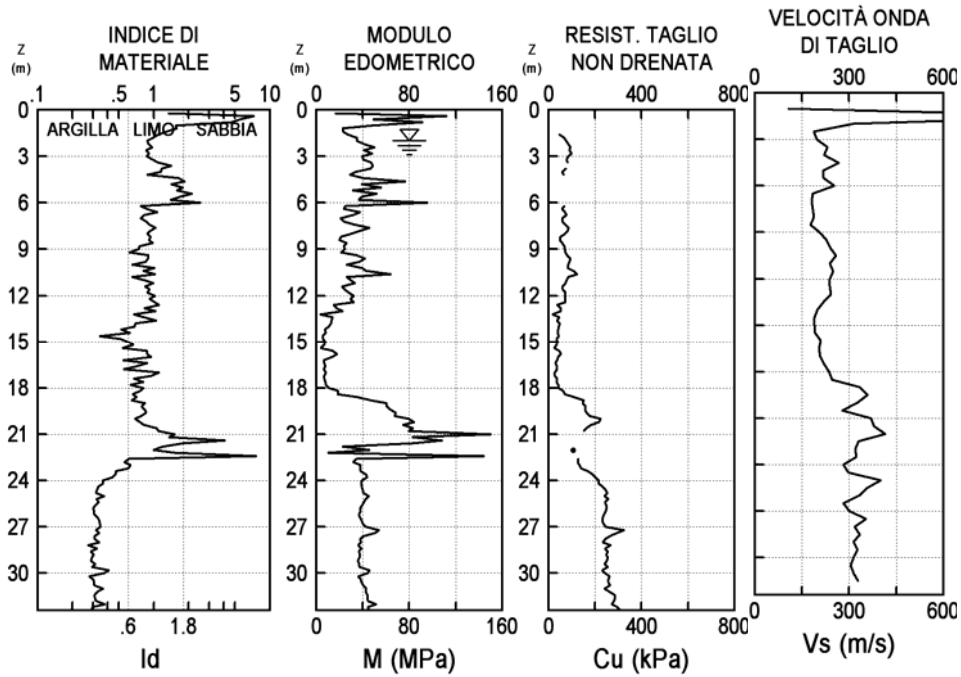


Figura 3 - Risultati prova dilatometrica SDMT3

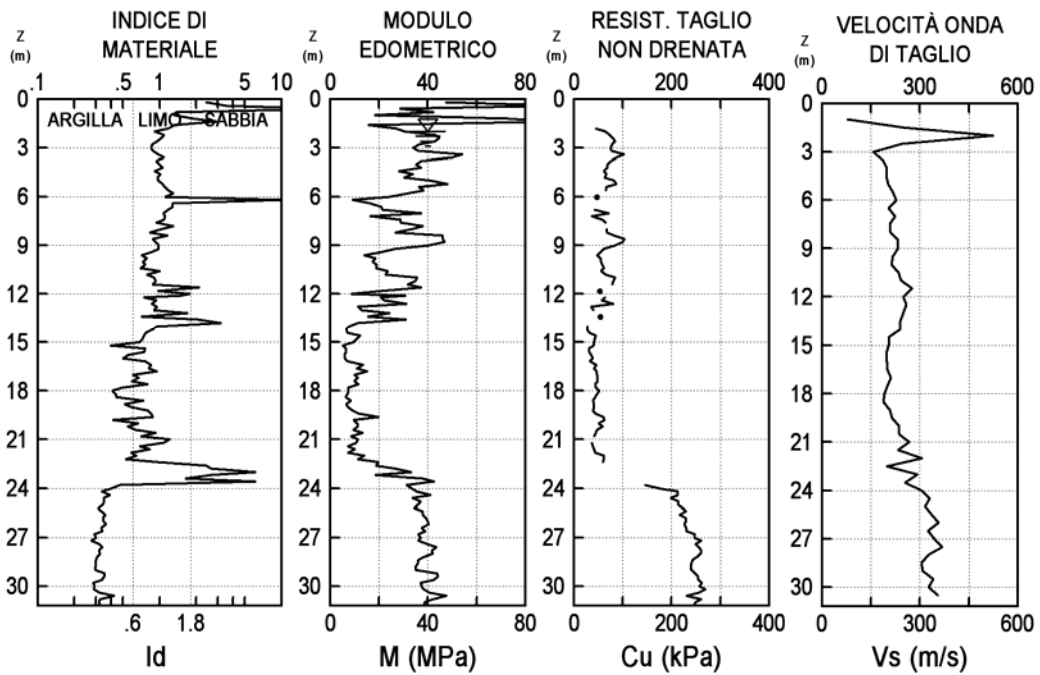


Figura 4 - Risultati prova dilatometrica SDMT3b

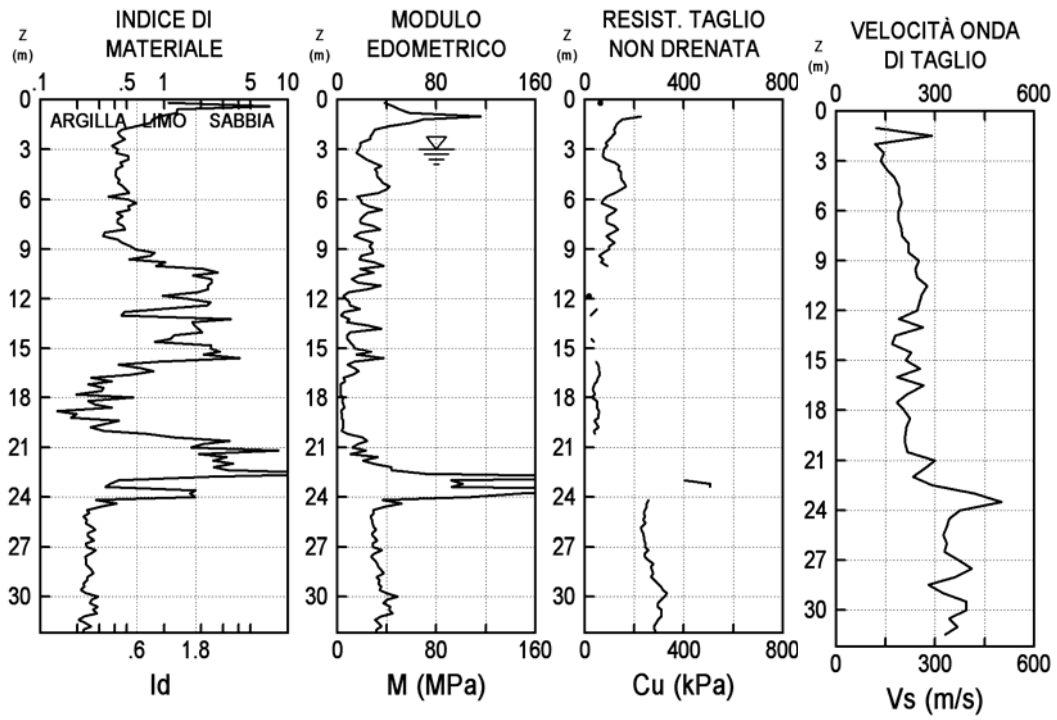


Figura 5 - Risultati prova dilatometrica SDMT4

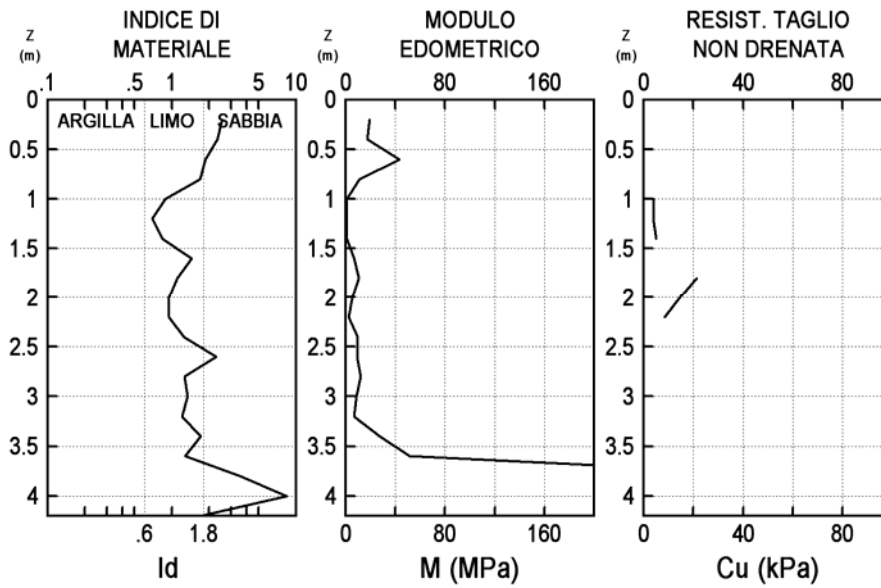


Figura 6 - Risultati prova dilatometrica DMT5

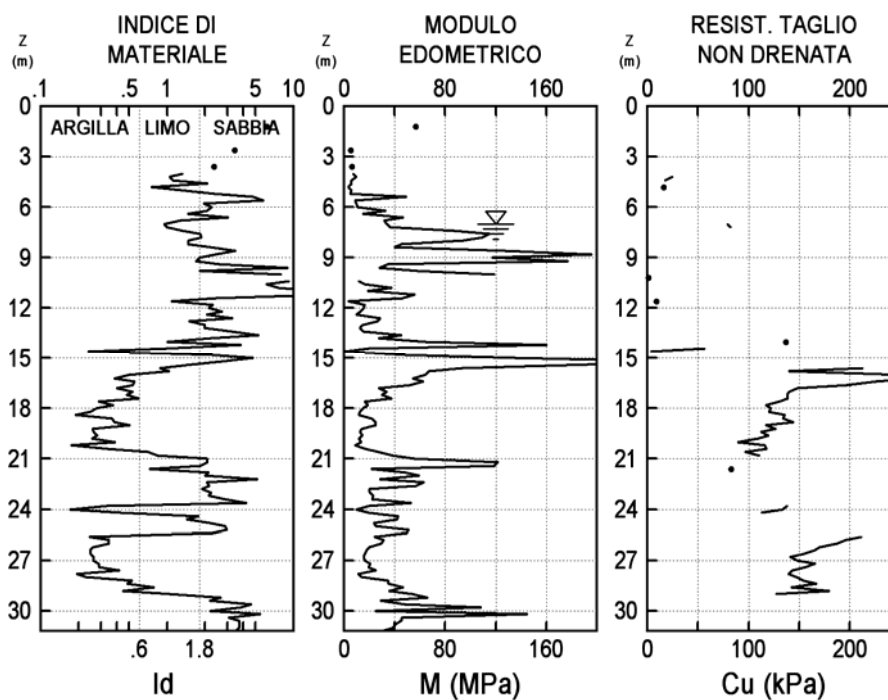


Figura 7 - Risultati prova dilatometrica DMT5b

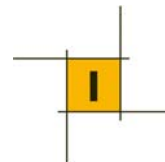
In alcune prove sono stati eseguiti i test di dissipazione per la stima delle caratteristiche di permeabilità. I risultati di queste prove sono riportati nella tabella seguente dove sono elencati i valori del coefficiente di consolidazione (ch) e del coefficiente di permeabilità (kh).

Prova	z (m)	Unità	ch (cm ² /sec)	kh (cm/sec)	kh (m/sec)
DMT2	5	A (2)	0.41	3.40E-06	3.4E-08
DMT2	10	C2? (2)	0.019	1.10E-08	1.1E-10
DMT2	15	C2 o D?(3a)	4.60E-03	2.30E-09	2.3E-11
SDMT3	13	A (3b)	0.21	2.30E-06	2.3E-08
SDMT3	17	A (3b)	0.096	2.40E-06	2.4E-08
SDMT3b	4	A (2)	0.42	6.50E-07	6.5E-09
SDMT3b	6	A (2)	0.07	2.20E-07	2.2E-09
SDMT3b	9	A (2)	0.14	2.60E-07	2.6E-09
SDMT3b	13	A (3a)	0.33	3.30E-06	3.3E-08
SDMT3b	19	A (3b)	0.16	3.60E-06	3.6E-08
SDMT3b	26	D (3a)	2.90E-03	4.80E-09	4.8E-11
SDMT4	6	A (2)	0.048	1.50E-07	1.5E-09
SDMT4	20	D (3b)	0.23	9.50E-06	9.5E-08
DMT5b	20	D (3b)	0.015	1.30E-07	1.3E-09

4.2.6 Prove di permeabilità in foro tipo Lefranc (2009-2013)

Sono state eseguite 13 prove Lefranc (a carico variabile e costante) in sede di progetto definitivo e 22 (a carico variabile) in sede di progetto esecutivo. I risultati delle prove sono riassunti nella tabella seguente.

Prova Le Franc	Profondità (m)	Unità	Permeabilità k (m/s)	Permeabilità k (m/s)
			Carico costante	Carico variabile 1h
S1 – 1	3.0-6.0	A (4b)	3.3 E-04	
S1 – 2	6.0-9.0	B2? (4b)	5.7 E-05	
S1 – 4	18.0-21.0	D (3a)		6.5 E-08
S2 – 1	3.0-6.0	A (4b)	5.5 E-04	
S2 – 2	6.0-9.0	A (2)	2.0 E-04	
S2 – 3	9.0-12.0	A o C2? (2)	2.5 E-04	
S3 – 1	3.0-6.0	A (2)		6.8 E-07
S3 – 2	6.0-9.0	A (2)		6.2 E-07
S3 – 3	9.0-12.0	A (3a)		7.7 E-07
S4b – 1 (*)	3.0-6.0	A (4a) (*)	5.2 E-04	
S4b – 2 (*)	6.0-9.0	C1 (4a) (*)	1.0 E-04	
S4b – 3 (*)	9.0-12.0	C1/C2 (4b) (**)	8.6 E-05 (*1.2 E-04)	
S1/2013	3.0-5.0	A1		n.i.
S1/2013	7.0-9.0	A2		8.5 E-06
S1/2013	11.0-13.0	D		7.6 E-06
S2/2013	3.5-5.5	B1		n.i.
S2/2013	7.0-9.0	B2		n.i.
S2/2013	12.0-14.0	D		6.3 E-07
S3/2013	1.5-4.5	A1		1.8 E-07
S3/2013	5.5-8.5	A2		2.3 E-07
S3/2013	9.0-12.0	A2		8.1 E-06
S4/2013	2.0-5.0	A1		3.1 E-06
S4/2013	5.0-8.0	A2		3.2 E-06
S4/2013	9.5-12.0	A2		4.4 E-06
S5/2013	5.0-8.0	B1		1.7 E-07
S5/2013	11.0-13.5	B2		1.0 E-07
S5/2013	15.0-18.0	B2		1.7 E-07
S5/2013	21.0-24.0	C2		1.7 E-07
S5/2013	35.0-38.0	D		3.8 E-08
S6/2013	5.0-7.5	A2		5.4 E-06
S6/2013	9.5-12.0	A2		3.5 E-07
S6/2013	15.5-18.0	A2		4.9 E-07
S6/2013	20.0-22.5	A2		2.2 E-05
S6/2013	25.0-27.0	D		2.6 E-07



n.i. La prova risulta non interpretabile a causa di un comportamento anomalo attribuibile a difetti di lettura e/o di allestimento della prova

(*) Nella Relazione Geotecnica del progetto definitivo le prove sono state riferite erroneamente al sondaggio S4 e non al S4b come risulta dalla documentazione sulle indagini. Di conseguenza anche l'attribuzione alle unità è errata.

()** La prova tra 9 a 12 m interessa due terreni molto diversi: ghiaie (C1) da 9 a 10.9 m e limi (C2) da 10.9 a 12 m.

Per quanto riguarda l'interpretazione dei risultati delle prove Lefranc vanno fatte alcune considerazioni.

Nell'ambito delle prove del progetto definitivo sono state riscontrate differenze tra i valori riportati nella documentazione sulle indagini e quelli della relazione geotecnica. Tale differenza è legata all'errore riportato nella documentazione sulle indagini dove, per le prove a carico costante, si considera un'altezza dell'acqua non corretta (si deve infatti considerare la differenza tra il livello dell'acqua di prova e il livello di falda). Sempre per le prove a carico costante viene utilizzato un coefficiente di forma (pari a 2.85) non adatto allo schema geometrico di prova. Per le prove a carico variabile si fa invece riferimento al coefficiente proposto dall'AGI ($C=2\pi D+L$). Nella relazione geotecnica del progetto definitivo non si esplicitano invece i coefficienti utilizzati.

In questa sede si è preferito fare riferimento agli schemi di Hvorslev (1951) e Wilkinson (1968), adottando il coefficiente di forma per lo schema del "filtro cilindrico in terreno uniforme" che ha la seguente espressione:

$$C = \frac{3\pi L}{\ln \left[1.5 \frac{L}{D} + \sqrt{1 + \left(\frac{1.5L}{D} \right)^2} \right]}$$

dove L e D sono rispettivamente la lunghezza e il diametro del tratto di prova.

Il coefficiente di permeabilità (K) si ricava quindi dalle formule:

per le prove a carico costante:

$$K = \frac{q}{C \cdot h \cdot D}$$

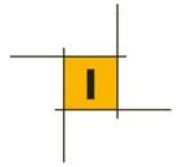
per le prove a carico variabile:

$$K = \frac{A}{C \cdot (t_2 - t_1)} \cdot \ln \frac{h_1}{h_2}$$

dove q è la portata immessa nella prova a carico costante; h_1 e h_2 sono le altezze dei livelli dell'acqua nel foro rispetto al livello della falda indisturbata agli istanti t_1 e t_2 .

Per le prove a carico variabile sono stati adottati valori di permeabilità medi calcolati nei vari intervalli di tempo, escludendo il primo e l'ultimo gradino di prova e inoltre, eventualmente, quelli in cui l'assorbimento si presenta molto irregolare (per evidenti errori o difetti di misura).

Nella tabella precedente sono quindi stati riportati i valori di K calcolati con questo criterio i quali, nella maggior parte dei casi, non differiscono di molto da quelli indicati nella relazione geotecnica del progetto definitivo.



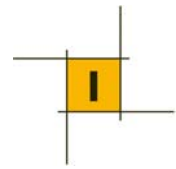
Differenze più importanti sono state evidenziate per le prove del sondaggio S4b, in primo luogo perché i risultati erano stati riferiti erroneamente al sondaggio S4 (quindi con le differenze sull'attribuzione alle diverse unità), e in secondo luogo perché erano state adottate altezze dell'acqua errate (anche nella relazione geotecnica del progetto definitivo). Con i valori corretti i coefficienti di permeabilità delle ultime due prove del sondaggio S4b risultano più elevati e congruenti con il tipo di terreno (ghiaioso) interessato dalla prova stessa. Sempre in questo sondaggio si deve evidenziare, come già accennato, che l'ultima prova (tra 9 a 12 m) interessa due terreni completamente diversi: ghiaie da 9 a 10.9 m e limi da 10.9 a 12 m. Vista la forte differenza di permeabilità tra i due terreni, l'assorbimento misurato è da attribuire quasi esclusivamente alle ghiaie. Considerando un tratto di prova di 1.9 m (corrispondente al tratto in ghiaie) invece di 3.0 m (cioè assumendo un valore nullo della permeabilità dei limi), si ottiene un coefficiente di permeabilità ($K = 1.2 \text{ EE-04 m/s}$) del tutto analogo a quello misurato nella prova tra 6 e 9 m (interamente in ghiaie).

4.2.7 Prove di laboratorio (2009-2013)

Nelle tabelle seguenti sono riassunti i risultati delle prove eseguite nell'ambito delle indagini condotte per il progetto definitivo e, nelle tabelle successive, quelli delle prove eseguite nell'ambito della progettazione esecutiva.

Tabella 1 – Risultati delle prove di laboratorio (Progetto definitivo 2009)

		SONDAGGIO:	1	1	2	2	3	3	3	3	4	4	5	5
		CAMPIONE:	1	2	1	2	1	2	3	4	1	4	1	2
		da m	8,50	17,50	12,00	20,50	6,00	12,50	21,00	26,70	9,70	19,60	5,50	12,50
		a m	9,00	18,00	12,50	21,00	6,50	13,00	21,50	27,00	10,00	19,90	6,00	13,00
DETERMINAZIONE		N° laborat.	5416	5417	5418	5419	5400	5401	5402	5403	5412	5415	5420	5421
CONTENUTO NATURALE D'ACQUA	W_n	(%)	37,0	24,4	29,9	33,8	38,8	30,3	31,9	31,5	26,9	22,1	33,5	24,4
INDICE DEI VUOTI	e	(-)	1,01	0,69	0,97	1,06	1,24	0,89	0,95	0,90	0,77	0,65	1,05	0,74
POROSITA'	n	(%)	50,22	40,70	49,35	51,44	55,38	47,11	48,73	47,42	43,50	39,27	51,30	42,48
GRADO DI SATURAZIONE	S_r	(%)	98,38	95,88	82,89	85,63	84,55	91,85	89,46	95,75	92,55	90,21	85,67	90,17
PESO DI VOLUME NATURALE	γ_n	(kN/m ³)	17,93	19,51	17,44	17,11	16,43	18,22	17,67	18,58	18,62	19,22	17,16	19,15
PESO DI VOLUME SECCO	γ_d	(kN/m ³)	13,08	15,68	13,43	12,79	11,84	13,98	13,40	14,13	14,67	15,75	12,85	15,40
PESO DI VOLUME SATURO	γ_{sat}	(kN/m ³)	18,01	19,68	18,27	17,83	17,27	18,60	18,18	18,78	18,94	19,60	17,88	19,56
PESO SPECIFICO DEI GRANULI	γ_s	(kN/m ³)	26,28	26,45	26,52	26,33	26,54	26,43	26,13	26,87	25,97	25,93	26,38	26,77
FRAZIONE GHIAIOSA	G	(%)	0,0	0,3	0,0	8,0	0,0	0,1	0,1	0,0	0,0	0,0	0,3	0,0
FRAZIONE SABBIOSA	S	(%)	5,5	10,5	7,2	38,5	17,3	11,5	30,1	4,4	6,6	6,5	24,8	8,8
FRAZIONE LIMOSA	L	(%)	60,4	43,9	68,9	47,0	71,7	63,2	52,5	41,1	60,6	66,8	58,6	44,1
FRAZIONE ARGILLOSA	A	(%)	34,1	45,3	23,9	6,5	11,0	25,1	17,3	54,4	32,7	26,7	16,4	47,1
LIMITE DI LIQUIDITA'	LL	(%)	63,4	39,2	52,2	N.D.	39,9	55,4	35,3	50,1	47,9	35,9	36,2	46,7
LIMITE DI PLASTICITA'	LP	(%)	26,4	19,5	25,3	N.D.	30,7	20,5	22,8	23,8	22,9	17,7	27,3	20,9
INDICE DI PLASTICITA'	IP	(%)	37,1	19,7	27,0	N.P.	9,2	34,9	12,6	26,3	25,0	18,2	9,0	25,8
INDICE DI CONSISTENZA	IC	(-)	0,7	0,8	0,8	N.D.	0,1	0,7	0,3	0,7	0,8	0,8	0,3	0,9
CLASSIFICAZIONE U.S.C.S. (S.I.)	U.S.C.S.	(-)	CH	CL	CH	/	ML	CH	CL	CH	CL	CL	ML	CL
CLASSIFICAZIONE AASHTO	AASHTO	(-)	A-7-6	A-6	A-7-6	/	A-4	A-7-6	A-6	A-7-6	A-7-6	A-6	A-4	A-7-6
VAN TEST (MEDIA DI PIU' VALORI)		(kPa)	61	88	106	/	/	65	/	91	195	158	/	108
POCKET PENETROMETER (MEDIA O RANGE DI PIU' VALORI)		(kPa)	110	150	234	206	/	106	/	154	470	348	152	216
RESISTENZA ALLA COMPRESSIONE AD ESPANSIONE LATERALE LIBERA	σ	(kPa)												
	ϵ	(%)												
PROVA DI TAGLIO DIRETTO TIPO CD	c'	(kPa)	9	26	28	12	17	21	9		36	36	7	19
	ϕ'	(°)	24	26	25	30	25	27	27		24	23	27	27
PROVA DI TAGLIO DIRETTO RESIDUO	c_r	(kPa)												
	ϕ_r	(°)												
PROVA DI COMPRESSIONE TRIASSIALE UU	c_u	(kPa)	67		99			69						
	ϕ_u	(°)	0°		0°			0°						
PROVA DI COMPRESSIONE TRIASSIALE CU	c	(kPa)												
	ϕ	(°)												
PROVA DI COMPRESSIONE TRIASSIALE CD	c'	(kPa)												
	ϕ'	(°)												
MODULO DI COMPRESSIBILITA' EDOMETRICA (kPa)	E	12,5/25(kPa)												
	E	25/50(kPa)	4984		7117	4848	4425	10390	3636					
	E	50/100(kPa)	3342	4914	5236	12903	4673	4474	5076	8368				
	E	100/200(kPa)	3257	6849	5618	11364	4630	4640	6494	7407		10256		
	E	200/400(kPa)	4962	11525	6154	11104	5332	6281	8760	9591	33223	10095		
	E	400/800(kPa)	8119	14173	9418	14735	8193	10212	10894	12681	18613	14681		
	E	800/1600(kPa)	15832	21541	16953	22294	15879	20554	19244	20421	22529	25450		
COEFFICIENTE DI CONSOLIDAZIONE	C_v	12,5/25(kPa)												
	C_v	25/50(kPa)												
	C_v	50/100(kPa)				N.D.	N.D.	1,56E-04	N.D.					
	C_v	100/200(kPa)	1,91E-04	1,28E-03	1,77E-03	5,18E-03	N.D.	1,06E-04	N.D.	6,48E-04				
	C_v	200/400(kPa)	1,08E-04	1,11E-03	1,71E-03	4,32E-03	N.D.	9,86E-05	N.D.	7,51E-04	1,82E-04	3,07E-04		
	C_v	400/800(kPa)	2,26E-04	1,07E-03	4,04E-04	4,41E-03				7,95E-04	1,47E-04	2,58E-04		
	C_v	800/1600(kPa)									1,02E-04	2,66E-04		
PRESSIONE DI RIGONFIAMENTO		(kPa)												



		SONDAGGIO 3		3		3		4		4	
		CAMPIONE SPT 1		SPT 2		SPT 3		2		3	
		da m /		/		/		13,60		15,00	
		a m 3,00		9,00		15,00		13,70		15,50	
DETERMINAZIONE		N° laborat. 5404		5405		5406		5413		5414	
CONTENUTO NATURALE D'ACQUA	W_n	(%)									
INDICE DEI VUOTI	e	(-)									
POROSITA'	n	(%)									
GRADO DI SATURAZIONE	S_r	(%)									
PESO DI VOLUME NATURALE	γ_n	(kN/m ³)									
PESO DI VOLUME SECCO	γ_d	(kN/m ³)									
PESO DI VOLUME SATURO	γ_{sat}	(kN/m ³)									
PESO SPECIFICO DEI GRANULI	γ_s	(kN/m ³)		26,68	26,71	26,63	26,03	26,32			
FRAZIONE GHIAIOSA	G	(%)		0,1	0,1	0,1	21,2	39,1			
FRAZIONE SABBIOSA	S	(%)		14,0	14,8	1,7	35,6	21,3			
FRAZIONE LIMOSA	L	(%)		62,7	50,0	58,6	37,4	29,1			
FRAZIONE ARGILLOSA	A	(%)		23,2	35,2	39,7	5,8	10,5			
LIMITE DI LIQUIDITA'	LL	(%)									
LIMITE DI PLASTICITA'	LP	(%)									
INDICE DI PLASTICITA'	IP	(%)									
INDICE DI CONSISTENZA	IC	(-)									
CLASSIFICAZIONE U.S.C.S. (S.I.)	U.S.C.S	(-)						SM	SM		
CLASSIFICAZIONE AASHTO	AASHTO	(-)		/	/	/	/	/			

Tabella 2 – Risultati delle prove di laboratorio su campioni indisturbati (Progetto Esecutivo 2013)

Sondaggio-campione/prof. (m)	S1-C1	S1-C2	S1-C3	S2-C1	S2-C2	S2-C3	S6-C1	S6-C2	S6-C3
Determinazione	6-6.5	12-12.5	15-15.5	6-6.5	10.5-11	12-12.6	3-3.5	6.0-6.5	19.5-20
Peso di volume naturale γ (kN/m ³)	17.04	20.07	19.48	17.56	19.55	18.82	18.2	17.2	18.63
Contenuto naturale d'acqua w (%)	38.32	22.56	22.27	35.92	22.93	25.78	29.43	32.13	33.75
Ghiaia (%)	2.51	0	0.14	0.09	0	0	1.05	0.9	0.27
Sabbia (%)	26.95	1.96	21.62	28.67	16.76	4.26	4.29	18.45	3.43
Limo (%)	44.32	42.22	40.42	44.52	42.72	44.92	39.51	61.75	50.00
Argilla (%)	26.22	55.82	37.82	26.82	40.52	50.82	55.15	18.9	46.30
Limite di Liquidità LL (%)	44.52	27.22	37.22	35.02	47.52	55.82	72.3	53.30	52.5
Limite di plasticità LP (%)	25.8	15.71	15.71	20.76	24.68	-	28.51	24.53	18.54
Indice di plasticità (%)	18.72	11.51	21.51	14.26	22.84	-	43.79	28.77	33.96
Classificazione U.S.C.S.	CL	CL	CL	CL	CL	MH	CH	CH	CH
Classificazione AASHTO	A7-6	A6	A6	A6	A7-6	A5	A7-6	A7-6	A7-6
TAGLIO DIRETTO									
Coesione efficace c' (kN/m ²)	13				9		20		
Angolo di attrito ϕ' (°)	27				30		23		
PROVA EDOMETRICA									
M (kN/m ²) – $\sigma = kN/m^2$									
M (kN/m ²) – $\sigma = kN/m^2$									
M (kN/m ²) – $\sigma = kN/m^2$									
PROVA TRIASSIALE CIU									
Coesione efficace c' (kN/m ²)		20.6							
Angolo di attrito ϕ' (°)		20.3							
PROVA TRIASSIALE UU									
Coesione non drenata c_u (kN/m ²)			256			221		62	

Tabella 3 – Risultati delle prove di laboratorio su campioni rimaneggiati (Progetto Esecutivo 2013)

Pozzetto-campione/prof. (m)	P1-T1	P1-T1	P3-T1	P4-T1	P5-T1	P6-C1	P6-C2	P7-C1
Determinazione	2.8	3.0	2.6	2.8	2.8	0.5	1.0	0.5
Ghiaia (%)	8.75	10.86	8.26	1.24	1.92	2.74	2.27	0.24
Sabbia (%)	36.41	41.5	40.8	15.12	17.04	19.21	17.08	15.76
Limo (%)	40.02	36.82	37.92	59.82	43.22	55.2	54.8	52.20
Argilla (%)	14.8	10.82	13.02	23.82	37.82	22.85	25.85	31.80
Limite di Liquidità LL (%)	34.18	32.22	32.01	44.22	44.52	46.8	47.6	47.3
Limite di plasticità LP (%)	22.67	26.11	20.79	29.32	20.19	22.92	23.78	23.55
Indice di plasticità (%)	11.51	6.11	11.22	14.9	24.33	23.88	23.82	23.75
Classificazione U.S.C.S.	CL	ML	CL	ML	CL	CL	CL	CL
Classificazione AASHTO	A6	A4	A6	A7-6	A7-6	A7-6	A7-6	A7-6
Pozzetto-campione/prof. (m)	P7-C2	P7-C3	P7-C4	P7-C5	P8-C1	P8-C2	P8-C3	P8-C4
Determinazione	1.0	2.0	3.0	5.5	0.5	1.0	2.0	4.0
Ghiaia (%)	0.46	0.21	0.41	0.74	1.81	0.84	0.0	0.78
Sabbia (%)	21.31	14.82	4.78	4.45	15.99	18.36	12.85	4.61
Limo (%)	50.08	49.86	30.56	26.01	56.4	53.4	55.4	45.95
Argilla (%)	28.15	35.11	64.25	68.80	25.8	27.4	31.75	48.66
Limite di Liquidità LL (%)	45	46.8	73.5	70	40	50.5	53.8	62.2
Limite di plasticità LP (%)	22.6	23.78	30.17	29	19.69	21.32	25.6	27.6
Indice di plasticità (%)	22.4	23.02	43.33	41	20.31	29.18	28.2	34.6
Classificazione U.S.C.S.	CL	CL	CH	CH	CL	CH	CH	CH
Classificazione AASHTO	A7-6	A7-6	A7-6	A7-6	A7-6	A7-6	A7-6	A7-6
Pozzetto-campione/prof. (m)	P8-C5	P9-C1	P9-C2	P9-C3				
Determinazione	5.5	0.5	1.0	2.0				
Ghiaia (%)	0.59	0.37	0.33	0.0				
Sabbia (%)	5.53	17.12	14.37	6.5				
Limo (%)	30.58	48.71	47.2	32.7				
Argilla (%)	63.3	33.8	38.1	60.8				
Limite di Liquidità LL (%)	70.5	44.1	45.8	69.4				
Limite di plasticità LP (%)	28.63	21.28	23.45	29.76				
Indice di plasticità (%)	41.87	22.82	22.35	39.64				
Classificazione U.S.C.S.	CH	CL	CL	CH				
Classificazione AASHTO	A7-6	A7-6	A7-6	A7-6				

5 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI

5.1 Sequenza lito-stratigrafica e modello geotecnico

Negli elaborati del progetto definitivo viene proposto un profilo geologico lungo l'asse del futuro sbarramento ricostruito sulla base delle stratigrafie dei sondaggi e delle altre prove in sito. Con riferimento a tale schema è stato adottato un modello geotecnico che si basa su 5 unità, alcune di queste suddivise in sub-unità:

- Unità 1: Riporto limoso
- Unità 2: Limi mediamente consistenti (limi fluviali recenti e limi ocra consistenti)
- Unità 3a: Argille consistenti con livelli di sabbia addensata (limi e argille grigie marine)
- Unità 3b: Argille poco consistenti (limi e argille grigie marine)
- Unità 4a: Tufi e piroclastiti
- Unità 4b: Tufi e piroclastiti parzialmente argillificati
- Unità 5: Sabbia e ghiaia.

L'**Unità 1** si riferisce ai depositi detritici di versante e agli strati alluvionali più superficiali del fosso Pratolungo. Nell'**Unità 2** sono stati inglobati, insieme ai depositi alluvionali del fosso di Pratolungo, i limi ocra che appartengono geologicamente ad un'altra formazione (la formazione fluvio-palustre di transizione tra le argille del substrato marino e le formazioni vulcaniche).

L'**Unità 3** appartiene alla formazione del substrato geologico (argille di ambiente marino, pleistoceniche); nell'ambito di questa formazione gli estensori dello studio geotecnico del progetto definitivo hanno incluso una lente di spessore importante all'interno della quale le prove dilatometriche hanno riscontrato modeste caratteristiche meccaniche. Tale lente (denominata Unità 3b) si rinviene ad una quota di circa 10 m s.l.m e raggiunge uno spessore massimo di 7-8 m.

L'**Unità 4** appartiene alle formazioni vulcaniche, mentre l'**Unità 5** rappresenta lo strato ghiaioso della formazione fluvio-palustre secondo quanto illustrato sinteticamente nel cap. 3.

Come più estesamente illustrato nella Relazione Geologica, i risultati delle integrazioni di indagini hanno suggerito di rivedere criticamente il modello geologico di base e, di conseguenza, anche quello geotecnico.

È stato quindi definito un nuovo modello geologico-geotecnico che si basa su 4 Unità, distinte con la sigle da A a D (con ulteriori sub-unità), elencate nella tabella successiva in ordine cronologico dalle più recenti alle più antiche. Nella stessa tabella è indicata anche la corrispondente classificazione utilizzata nel progetto definitivo per comparazione. Tale nuovo modello è illustrato graficamente nel profilo geologico-geotecnico in asse allo sbarramento (elaborato GE-SC-101).

Tabella 4 – Unità geotecniche

Unità		Nome Unità	Descrizione litologica e suddivisione in sub-unità	Sigla precedente classificaz.
A	A1	Depositi alluvionali	Materiale prevalentemente piroclastico rimaneggiato	1 e 2
	A2		Limi argillosi ocra – Limi sabbiosi e sabbie limose	2 e 3b
B	B1	Unità piroclastica	Tufi e pozzolane	4a
	B2		Cineriti (piroclastiti a grana limo-argillosa)	4b
C	C1	Formazione fluvio-palustre	Sabbie e ghiaie	5
	C2		Limi argillosi e sabbiosi di colore ocra	2
D		Formazione argillosa pleistocenica	Limi argilloso-sabbiosi e argille limose con livelli sabbiosi	3

Questa suddivisione risponde in maniera più coerente alla situazione geomorfologica e alla storia geologica del sito poiché prevede:

- una copertura alluvionale (A) di recente messa in posto che ha parzialmente colmato l'incisione valliva del fosso di Pratolungo (nell'ambito delle alluvioni si distingue spesso uno strato più superficiale, di natura prevalentemente piroclastica e che contiene anche materiale di origine antropica (legato agli eventi alluvionali più recenti); lo spessore della copertura alluvionale, che arriva ad un massimo di quasi 25m, è decisamente maggiore di quello stimato in sede di progetto definitivo;
- al di sotto della copertura alluvionale una successione stratigrafica che costituisce il substrato della zona, in accordo con la storia geologica dell'area romana; questa successione è formata dalle seguenti formazioni (dalle più recenti alle più antiche):
 - formazioni vulcaniche (B), affioranti sulle due sponde della valle;
 - terreni pre-vulcanici di ambiente fluvio-palustre - C - (non affioranti nella zona, ma presenti nel sottosuolo delle due sponde al di sotto delle vulcaniti e in parte sotto le alluvioni);
 - terreni limo-argillosi del substrato marino pleistocenico (D) presenti nel sottosuolo, al di sotto dei terreni fluvio-palustri sulle sponde e al di sotto delle alluvioni nel fondovalle.

La suddetta successione stratigrafica è stata ricostruita con un sufficiente dettaglio nella zona dello sbarramento principale.

Nella zona dell'argine a difesa degli edifici storici i sondaggi hanno attraversato la stessa successione stratigrafica, ad eccezione della formazione C1, che qui non risulta presente (i limi ocra dell'Unità C2 sono stati attraversati solo con un sottile lembo residuo interposto tra le vulcaniti e le sottostanti argille).

Anche se si tratta di siti posti ad una distanza di circa un chilometro, i risultati delle indagini sono stati elaborati congiuntamente (con il criterio "formazionale"), prestando però attenzione al fatto che i risultati tra una zona e l'altra non risultassero particolarmente diversi. In questi casi è stata evidenziata la differenza.

Nei paragrafi successivi sono commentati i risultati delle indagini, distinti per le singole unità prima descritte.

5.2 Unità geotecnica A. Depositi alluvionali

5.2.1 Caratteristiche fisiche

Tabella 5 – Unità A. Frazioni granulometriche

ID	Prof. da p.c. (m)	Ghiaia (%)	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)
S2-C1	12.0÷12.5	0.0	7.2	68.9	23.9
S2-C2	20.5÷21.0	8.0	38.5	47.0	6.5
S3-C1	6.0÷6.5	0.0	17.3	71.7	11.0
S3-C2	12.5÷13.0	0.1	11.5	63.2	25.1
S3-C3	21.0÷21.5	0.1	30.1	53.0	17.3
S3-SPT1	3.0	0.1	14.0	62.7	23.2
S3-SPT2	9.0	0.1	14.8	50.0	35.2
S3-SPT3	15.0	0.1	1.7	58.6	39.7
S1/2013-C1	6.0÷6.5	2.5	26.95	44.32	26.2
S6/2013-C1	3.0÷3.5	1.05	4.29	39.51	55.15
S6/2013-C2	6.0÷6.5	0.9	18.45	61.75	18.9
S6/2013-C3	19.5÷20.0	0.27	3.43	50.0	46.3
Pz1-T1	2.8	8.75	36.41	40.02	14.82
Pz2-T1	3.0	10.86	41.5	36.82	10.82
Pz3-T1	2.6	8.26	40.8	37.92	13.02
Pz4-T1	2.8	1.24	15.12	59.82	23.82
Pz5-T1	2.8	1.92	17.04	43.22	37.82
Pz6-C1	0.5	2.74	19.21	55.2	22.85
Pz6-C2	1.0	2.27	17.08	54.8	25.85
Pz7-C1	0.5	0.24	15.76	52.2	31.8
Pz7-C2	1.0	0.46	21.31	50.08	28.15
Pz7-C3	2.0	0.21	14.82	49.86	35.11
Pz7-C4	3.0	0.41	4.78	30.56	64.25
Pz7-C5	5.5	0.74	4.45	26.01	68.8
Pz8-C1	0.5	1.81	15.99	56.4	25.8
Pz8-C2	1.0	0.84	18.36	53.4	27.4
Pz8-C3	2.0	0.0	12.85	55.4	31.75
Pz8-C4	3.0	0.78	4.61	45.95	48.66
Pz8-C5	5.5	0.59	5.53	30.58	63.3
Pz9-C1	0.5	0.37	17.12	48.71	33.8
Pz9-C2	1.0	0.33	14.37	47.2	38.1
Pz9-C3	2.0	0.0	6.5	32.7	60.8

Tabella 6 – Unità A. Proprietà fisiche

ID	Prof. da p.c. (m)	Peso volume (kN/m ³)	Contenuto d'acqua (%)	Porosità (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IC (%)	CLASS USCS	CLASS AASHTO
S2-C1	12.0÷12.5	17.07	29.8	50.44	52.2	25.3	27.0	0.8	CH	A7-6
S2-C2	20.5÷21.0	17.11	33.8	51.04						
S3-C1	6.0÷6.5	16.43	39.8	55.38	39.9	30.7	9.2	0.1	ML	A4
S3-C2	12.5÷13.0	18.27	30.5	47.06	55.4	20.5	34.9	0.7	CH	A7-6
S3-C3	21.0÷21.5	17.67	31.9	48.7	35.3	22.8	12.6	0.3	CL	A6
S1/2013-C1	6.0÷6.5	17.04	38.3		44.5	25.8	18.7		CL	A7-6
S6/2013-C1	3.0÷3.5	18.2	29.43		72.3	28.51	43.79		CH	A7-6
S6/2013-C2	6.0÷6.5	17.2	32.13		53.3	24.53	28.77		CH	A7-6
S6/2013-C3	19.5÷20.0	18.2	29.43		52.5	18.54	33.96		CH	A7-6
Pz1-T1	2.8				34.2	22.7	11.5		CL	A6
Pz2-T1	3.0				32.2	26.1	6.1		ML	A4
Pz3-T1	2.6				32	20.8	11.2		CL	A6
Pz4-T1	2.8				44.2	29.3	14.9		ML	A7-6
Pz5-T1	2.8				44.5	20.2	24.3		CL	A7-6
Pz6-C1	0.5				46.8	22.92	23.88		CL	A7-6
Pz6-C2	1.0				47.6	23.78	23.82		CL	A7-6
Pz7-C1	0.5				47.3	23.55	23.75		CL	A7-6
Pz7-C2	1.0				45	22.6	22.4		CL	A7-6
Pz7-C3	2.0				46.8	23.78	23.02		CL	A7-6
Pz7-C4	3.0				73.5	30.17	43.33		CH	A7-6
Pz7-C5	5.5				70	29	41		CH	A7-6
Pz8-C1	0.5				40	19.69	20.31		CL	A7-6
Pz8-C2	1.0				50.5	21.32	29.18		CH	A7-6
Pz8-C3	2.0				53.8	25.6	28.2		CH	A7-6
Pz8-C4	3.0				62.2	27.6	34.6		CH	A7-6
Pz8-C5	5.5				70.5	28.63	41.87		CH	A7-6
Pz9-C1	0.5				44.1	21.28	22.82		CL	A7-6
Pz9-C2	1.0				45.8	23.45	22.35		CL	A7-6
Pz9-C3	2.0				69.4	29.76	39.64		CH	A7-6

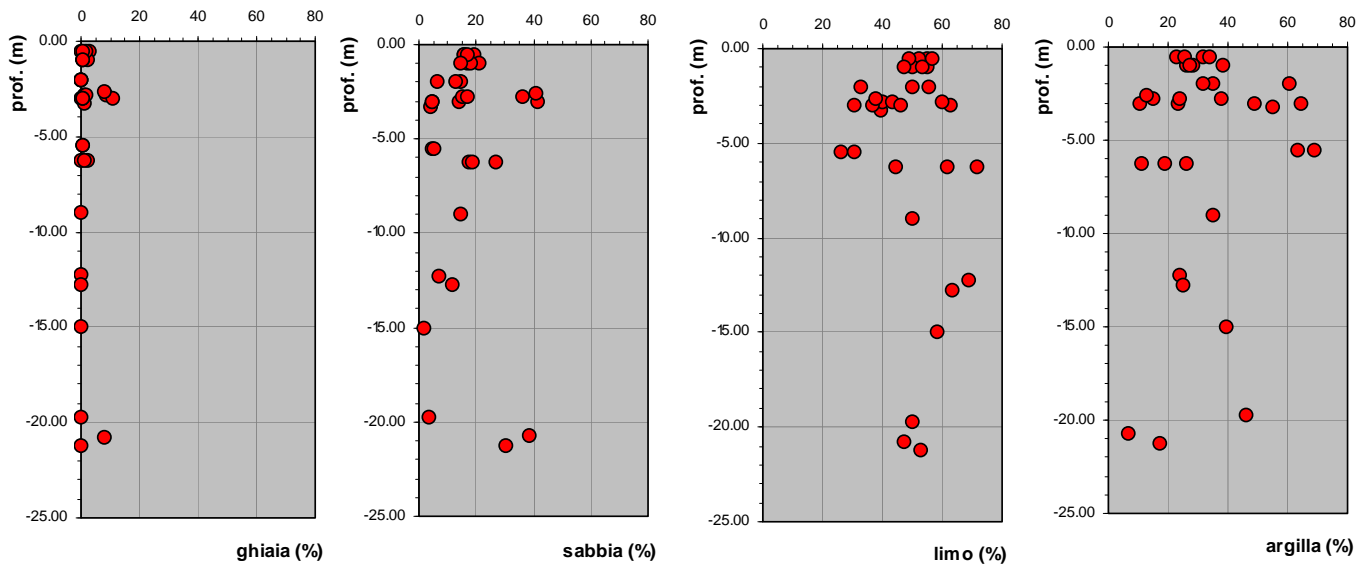


Figura 8 - Granulometrie dei terreni alluvionali (Unità A)

Dalle **analisi granulometriche** risultano materiali costituiti prevalentemente da limi, in percentuali comprese generalmente tra il 30% ed il 70%, con frazione argillosa del 10-40%, ma che può arrivare fino al 60-70% negli strati superficiali; la frazione sabbiosa è generalmente inferiore o pari al 20% ad eccezione di alcuni campioni superficiali (prelevati nella zona dell'argine principale) e di due profondi.

Considerazioni di maggiore dettaglio sulle caratteristiche dei terreni più superficiali, cioè quelli che saranno interessati dagli scavi, verranno svolte nella Relazione sulle terre e sul bilancio delle materie.

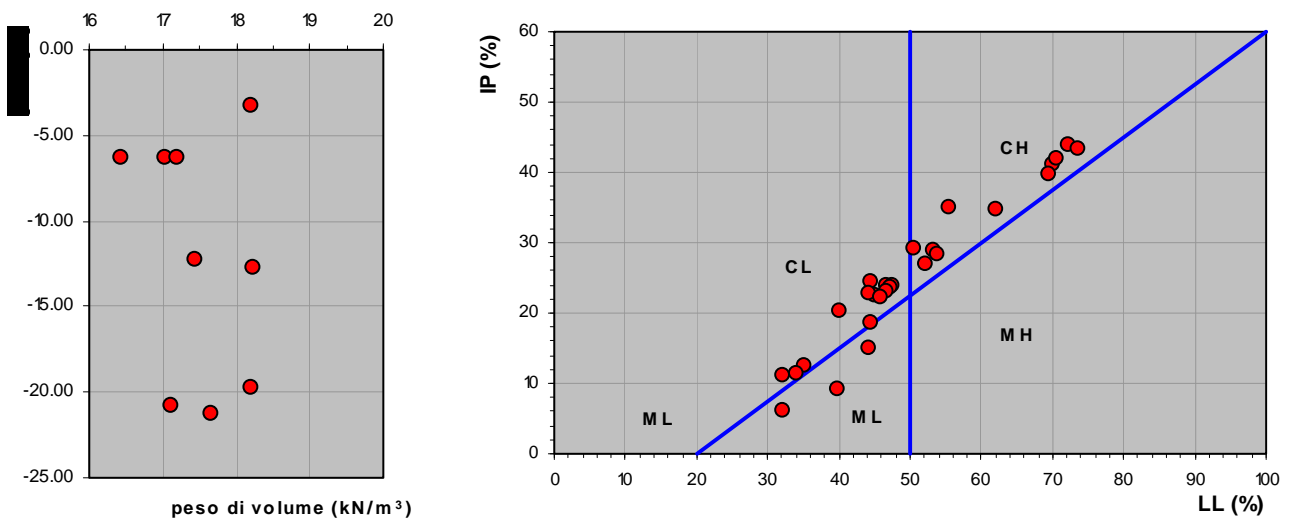


Figura 9 - Caratteristiche fisiche dei terreni alluvionali (Unità A)

Con riferimento alle caratteristiche di **plasticità**, il limite liquido LL è molto variabile nel campo tra 30% e 75% e l'indice di plasticità Ip tra 10% e 45% circa; secondo la classifica USCS i campioni (classificabili) ricadono prevalentemente tra le classi CL e CH (con qualche campione in ML). Anche in questo caso si rimanda alla relazione sulle terre per considerazioni specifiche sui campioni più superficiali, interessati dagli scavi. Con riferimento alla classifica AASHTO i campioni sono prevalentemente A7-6 e solo in piccola parte A4 e A6. Il **peso di volume** è variabile tra 16.5 e 18.3 kN/m³ circa, senza apprezzabili correlazioni con la profondità.

5.2.2 Caratteristiche meccaniche

Tabella 7 – Unità A. Caratteristiche meccaniche

ID	Prof. da p.c. (m)	PROVA DI TAGLIO DIRETTO		TRIAX UU	litotipo
		c' (kPa)	φ (°)	c _u (kPa)	
S2-C1	12.0÷12.5	28	25	99	Limo-argilloso
S2-C2	20.5÷21.0	12	30		Limo-argilloso/sabbioso
S3-C1	6.0÷6.5	17	25	-	Limo-argilloso
S3-C2	12.5÷13.0	21	27	69	Limo-argilloso
S3-C3	21.0÷21.5	9	27	-	Limo-sabbioso
S1/13 –C1	6.0÷6.5	13 (*)	27 (*)		Limo-argilloso
S6/13 –C1	3.0÷3.5	23	23		Limo-argilloso
S3/13 –C2	6.0÷6.5			62	Limo-argilloso
MEDIA		17.6	26.3	76.7	
DEVIAZIONE STANDARD		6.78	2.21	19.66	
MEDIA - DS		10.8	24.1	57.0	

(*) L'elaborazione di questa prova è stata effettuata eliminando il primo provino che ha fornito risultati anomali

Dalle prove di taglio diretto risultano valori della **coesione drenata** compresi in un range piuttosto elevato (9÷28kPa), con valori dell'**angolo di attrito** tra 23° e 30°. Dal grafico seguente non si evidenziano particolari correlazioni con la profondità. Nella tabella precedente sono stati riportati anche i valori medi di coesione e angolo di attrito presi disaccoppiati, anche se tali valori hanno scarso significato.

Analizzando i dati con una trattazione statistica come suggerito dall'Eurocodice e dal Testo Unico, ad esempio prendendo un valore caratteristico pari alla media meno la deviazione standard, si ricava una coppia di valori, in termini arrotondati pari a $c' \cong 10$ kPa, $\phi \cong 24^\circ$. Il valore di angolo di attrito è uguale a quello assunto in sede di progetto definitivo, mentre la coesione risulta leggermente inferiore ($c' = 15$ kPa).

Il valore di coesione così ottenuto è invece del tutto analogo a quello che si ricaverebbe trattando l'insieme dei dati sul piano di Mohr, con elaborazione ai minimi quadrati: con questa elaborazione si ricava una retta, con un buon grado di correlazione, con la seguente coppia di valori $c' \cong 9$ kPa, $\phi \cong 28^\circ$.

Il valore della coesione inferiore a quello adottato nel progetto definitivo è peraltro più congruente con il tipo di terreni, di natura alluvionale, normal-consolidati.

In questa sede, tenuto conto anche delle difficoltà nell'ottenere (dalle prove di taglio diretto) valori di resistenza effettivamente attribuibili alle condizioni drenate (a lungo termine), si è preferito fare riferimento ai valori $c' = 10 \text{ kPa}$, $\varphi = 24^\circ$.

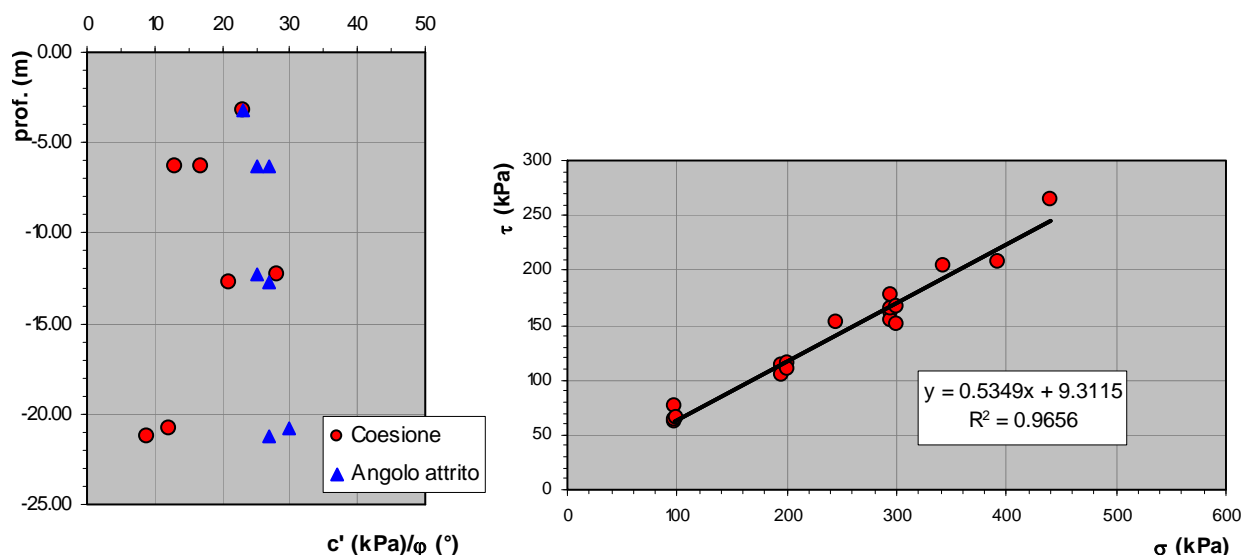


Figura 10 – Risultati delle prove di taglio diretto

Per la **resistenza a taglio non drenata**, i valori ricavati dalle tre prove triassiali UU risultano 62, 69 e 99 kPa con un valore medio di 77 kPa e un valore medio meno deviazione standard pari a 57 kPa..

I valori della coesione non drenata possono inoltre essere stimati anche dalle prove dilatometriche.

Dai tabulati di queste prove risultano valori di coesione non drenata nell'ambito di 50-80 kPa nei primi 10m (prove DMT 3 e 3b). Valori anche inferiori a questi ultimi sono stati misurati a profondità tra 10 e 20m, attribuiti, nel progetto definitivo, all'Unità 3b, ma ora inseriti nell'Unità A.

Nella relazione geotecnica del progetto definitivo vengono indicati, per i terreni dell'Unità 2 (corrispondente all'Unità A), valori di coesione non drenata $c_u = 80-90 \text{ kPa}$, vicini a quello più elevato delle prove triassiali, ma superiori a quelli ricavabili dalla prove dilatometriche (e anche inferiori a quelli delle altre prove UU). In questa sede è apparso più coerente fare riferimento ai valori ricavati dalle prove dilatometriche.

Sempre dalle prove dilatometriche sono stati ricavati valori del **modulo edometrico** nel campo 20÷40 MPa con valori intorno a 10 MPa per lo strato profondo (originariamente attribuiti alla lente dell'unità 3b).

Dalle prove edometriche i valori del modulo risultano inferiori (generalmente intorno a 5-10MPa nel campo di tensioni di interesse). E' noto però che i valori del modulo ricavati dalle prove edometriche arrivano a sottostimare notevolmente i valori reali dei terreni in sito, indisturbati. Valori analoghi a quelli ricavati dalle prove dilatometriche si sono ricavati dalle prove di laboratorio, ma per campi di tensione più elevati di quelli rappresentativi della profondità di prelievo del campione stesso. In questa sede si è preferito fare riferimento ai valori ricavati dalle prove dilatometriche.

Per la stima del modulo non drenato di Young (E_u) si è utilizzata la seguente relazione (C. Ladd et al., 1977):

$$E_u = n \cdot c_u$$

dove n è una costante che dipende dal livello di sovraconsolidazione (OCR) e dallo sforzo applicato. La stima del modulo non drenato è stata eseguita utilizzando l'abaco proposto da C. Ladd per due livelli di sforzo di taglio applicato (1/3 e 2/3 di quello a rottura) (Figura 19). Si è ritenuto opportuno utilizzare l'abaco relativo a uno sforzo applicato pari a 1/3 di quello di rottura e un grado di sovraconsolidazione pari a 1.

Il valore stimabile di E_u per tale unità, assumendo un valore rappresentativo di c_u compreso tra 50 e 80 kPa, è di 30÷50 MPa.

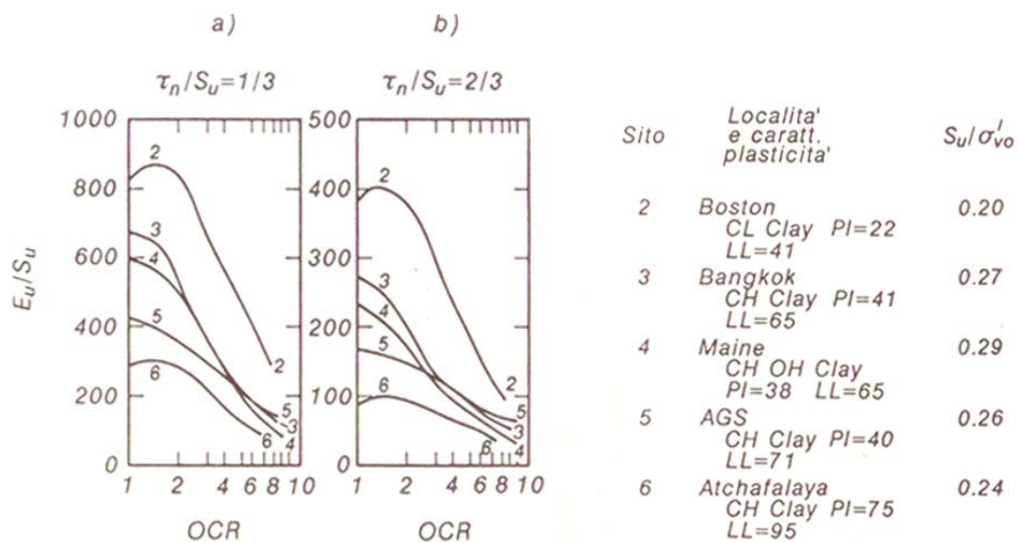


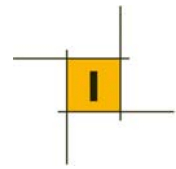
Figura 11 – Andamento del rapporto E_u/c_u al variare di OCR (C. Ladd et al., 1977)

5.2.3 Caratteristiche di permeabilità

Per la stima del **coefficiente di permeabilità** si può fare riferimento ai risultati delle prove Lefranc e a quelli delle prove di dissipazione

Tabella 8 - Prove di permeabilità Lefranc nei terreni dell'Unità A

Prova Le Franc	Profondità (m)	Permeabilità k (m/s)	
		Carico costante	Carico variabile 1h
S1 - 1	3.0-6.0	3.3 E-04	
S2 - 1	3.0-6.0	5.5 E-04	
S2 - 2	6.0-9.0	2.0 E-04	
S2 - 3	9.0-12.0	2.5 E-04	
S3 - 1	3.0-6.0		6.8 E-07
S3 - 2	6.0-9.0		6.2 E-07
S3 - 3	9.0-12.0		7.7 E-07
S4b - 1	3.0-6.0	5.2 E-04	



S1/2013	3.0-5.0		
S1/2013	7.0-9.0		
S3/2013	1.5-4.5		1.8 E-07
S3/2013	5.5-8.5		2.3 E-07
S3/2013	9.0-12.0		8.1 E-06
S4/2013	2.0-5.0		3.1 E-06
S4/2013	5.0-8.0		3.2 E-06
S4/2013	9.5-12.0		4.4 E-06
S6/2013	5.0-7.5		5.4 E-06
S6/2013	9.5-12.0		3.5 E-07
S6/2013	15.5-18.0		4.9 E-07
S6/2013	20.0-22.5		2.2 E-05
MEDIA		3.7 E-04	3.8 E-06

Tabella 9 - Risultati prove di dissipazione DMTA nei terreni dell'Unità A

Prova	z (m)	ch (cm ² /sec)	kh (cm/sec)	kh (m/sec)
DMT2	5	0.41	3.40E-06	3.4E-08
DMT2	10	0.019	1.10E-08	1.1E-10
SDMT3	13	0.21	2.30E-06	2.3E-08
SDMT3	17	0.096	2.40E-06	2.4E-08
SDMT3b	4	0.42	6.50E-07	6.5E-09
SDMT3b	6	0.07	2.20E-07	2.2E-09
SDMT3b	9	0.14	2.60E-07	2.6E-09
SDMT3b	13	0.33	3.30E-06	3.3E-08
SDMT3b	19	0.16	3.60E-06	3.6E-08
SDMT4	6	0.048	1.50E-07	1.5E-09
MEDIA		0.19	1.63E-06	1.63E-08

I valori di permeabilità variano nel campo $2.2E-05 \div 1.8E-07$ m/s con un valore medio di $3.8 E-06$ m/s.

Dalle tabelle si evidenzia che le prove eseguite nei sondaggi S1 e S2 hanno fornito valori di permeabilità molto elevati se paragonati ai risultati ottenuti dalle altre prove eseguite nella medesima unità.

Negli studi del progetto definitivo, tale anomalia era stata attribuita alla vicinanza del sondaggio S2 all'alveo secondario presente in destra idraulica e quindi ad una influenza dei livelli sabbiosi collegati al suddetto ramo idraulico. Per tale motivo, per la stima del coefficiente di permeabilità dell'unità 2, si erano ritenute più significative le prove S3-1 e S3-2.

Nel confermare che le caratteristiche di permeabilità dei terreni alluvionali sono, nel complesso, tipiche di terreni poco permeabili, si deve avanzare qualche dubbio circa la spiegazione dell'anomalia prima descritta. L'alveo secondario di cui si parla è in realtà un piccolo fosso di irrigazione (artificiale) e quindi non può rappresentare una anomalia dei percorsi idraulici e delle caratteristiche di permeabilità dei terreni.

Inoltre, gli scavi di saggio eseguiti in sede di progetto esecutivo hanno evidenziato la presenza di terreni

permeabili nel sottosuolo con circolazioni idriche significative. Si ritiene quindi che i valori elevati del coefficiente di permeabilità misurati in sponda destra costituiscano, non una anomalia, ma una locale diversificazione delle caratteristiche di permeabilità di questi terreni e di tale circostanza se ne è tenuto conto nelle modellazioni.

In definitiva, nelle analisi di filtrazione è stato considerato un valore del coefficiente di permeabilità dei terreni alluvionali $K = 5E-06$ m/s, leggermente superiore a quello assunto in sede di progetto definitivo ($1E-06$ m/s) e questa assunzione è a favore di sicurezza nei confronti delle verifiche di filtrazione sotto la diga.

Per le analisi della diga in sponda destra, è stata analizzata una sezione con coefficiente di permeabilità pari a $1E-04$ m/s, ricavato dalle prove eseguite in questa area.

I valori del **coefficiente di consolidazione** ricavati dalle prove dilatometriche risultano molto più elevati (di uno o due ordini di grandezza) rispetto a quelli ottenuti dalle prove edometriche di laboratorio, questi ultimi generalmente nel campo $1E-03$ ÷ $1E-04$ cm²/sec.

5.3 Unità geotecnica B: Piroclastiti (Complesso vulcanico)

Rientrano in questa unità i terreni della serie vulcanica, attribuibili alle formazioni delle “pozzolane rosse” e del “tufo lionato”. Dal punto di vista geotecnico sono state distinte due unità: una rappresentata dai materiali più addensati/cementati, fino a semi-litoidi (pozzolane e tufi, Unità B1) e una costituita da piroclastiti a grana fine (cineriti) e/o caratterizzata da processi di argillificazione (Unità B2). Solo di questi ultimi si hanno a disposizione i risultati di prove di laboratorio, evidentemente per l'impossibilità di prelevare campioni effettivamente indisturbati da materiali tufacei-pozzolatici.

5.3.1 Caratteristiche fisiche

Le **analisi granulometriche** evidenziano una prevalenza della frazione fine: limosa (45-60%) e argillosa (15-30%), con frazione sabbiosa che arriva fino a quasi il 30%.

Tabella 10 – Unità B2 Frazioni granulometriche

ID	Prof. da p.c. (m)	Ghiaia (%)	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)
S4-C1	9.7÷10.0	0.0	6.6	60.6	32.7
S5-C1	5.5÷6.0	0.3	24.8	58.6	16.4
S2/13-C1	6.0÷6.5	0.09	28.67	44.52	26.82

Tabella 11 – Unità B2: proprietà fisiche

ID	Prof. da p.c. (m)	Peso volume (kN/m ³)	Contenuto d'acqua (%)	Porosità (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IC (%)	CLASS USCS	CLASS AASHTO
S4-C1	9.7÷10.0	18.62	26.9	43.5	47.9	22.9	25.0	0.8	CL	A7-6
S5-C1	5.5÷6.0	17.16	33.5	51.3	36.2	27.3	9.0	0.3	ML	A-4
S2/13-C1	6.0÷6.5	17.56	35.92		35.02	20.76	14.26		CL	A7-6

Per quanto riguarda la **classificazione delle terre** USCS i campioni rientrano nel campo dei limi e argille di medio-bassa plasticità (ML e CL).

Trattandosi di terreni di natura vulcanica (argillificati), le classificazioni tipiche e le relative correlazioni, valide per terreni sedimentari, vanno considerate con una certa cautela.

5.3.2 Caratteristiche meccaniche

Tabella 12 – Unità B2. Caratteristiche meccaniche

ID	Prof. da p.c. (m)	PROVA DI TAGLIO DIRETTO	
		c' (kPa)	ϕ (°)
S4-C1	9.7÷10.0	36	24
S5-C1	5.5÷6.0	7	27
S2/13-C1	6.0÷6.5	36	23

Le prove di taglio diretto hanno fornito due risultati comparabili tra loro, ma molto diversi dal terzo. Pur consapevoli di tali variabilità, le tre prove sono state elaborate insieme con interpolazione ai minimi quadrati: si ricava una retta con parametri $c' \cong 23$ kPa, $\phi \cong 25^\circ$, del tutto analoghi a quelli adottati nel progetto definitivo.

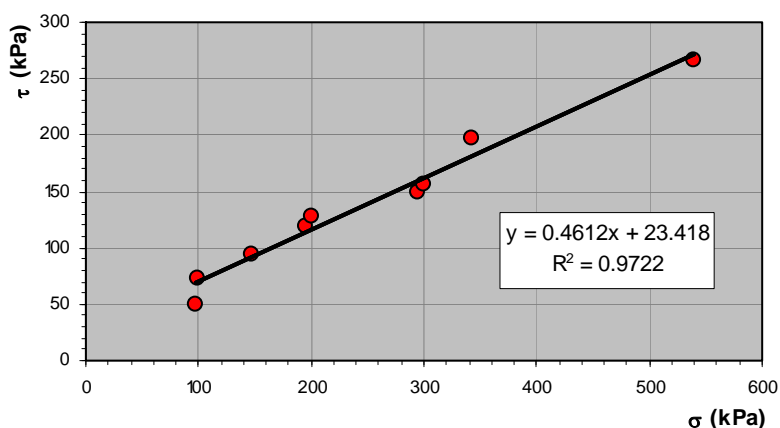


Figura 12 – Unità B2. Risultati delle prove di taglio diretto

Per la porzione semi-litoide dell'unità (tufi e pozzolane, sub-unità B1), non si hanno dati di laboratorio o di prove in sito (ad eccezione di qualche prova SPT a rifiuto) tali da poter sviluppare una vera e propria caratterizzazione. Peraltro questi terreni non vengono interessati direttamente da analisi o verifiche dimensionanti, essendo presenti solo sulle porzioni alte delle due spalle.

I valori di resistenza indicati nel progetto definitivo ($c' = 15$ kPa, $\phi = 28^\circ$), appaiono adeguatamente conservativi e come tali sono stati adottati anche in sede di progetto esecutivo.

5.3.3 Caratteristiche di permeabilità

Per questa unità sono disponibili i risultati delle prove Lefranc riassunti nella tabella seguente.

Prova Le Franc	Profondità (m)	Unità	Permeabilità k (m/s)	
			Carico costante	Carico variabile 1h
S1 – 2	6.0-9.0	B2 (4b)	5.7 E-05	
S5/2013	5.0-8.0	B1		1.7 E-07
S5/2013	11.0-13.5	B2		1.0 E-07
S5/2013	15.0-18.0	B2		1.7 E-07

Da queste prove risultano valori del coefficiente di permeabilità generalmente dell'ordine di 1 E-07 m/s, senza particolari differenze tra le unità B1 e B2 (anche se non si hanno molti dati per valutare effettivamente delle differenze). I valori della permeabilità ottenuti possono essere riconducibili a quelli tipici di materiali nel campo dei limi e delle sabbie, quindi con valori di permeabilità medio-bassi. La permeabilità per questi terreni vulcanici è assimilabile a quella di un mezzo poroso, anche se nelle porzioni più schiettamente litoidi (tufi) la circolazione d'acqua può avvenire soprattutto attraverso le fessure.

5.4 Unità geotecnica C1: Sabbie e ghiaie

In questa unità sono stati prelevati due soli campioni per la ovvia difficoltà di prelievo in terreni grossolani..

5.4.1 Caratteristiche fisiche

Tabella 13 – Unità C1 Frazioni granulometriche

ID	Prof. da p.c. (m)	Ghiaia (%)	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)
S4-C2	13.6÷13.7	21.2	35.6	37.4	5.8
S4-C3	15.0÷15.5	39.1	21.3	29.1	10.5

Le due **analisi granulometriche** evidenziano una prevalenza della frazione sabbioso-ghiaiosa (57 e 60%), una frazione limosa importante (29 e 37%) con argilla inferiore o circa 10%.

Con riferimento alla **classifica USCS** i due campioni rientrano nella classe SM

5.4.2 Caratteristiche meccaniche

In relazione alla natura grossolana e incoerente dei materiali, non è ovviamente possibile ricavare i parametri meccanici a partire dalle prove di laboratorio (irrealizzabili su campioni indisturbati). Una stima indiretta si può ottenere dalle prove SPT. L'unica prova ha fornito un valore di $N_{SPT} = 55$ che indica un elevato stato di addensamento.

Le correlazioni di letteratura per la stima dell'**angolo di attrito** a partire dai dati SPT fornirebbero valori maggiori di 38°. In sede di progetto definitivo è stato stimato un valore di angolo di attrito di 33°, che può ritenersi cautelativo.

Per le **caratteristiche di deformabilità** esistono in letteratura numerose correlazioni, tra le quali si possono selezionare le seguenti.

D'Appolonia et al. (1970)

$$[1] E = 0.756 N_{SPT} + 18.75 \quad (\text{MPa}) \text{ valida per sabbia e ghiaia NC}$$

$$[2] E = 1.043 N_{SPT} + 36.79 \quad (\text{MPa}) \text{ valida per sabbia OC}$$

in cui: N_{SPT} = valore non corretto

Pasqualini: Standard Penetration Test (Politecnico di Torino 1983)

La seguente correlazione interpola i risultati di correlazioni tra prove SPT e prove pressiometriche eseguite da Tornagli, Franke, Ghionna-Lancellotta-Maniscalco, Albert-Hegg-Manassero.

$$E = B \sqrt{N_{SPT}}$$

con $B = 7 \text{ MPa}$

Da queste correlazioni si otterrebbero valori del modulo di deformabilità nel campo 50-100 MPa.

Nel progetto definitivo è stato indicato un valore del modulo edometrico, scarsamente applicabile in questo caso, pari a 20 MPa, oggettivamente molto basso.

5.4.3 Caratteristiche di permeabilità

Le due prove Lefranc eseguite nel progetto definitivo sono indicate nella tabella seguente (per il significato delle note si rimanda alla tabella complessiva delle prove Lefranc).

Prova Le Franc	Profondità (m)	Unità	Permeabilità k (m/s)	Permeabilità k (m/s)
			Carico costante	Carico variabile 1h
S4b – 2 (*)	6.0-9.0	C1 (4a) (*)	1.0 E-04	
S4b – 3 (*)	9.0-12.0	C1/C2 (4b) (**)	8.6 E-05 (*1.2 E-04)	

Per il progetto definitivo sono stati stimati coefficienti di permeabilità ($k_h = 1 \text{ E-03}$; $k_v = 1 \text{ E-04 m/s}$) associabili a materiali con granulometrie sabbioso-ghiaiose. Tali valori sono stati confermati anche in sede di progetto esecutivo.

5.5 Unità geotecnica C2: Limi argillosi ocra

Come già detto, nel progetto definitivo tale unità era stata assimilata, dal punto di vista geotecnico, all'unità dei depositi alluvionali. La storia geologica di questi depositi (e il conseguente grado di sovraconsolidazione) sono però diversi per cui in questa sede si è provveduto a differenziare la caratterizzazione geotecnica.

5.5.1 Caratteristiche fisiche

Da questa unità sono state sottoposti a prove di laboratorio due campioni, dai quali sono state ottenute frazioni granulometriche prevalentemente limoso-argillose, con scarsa percentuale di sabbia (inferiore al 10%). I due campioni sono classificati CL e CH secondo la classifica USCS e A6, A7-6 della AASHTO.

Tabella 14 – Unità C2 Frazioni granulometriche

ID	Prof. da p.c. (m)	Ghiaia (%)	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)
S1-C1	8.5÷9	0.0	5.5	60.4	34.1
S4-C4	19.6÷19.9	0.0	6.5	66.8	26.7

Tabella 15 – Unità C2 Proprietà fisiche

ID	Prof. da p.c. (m)	Peso volume (kN/m ³)	Contenuto d'acqua (%)	Porosità (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IC (%)	CLASS USCS	CLASS AASHTO
S1-C1	8.5÷9	17.67	36.7	50.84	63.4	26.4	37.0	0.7	CH	A-7.6
S4-C4	19.6÷19.9	19.22	22.1	39.27	35.9	17.7	18.2	0.8	CL	A-6

5.5.2 Caratteristiche meccaniche

Tabella 16 – Unità C2. Caratteristiche meccaniche

ID	Prof. da p.c. (m)	PROVA DI TAGLIO DIRETTO	
		c' (kPa)	φ (°)
S1-C1	8.5÷9.0	9	24
S4-C4	19.6÷19.9	36	23

Le due prove di taglio diretto hanno fornito risultati molto diversi tra loro, anche a causa, verosimilmente, delle diverse profondità di prelievo (e quindi del verosimile diverso stato di alterazione e coazione).

Nella caratterizzazione d'insieme della formazione si è fatto riferimento ai risultati del campione più superficiale.

L'unità è stata interessata anche dalla prova dilatometrica DMT2 (tra 9 e 18m). In questa prova sono stati misurati valori di coesione non drenata variabili tra 200 e 400 kPa e del modulo edometrico intorno a 50 MPa.

5.5.3 Caratteristiche di permeabilità

L'unica prova Lefranc eseguita in questa unità ha fornito risultati attribuibili ad un terreno limoso di media-scarso permeabilità. Nei litotipi più argillosi la permeabilità è da stimare ancora più bassa.

Prova Le Franc	Profondità (m)	Unità	Permeabilità k (m/s)	Permeabilità k (m/s)
			Carico costante	Carico variabile 1h
S5/2013	21.0-24.0	C2		1.7 E-07

5.6 Unità geotecnica D: limi argillosi del substrato pleistocenico

5.6.1 Caratteristiche fisiche

Tabella 17 – Unità D Frazioni granulometriche

ID	Prof. da p.c. (m)	Ghiaia (%)	Sabbia (%)	Limo (%)	Argilla (%)
S1-C2	17.5÷18.0	0.3	10.5	43.9	45.3
S3-C4	26.7÷27.0	0.0	4.4	41.1	54.5
S5-C2	12.5÷13.0	0.0	8.8	44.1	47.1
S1/13-C2	12.0÷12.5	0	1.96	42.22	55.82
S1/13-C3	15.0÷15.5	0.14	21.62	40.42	37.82
S2/13-C2	10.5÷11.0	0	16.76	42.72	40.52
S2/13-C3	12.0÷12.5	0	4.26	44.92	50.82

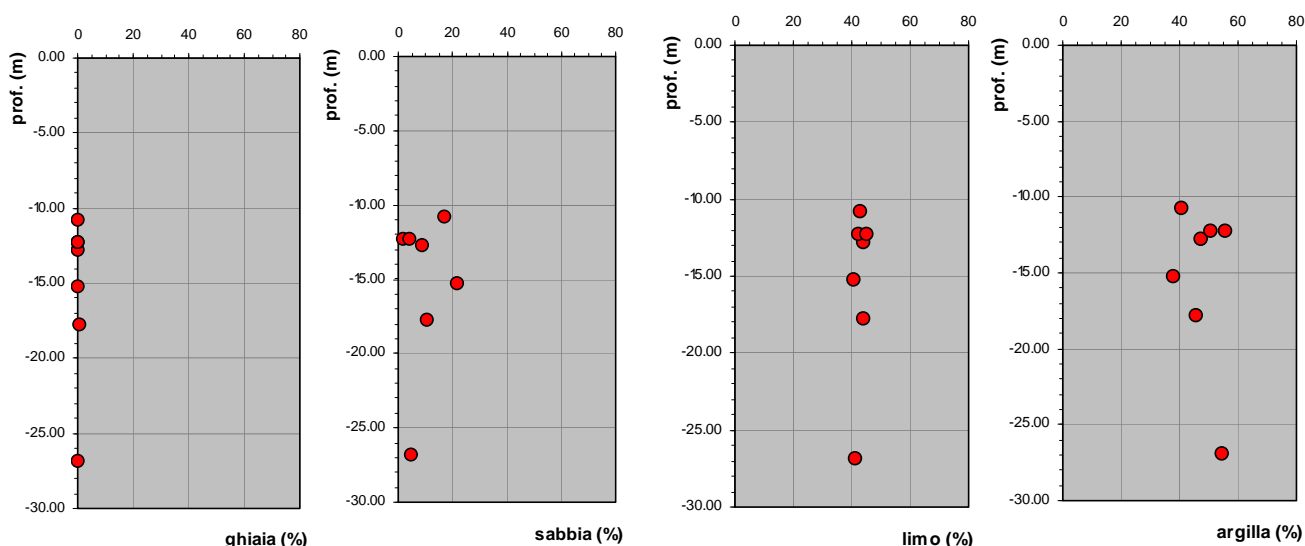


Figura 13 - Granulometrie dei terreni della formazione argillosa del substrato (Unità D)

Dalle **analisi granulometriche** si può osservare una netta prevalenza delle frazioni limose e argillose, con percentuali complessive della frazione fine sempre superiore all'80%.

Il **peso di volume** ricade generalmente nel campo $19\div 20 \text{ kN/m}^3$ con due soli valori inferiori a questo campo.

Plasticità: la distribuzione delle coppia di valori I_p e LL sulla carta di Casagrande indicache i terreni si raggruppano nel campo delle argille inorganiche di media plasticità (CL), con un solo campione CH e uno MH.

Secondo la classificazione AASHTO, gran parte dei campioni è A7-6 e A6 e uno solo A5.

Il **contenuto d'acqua** aumenta leggermente con la profondità.

Non si notano apprezzabili correlazioni degli altri parametri fisici con la profondità.

Tabella 18 – Unità D: proprietà fisiche

ID	Prof. da p.c. (m)	Peso volume (kN/m ³)	Contenuto d'acqua (%)	Porosità (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IC (%)	CLASS USCS	CLASS AASHTO
S1-C2	17.5÷18.0	19.53	24.5	40.70	39.2	19.5	19.7	0.8	CL	A6
S3-C4	26.7÷27.0	18.58	31.5	47.43	50.1	23.8	26.3	0.7	CH	A7-6
S5-C2	12.5÷13.0	19.15	24.4	42.48	46.7	20.9	25.8	0.9	CL	A7-6
S1/13-C2	12.0÷12.5	20.07	22.56		27.22	15.71	11.51		CL	A6
S1/13-C3	15.0÷15.5	19.48	22.27		37.22	15.71	21.51		CL	A6
S2/13-C2	10.5÷11.0	19.55	22.93		47.52	24.68	22.84		CL	A7-6
S2/13-C3	12.0÷12.5	18.82	25.78		55.82	-	-		MH	A5
MEDIA		19.31			43.4	17.2				

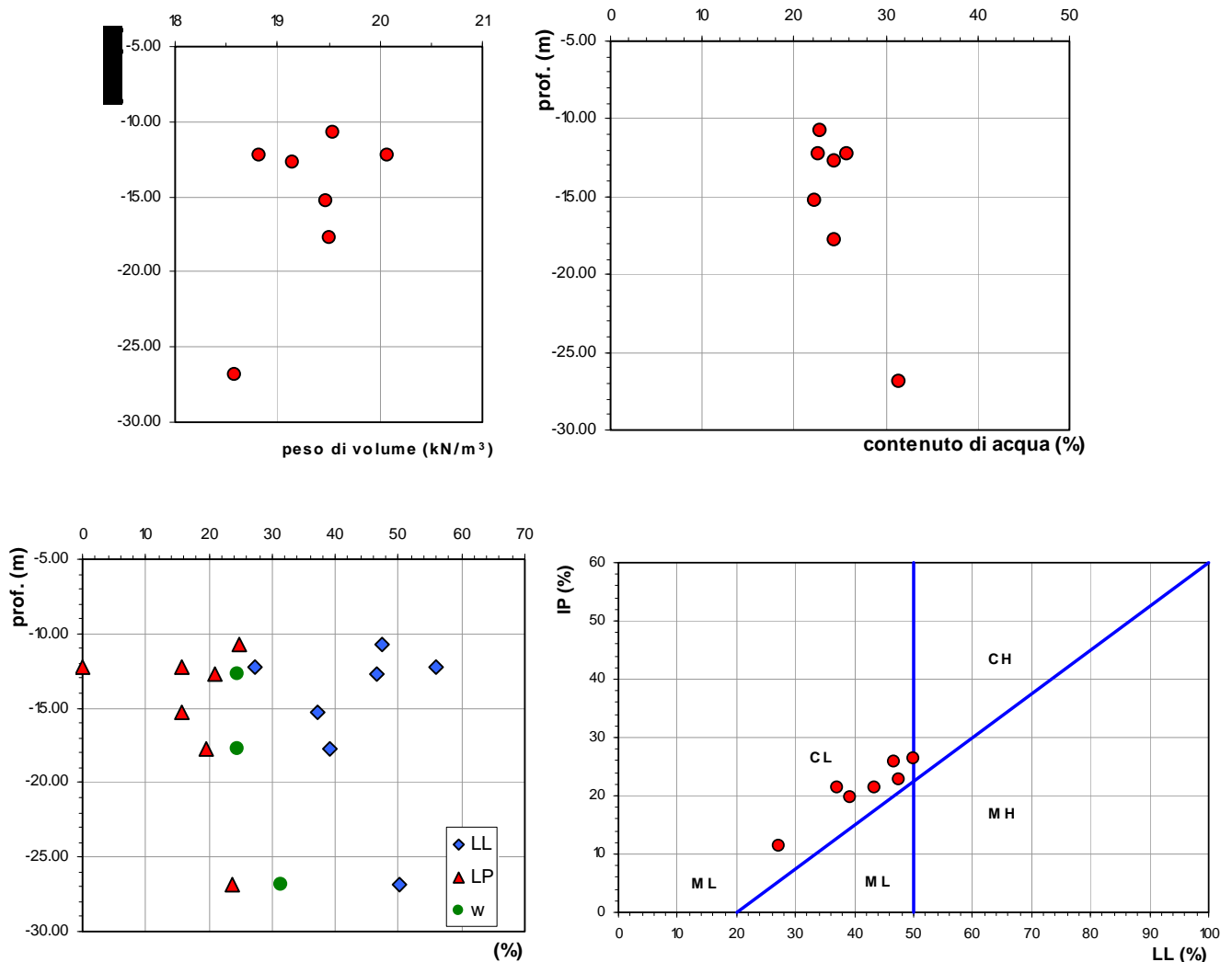


Figura 14 – Proprietà fisiche dei terreni della formazione argillosa del substrato (Unità D)

5.6.2 Caratteristiche meccaniche

Tabella 19 – Unità D. Caratteristiche meccaniche

ID	Prof. da p.c. (m)	PROVA DI TAGLIO DIRETTO		TRIAX UU
		c' (kPa)	φ (°)	c _u (kPa)
S1-C2	17.5÷18.0	26	26	
S5-C2	12.5÷13.0	19	27	
S1/13-C3	15.0÷15.5			256
S2/13-C2	10.5÷11.0	9	30	
S2/13-C3	12.0÷12.5			221
MEDIA		18	27.7	239

Dalle prove di taglio diretto risulta che i valori della **coesione efficace** variano tra 9 e 26 kPa (media 18 kPa) e quelli dell'**angolo di attrito** tra 26° e 30° (media 27.7°).

Elaborando l'insieme dei dati ai minimi quadrati si ottiene una retta tendenziale con ottimo grado di correlazione ($R^2=0.98$) rappresentata dalla coppia di valori $c' = 18.8$ kPa, $\varphi = 27^\circ$.

Dall'unica prova triassiale CIU si ottiene un coppia di valori $c' = 20.6$ kPa, $\varphi = 20.3^\circ$.

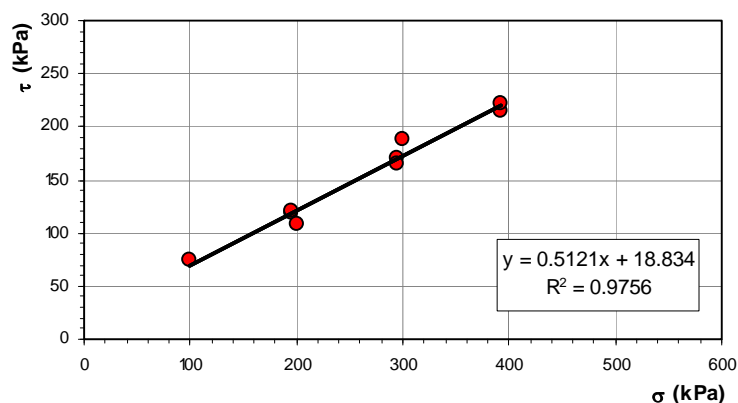


Figura 15 – Prove di taglio diretto nei terreni della formazione argillosa del substrato (Unità D)

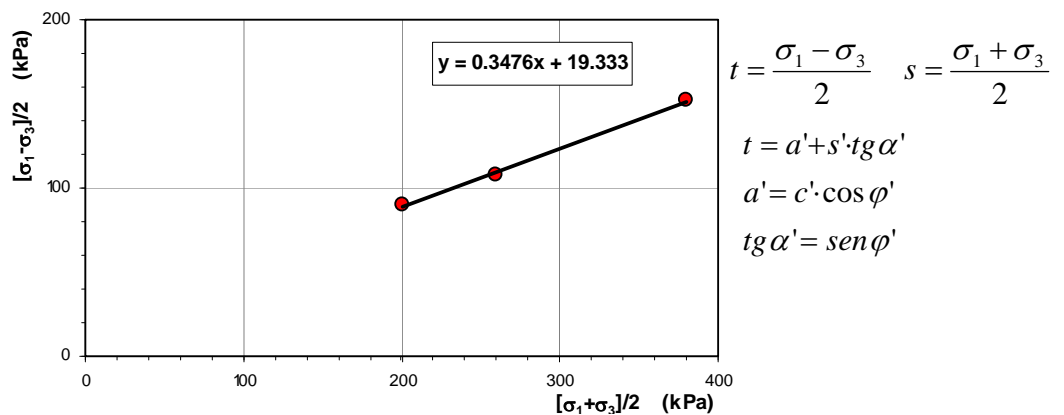
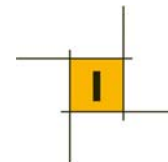


Figura 16 – Prova triassiale CIU nei terreni della formazione argillosa del substrato (Unità D)



Negli studi del progetto definitivo è stata ritenuta appropriata una coppia di valori di coesione e angolo d'attrito pari a $c' = 20$ kPa e $\varphi = 27^\circ$, peraltro simile a quella ottenuta con le prove.

I valori della **resistenza in tensioni totali** possono essere ricavati dalle prove dilatometriche, dalle quali sono stati ottenuti valori di coesione non drenata $C_u=250-300$ kPa. Valori leggermente più bassi sono stati ottenuti con le due prove triassiali UU.

Assumendo un valore rappresentativo, cautelativo, della coesione non drenata pari a 220 kPa (pari al minimo ottenuto con le prove triassiali), si ottiene, con la relazione di Ladd già descritta in precedenza, un valore del **modulo di deformabilità non drenato** $E_u = 176$ MPa.

Dalle stesse prove si ottiene un campo di valori del **modulo edometrico** $E = 30-50$ MPa. Anche in questo caso i valori del modulo ricavati dalle prove edometriche risultano sensibilmente inferiori a quelli ricavati dalle prove in sito (almeno la metà). Per ottenere valori intorno a 40 MPa bisogna fare riferimento alle prove eseguite nel campo di tensioni 1.6-3.2 MPa, molto più elevato delle tensioni litostatiche alla profondità di prelievo.

I valori indicati per le caratteristiche meccaniche (resistenza e deformabilità) sono comparabili con quelli ottenuti per la stessa formazione nell'area romana.

5.6.3 Caratteristiche di permeabilità

Per la stima del coefficiente di permeabilità si può fare riferimento ai risultati delle prove Lefranc e a quelli delle prove di dissipazione.

Prova Le Franc	Profondità (m)	Permeabilità k (m/s)
		Carico variabile 1h
S1 - 4	18.0-21.0	6.5 E-08
S1/2013	11.0-13.0	7.6 E-06
S2/2013	12.0-14.0	6.3 E-07
S5/2013	35.0-38.0	3.8 E-08
S6/2013	25.0-27.0	2.6 E-07

Prova	z (m)	ch (cm ² /sec)	kh (cm/sec)	kh (m/sec)
DMT2	15	4.60E-03	2.30E-09	2.3E-11
SDMT3b	13	0.33	3.30E-06	3.3E-08
SDMT3b	26	2.90E-03	4.80E-09	4.8E-11

I valori del **coefficiente di permeabilità** risultano generalmente nel campo $E-07 \div 08$ m/s, tipico di materiali limo-argillosi poco o per nulla permeabili.

I valori del **coefficiente di consolidazione** ricavati dalle prove dilatometriche risultano intorno a $3-5$ EE-03 cm²/sec, tranne un solo valore molto elevato, attribuibile ad una intercalazioni sabbiosa.

Valori analoghi (7 EE-04 \div 5 EE-03 cm²/sec) sono stati ottenuti dalle prove edometriche di laboratorio.

5.7 Modello geotecnico

Nella tabella seguente si riporta la caratterizzazione geotecnica ricavata dall'insieme dei dati commentati in precedenza. I valori della tabella vanno intesi come "valori caratteristici" ai sensi del DM14/1/2008.

Tabella 20 – Caratteristiche geotecniche dei terreni adottate nel progetto esecutivo

Unità		Descrizione	γ (kN/m ³)	c' (kPa)	ϕ (°)	c_u (kPa)	E _{ed} (MPa)	E (MPa)	Kh (m/s)	Kv (m/s)
A	A1	Alluvioni superficiali con piroclastiti	18	5	24	30	5		5E-05	5E-06
	A2	Alluvioni limo-argillose	18	10	24	50÷80	10÷30		5E-06 *	5E-07
B	B1	Tufi e pozzolane	18	15	28			50	5E-04	5E-05
	B2	Cineriti e piroclastiti argillificate	18	20	25	40		40	1E-04	1E-05
C	C1	Sabbie e ghiaie	18	0	33			50	1E-03	1E-04
	C2	Limi argillosi e sabbiosi ocra	18	10	24	150	30		1E-06	1E-07
D		Formazione argillosa pleistocenica	19	20	27	220	40		1E-08	1E-09

* Nella analisi è stato utilizzato anche il valore $K=1E-04$ m/s, riscontrato con alcune prove in sponda destra.

6 IDROGEOLOGIA

6.1 Inquadramento generale

Come descritto nella Relazione Geologica, nell'area è presente un complesso idrogeologico costituito dai depositi piroclastici sede di una falda idrica sostenuta alla base dalle argille del substrato marino pleistocenico. Questo acquifero trae alimentazione dall'infiltrazione delle piogge nei rilievi collinari vulcanici con flusso sotterraneo prevalentemente rivolto verso l'area di fondovalle, dove il corso d'acqua funge da ricettore naturale della falda. In effetti, oltre ad alcune sorgenti presenti al piede dei versanti, una parte delle acque sotterranee va ad alimentare la falda di subalveo, contenuta nel materasso alluvionale di fondovalle e quindi emerge lungo il fosso in una sorta di sorgente lineare.

6.2 Misure piezometriche

Nell'ambito delle indagini compressive sono stati installati 9 piezometri, tre nella fase del progetto definitivo e 6 per il progetto esecutivo.

Le letture piezometriche del progetto definitivo sono riportate nelle stratigrafie dei sondaggi e si riferiscono verosimilmente alla fine della perforazione. Per il progetto esecutivo sono invece state seguite alcune misure in vari periodi, riportate nella tabella seguente.

Tabella 21 – Misure piezometriche eseguite nel progetto esecutivo

Data	S1/13	S2/13	S3/13	S4/13	S5/13	S6/13
15/5/2013	-1.30	-1.50				
26/9/2013			-2.35 m	-1.69 m		-1.70 m
27/09/2013	-1.50 m	-3.33 m	-2.33 m	-1.70 m		-1.65 m
07/10/2013					-9.80 m	
14/10/2013	-1.52 m	-3.35 m	-2.30 m	-1.70 m	-9.52 m	-1.64 m

Nella **zona della diga** sono stati installati due piezometri sul lato destro del fondovalle (S1 e S2), uno nella zona centrale (S6/13) e due sulla sponda sinistra (S4 e S5/13). I piezometri indicano la falda alla profondità di 2.8 e 2.0m rispettivamente, cioè a quote assolute di 22.4 e 21.6 m s.l.m.. Il piezometro S6/13 indica la falda a q. 21.45. Le quote della falda corrispondono all'incirca alle quote del livello del corso d'acqua, confermando appunto la coincidenza tra il corso d'acqua stessa e il livello di falda.

Sulla sponda sinistra, il piezometro 4 ha misurato il livello della falda alla profondità di 9.6 m corrispondente ad una quota di 21.6 m s.l.m.. Nel vicino sondaggio S6/13 la quota della falda è a 23.75, quindi leggermente superiore. Tenuto conto che si tratta di due misure eseguite a distanza di 4 anni, la differenza può attribuirsi alle variazioni stagionali della falda. In questi sondaggi è stata attraversato lo strato ghiaioso sottostante i tufi e il livello di falda è disposto a quote più elevate dello strato ghiaioso stesso, interessando anche i tufi vulcanici.



La quota è pressoché uguale o poco superiore a quella misurata nel fondovalle, confermando quindi lo schema idrogeologico prima delineato. Ovviamente tale circostanza comporta la possibilità di un aggiramento nel caso di innalzamento di livelli di invaso, stante l'elevata permeabilità delle ghiaie e dei materiali vulcanici presenti in sponda sinistra.

Non si hanno invece dati piezometrici in sponda destra, anche se c'è da attendersi una situazione sostanzialmente analoga, a parte l'assenza dello strato ghiaioso, che dovrebbe rendere mediamente meno permeabile il sottosuolo del versante in questione.

Nella zona **dell'argine secondario** le misure nel piezometro del sondaggio S1/2013, ubicato nell'area di fondovalle, indica la profondità della falda a 1.5m dal p.c., in accordo con le osservazioni raccolte nei scavi di saggio.

Nel piezometro S2/2013, ubicato su un piccolo dosso leggermente rialzato rispetto alla piana, la falda, dopo una prima fase, si è stabilizzata a profondità di circa 3.3m dal p.c., che corrisponde alla stessa quota della falda del fondovalle. Anche in questo caso si conferma la presenza di una falda coincidente con il corso d'acqua.