

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA.....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>ASPETTI GEOLOGICI E GEOTECNICI DELLA STRETTA DI SBARRAMENTO E IN PARTICOLARE DELLA SPALLA DESTRA.....</b>	<b>5</b>
2.1	SITUAZIONE GEOLOGICA DELLA ZONA DELLA STRETTA.....	5
2.2	CARATTERISTICHE GEOTECNICHE GENERALI DEI TERRENI.....	6
2.3	I TERRENI DI FONDAZIONE DELLA DIGA IN SPALLA DESTRA CON PARTICOLARE RIGUARDO ALLA TENUTA IDRAULICA .....	7
2.3.1	Caratteri litologici e strutturali della spalla destra .....	11
2.3.2	Le falde idriche naturali e i rapporti con l'invaso.....	12
<b>3</b>	<b>LA SITUAZIONE IDROGEOLOGICA IN SPALLA DESTRA DURANTE L'ESERCIZIO SPERIMENTALE DELL'INVASO .....</b>	<b>14</b>
3.1	INTERVENTI SUPPLEMENTARI RELATIVI ALLA TENUTA IDRAULICA REALIZZATI PRIMA DEL 1994 ...	14
3.2	CONDIZIONI DI TENUTA IN SPALLA RILEVATE NELL'ESERCIZIO SPERIMENTALE DEL SERBATOIO NEL PERIODO 1994-2012.....	16
3.2.1	Generalità.....	16
3.2.2	Comportamento dei piezometri ubicati sul pendio a monte dello sbarramento ed indizi di un "flusso di aggiramento" laterale. ....	18
3.2.3	Comportamento dei piezometri ubicati sul pendio a valle della diga .....	20
3.2.4	Le portate del drenaggio destro .....	23
3.2.5	Modello schematico del flusso di filtrazione in spalla destra .....	25
3.3	EVENTUALITÀ DI UNA FILTRAZIONE PER "SOTTOPASSO" DEL NUCLEO DI TENUTA .....	25
<b>4</b>	<b>CONSIDERAZIONI RELATIVE AI RISULTATI DELLE INDAGINI DEL 2016.....</b>	<b>27</b>
4.1	INDAGINI GEOFISICHE .....	27
4.2	INDAGINI CON SONDAGGI.....	28
4.3	CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE .....	29
<b>5</b>	<b>CONSIDERAZIONI RELATIVE AI DATI ESPOSTI E CONSEGUENTE PROPOSTA PROGETTUALE.....</b>	<b>31</b>
5.1	CONSIDERAZIONI PRELIMINARI.....	31
5.2	L'INTERVENTO PROPOSTO IN PROGETTO .....	31
<b>6</b>	<b>DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO.....</b>	<b>36</b>
<b>7</b>	<b>APPENDICE - VALUTAZIONE DEI PARAMETRI GEOTECNICI DEI TERRENI INTERESSATI DAGLI SCAVI DI SBANCAMENTO.....</b>	<b>37</b>
7.1	INTERPRETAZIONE DELLE INDAGINI IN SITO.....	37

7.2	INTERPRETAZIONE DELLE PROVE DI LABORATORIO .....	37
7.3	INTERPRETAZIONE DELLE PROVE SPT .....	39
7.4	PROVE DI PERMEABILITÀ IN SITO .....	40
7.5	SCELTA DEI PARAMETRI GEOTECNICI.....	41

## 1 PREMESSA

Gli interventi proposti in questa sede sono diretti a fornire un primo contributo alla soluzione dei problemi di carattere “geotecnico”, relativi alla situazione idrogeologica della spalla destra della stretta di sbarramento della diga di Penne, motivati dagli indizi di flussi di filtrazione dal serbatoio in corrispondenza della porzione superiore della spalla suddetta, quando i livelli di invaso superano una quota “critica” localizzata intorno a 250 m s.m.<sup>(1)</sup>.

Gli indizi suddetti sono segnalati essenzialmente da un brusco innalzamento dei livelli piezometrici nel sottosuolo del pendio a valle e del pendio a monte della diga, insieme con un parallelo incremento delle portate del drenaggio “destro”, situato alla base del semicorpo di valle della diga stessa.

Una carenza di tenuta nella porzione superiore della spalla in oggetto fu segnalata fin dai primi invasi sperimentali del serbatoio quando (1974), con il raggiungimento dei maggiori livelli di invaso, la portata del drenaggio destro raggiunse valori superiori a 100 l/min. Tali manifestazioni hanno motivato (già nel 1981) un importante intervento supplementare sullo schermo di tenuta realizzato nella fase costruttiva degli anni '60; intervento che riuscì peraltro solo ad attenuare il fenomeno.

Più recentemente, dopo il 1994, la situazione idrogeologica e geotecnica locale è stata oggetto di una campagna di indagini volta ad acquisire maggiori elementi di conoscenza, necessari per l'impostazione di un intervento risolutivo che potesse consentire il raggiungimento in sicurezza della piena funzionalità dell'impianto in oggetto.

Nel rispetto delle limitazioni al livello di invaso stabilite a suo tempo dal RID (oggi “Direzione generale per le dighe”), il “monitoraggio” della situazione sviluppato negli anni di esercizio dell'invaso ha consentito di inquadrare il suddetto comportamento in un modello idrogeologico e geotecnico sufficientemente approssimato del sottosuolo interessato.

Il quadro delle conoscenze attuali porta a considerare la manifestazione di due possibili percorsi di filtrazione da monte a valle della diga, attraverso i livelli ghiaioso sabbioso-limosi delle *alluvioni antiche* che ne costituiscono localmente la fondazione, e rispettivamente: (a) un percorso “*di aggiramento*” laterale dello sbarramento attraverso i terreni permeabili a monte e (b) un percorso di “*sottopasso*” della porzione estrema del nucleo di tenuta.

In questa sede è riassunta in gran parte l'esposizione dell'analisi del fenomeno di filtrazione in oggetto e dei possibili provvedimenti correttivi, già contenuta in precedenti rapporti trasmessi alla “Direzione Dighe”, fino al più recente, presentato in data settembre 2011.

---

<sup>(1)</sup> Nel seguito si farà riferimento per semplicità a tale quota. In effetti, si tratta di un intervallo di quote critico, compreso tra 248 e 251 m s.m.

A seguito delle osservazioni formulate al riguardo dalla Direzione suddetta, viene proposto in questa sede il progetto di un intervento, mirato a perfezionare il regime di controllo della situazione idraulica della spalla in oggetto: eliminando intanto (o quanto meno riducendo sostanzialmente) la filtrazione connessa all'“*aggiramento*” laterale dello sbarramento, accertato attivo in concomitanza con le maggiori quote di invaso.

Al momento non si hanno segnalazioni sicure della presenza di altri flussi di filtrazione, e in particolare del citato eventuale *sottopasso del nucleo di tenuta in corrispondenza dell'estremità destra del corpo diga* (che, nel caso, alimenterebbero direttamente il *drenaggio destro* alla base del semicorpo di valle della diga stessa. In proposito si sta esaminando la possibilità di condurre un accertamento specifico e, in ogni caso, è previsto di inserire nel sistema di monitoraggio già esistente anche il controllo sistematico del contenuto di materiale solido in sospensione nelle acque raccolte dal *drenaggio suddetto*.

Nella presente relazione viene riassunta l'evoluzione delle conoscenze sulle situazioni idrogeologica e geotecnica della spalla destra dello sbarramento e vengono esposti gli aspetti geotecnici degli interventi in conseguenza proposti.

Questo documento nella prima revisione progettuale del febbraio del 2014 è stato redatto dal Prof. Ing. Sergio Olivero, con la collaborazione della scrivente.

Attualmente è stata predisposta una revisione parziale del documento a seguito delle indagini eseguite nel 2016 a cura del Committente che hanno comportato un aggiornamento circa l'estensione planimetrica ed altimetrica del tracciato di progetto, come nel seguito meglio dettagliato.

## 2 ASPETTI GEOLOGICI E GEOTECNICI DELLA STRETTA DI SBARRAMENTO E IN PARTICOLARE DELLA SPALLA DESTRA

### 2.1 Situazione geologica della zona della stretta

Per l'inquadramento generale della situazione della stretta in esame nella geologia locale si rimanda per i dettagli alle relazioni dell'epoca progettuale [1], [2] e [3] e di una più recente indagine [6], nonché alla “*Relazione geologica*” – codice elaborato *PESD00RL002*.

La stretta in corrispondenza della quale è ubicata la diga di Penne ricade poco a valle della confluenza da destra del Torrente Gallero nel Fiume Tavo.

La sezione di sbarramento si presenta nettamente asimmetrica, con il fianco sinistro piuttosto acclive e il fianco destro invece caratterizzato da modesta pendenza.

Il sottosuolo dell'area della stretta, è costituito da una successione di terreni marnoso-arenacei in facies di flysch, attribuita alla Formazione Cellino del Pliocene inferiore (“*formazione marnoso-arenacea*”) che, in corrispondenza del fondovalle e su parte delle sponde, è ricoperta da “*alluvioni attuali*” e rispettivamente da “*alluvioni antiche*” del F. Tavo).

Uno stralcio della carta geologica elaborata nella fase progettuale (risalente agli anni '60 del secolo scorso) è riprodotto nella fig. 1 (da F. Ippolito e F. Capozza, 1962 ).

Gli aspetti geologici specifici della spalla destra qui in esame sono in gran parte dedotti dalle documentazioni relative alle fasi progettuale e costruttiva dello sbarramento, quando la situazione locale (oggi mascherata dalle opere eseguite) era ancora esposta all'osservazione diretta.

La *formazione marnoso-arenacea* pliocenica è costituita da marne, marne argillose e/o arenacee in strati sottili (raggruppati in genere in pacchi con spessore da alcuni metri alla decina di metri) alternate a potenti bancate di arenarie più o meno cementate.

Prima della costruzione della diga, essa affiorava prevalentemente lungo la sponda sinistra, sia nella zona prossima all'alveo, sia a quote superiori, dove si presentava generalmente coperta da una coltre eluviale di modesto spessore.

Sulla spalla destra, invece, il *substrato pliocenico*, fino circa a quota 270 m s.m., risultava coperto da una spessa coltre di *alluvioni antiche* del F. Tavo, nelle quali sono rappresentati tutti i caratteri granulometrici: da ghiaie con sabbia, a sabbie con ghiaia o più o meno limose e argillose, a limi sabbioso-argillosi e ad argille limoso sabbiose. Queste *alluvioni antiche* oggi affiorano a monte e a valle del corpo della diga, solo localmente mascherate da depositi alluvionali e/o eluviali più recenti.

Le *alluvioni attuali (o recenti)*, costituite da ghiaie sabbiose, in corrispondenza della sezione di imposta affioravano solo sul fondovalle del F. Tavo. Non hanno alcuna rilevanza per gli argomenti del presente rapporto, dato che nell'area di fondazione della diga furono completamente asportate.

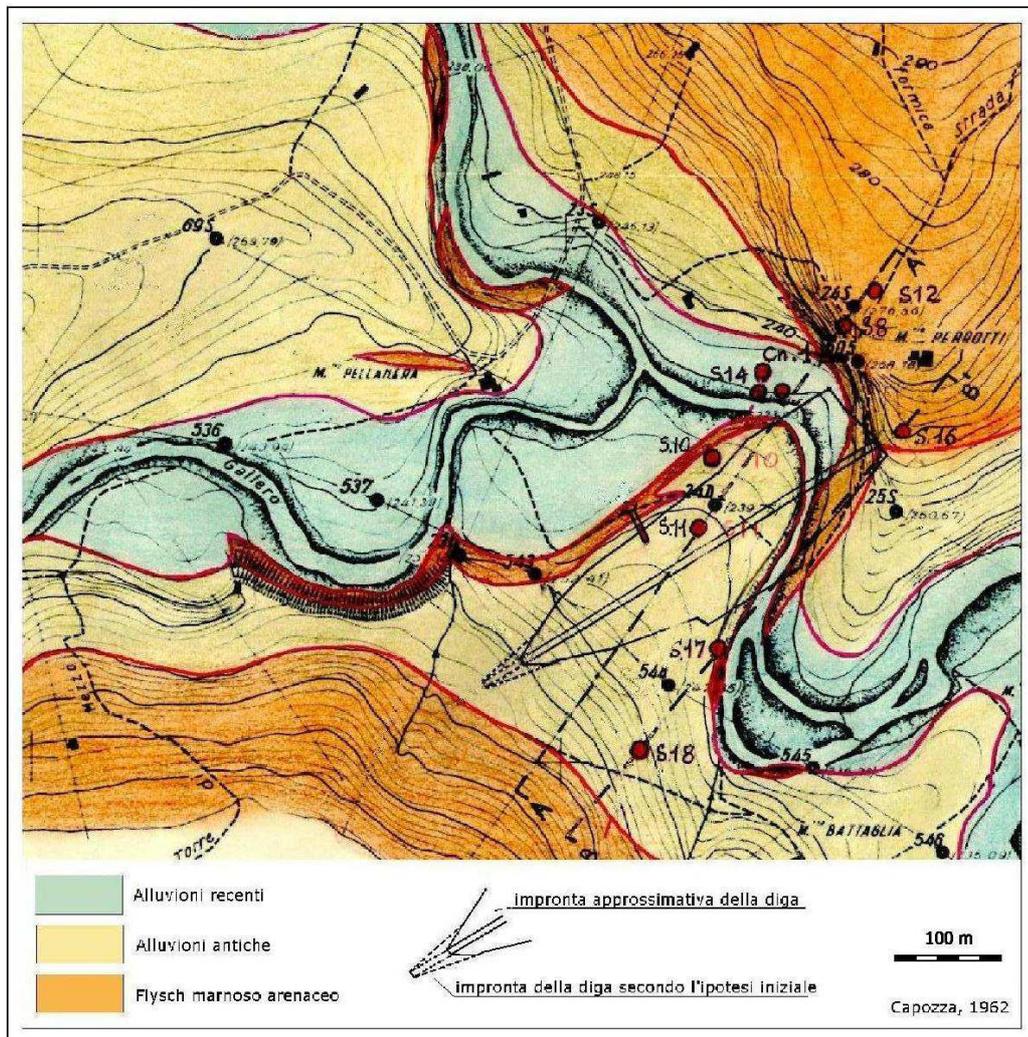


Figura 1 – Stralcio della carta geologica elaborata da Capozza nel 1962

## 2.2 Caratteristiche geotecniche generali dei terreni

Con riferimento alle documentazioni geotecniche delle fasi progettuale ed esecutiva (F. Capozza, 1963 e 1964), riguardo alle caratteristiche di permeabilità *a livello di litotipo*, i costituenti litologici della *formazione marnoso-arenacea* pliocenica presentano una permeabilità trascurabile. *A livello di ammasso*, la permeabilità, dovuta a famiglie di giunti, è spesso accentuata in corrispondenza dei livelli arenacei mentre è generalmente scarsa, fino a praticamente trascurabile, in corrispondenza dei livelli marnosi.

Nelle *alluvioni antiche* sono rappresentati tutti i caratteri granulometrici. La permeabilità della formazione dipende fortemente dalla diversa composizione granulometrica dei litotipi che localmente

la costituiscono: da modesta a decisamente bassa (fino a tecnicamente trascurabile) nei livelli prevalentemente limo-argillosi, a elevata nei livelli in cui prevale la componente sabbioso-ghiaiosa, o dove, in presenza di un elevato grado di cementazione, è presente una fratturazione acquisita per disturbo tettonico. Dato l'ambiente di deposizione, le suddette caratteristiche sono risultate tra loro associate in proporzioni variabili da sito a sito, come generalmente nei depositi alluvionali di corsi d'acqua a regime quasi torrentizio. La struttura a livello di ammasso non è costituita da strati regolari granulometricamente omogenei, ma è invece piuttosto disordinata, con associazioni granulometriche alquanto varie anche a piccola distanza. Nel caso specifico, le suddette caratteristiche sono risultate tra loro associate in varie proporzioni.

### **2.3 I terreni di fondazione della diga in spalla destra con particolare riguardo alla tenuta idraulica**

Dai documenti disponibili relativi alla fase progettuale e alle successive fasi costruttive, risulta che, prima dei lavori per la realizzazione dell'invaso, in corrispondenza del sito di sbarramento, le "alluvioni antiche" affioravano in sponda destra quasi su tutta l'area destinata alla fondazione del corpo diga<sup>(2)</sup> e alquanto più a monte, fino a quote prossime a 270 m s.m. Vedi planimetria geologica di fig. 1, redatta prima degli scavi di fondazione (F. Ippolito e F. Capozza, 1962; F. Capozza, 1962).

In corrispondenza dell'area di imposta del nucleo di tenuta, i terreni delle alluvioni antiche furono scavati ed asportati dal fondovalle fino alla quota 232, 8 m circa, per cui in questo tratto il nucleo di tenuta risulta fondato direttamente nei terreni del *substrato pliocenico* "marnoso arenaceo". A partire dalla quota suddetta, e fino all'estremità destra dello sbarramento, sia il nucleo di tenuta, sia i semicorpi di monte e di valle, sono stati fondati direttamente sulle *alluvioni antiche* che localmente ricoprono i terreni del *substrato marnoso-arenaceo pliocenico*.

In fig. 3 (F. Capozza, 1964) è rappresentata la sezione geologica in asse diga in spalla destra, ricostruita prima dello sviluppo completo degli scavi di fondazione.

La costituzione del sottosuolo in corrispondenza dell'asse della diga in a spalla destra, è rappresentata nella sezione geologica longitudinale della fig. 4 (derivata dagli elaborati grafici relativi all'attività costruttiva sviluppata nella seconda metà degli anni '60), nella quale è evidente il riferimento alla citata sezione di fig. 3. Alla sezione di fig. 4 si farà riferimento nel seguito in questa sede<sup>(3)</sup>.

---

(2) In una carta geologica elaborata poco dopo il 1962, reperita solo in minuta, nella porzione di pendio oggi ricoperta dal semicorpo di monte è riportata anche una consistente area di affioramento di terreni del substrato pliocenico (vedi fig. 2).

(3) Nella figura sono riportate, in corrispondenza del coronamento della diga, le indicazioni numerate delle "sezioni costruttive", che costituivano i riferimenti di cantiere ai grafici di progetto e di computo metrico. A tali sezioni si farà riferimento spesso anche, per localizzare caso per caso l'oggetto del discorso sulla cartografia disponibile. Per il tratto a monte della sezione costruttiva 2 (di particolare interesse in questa

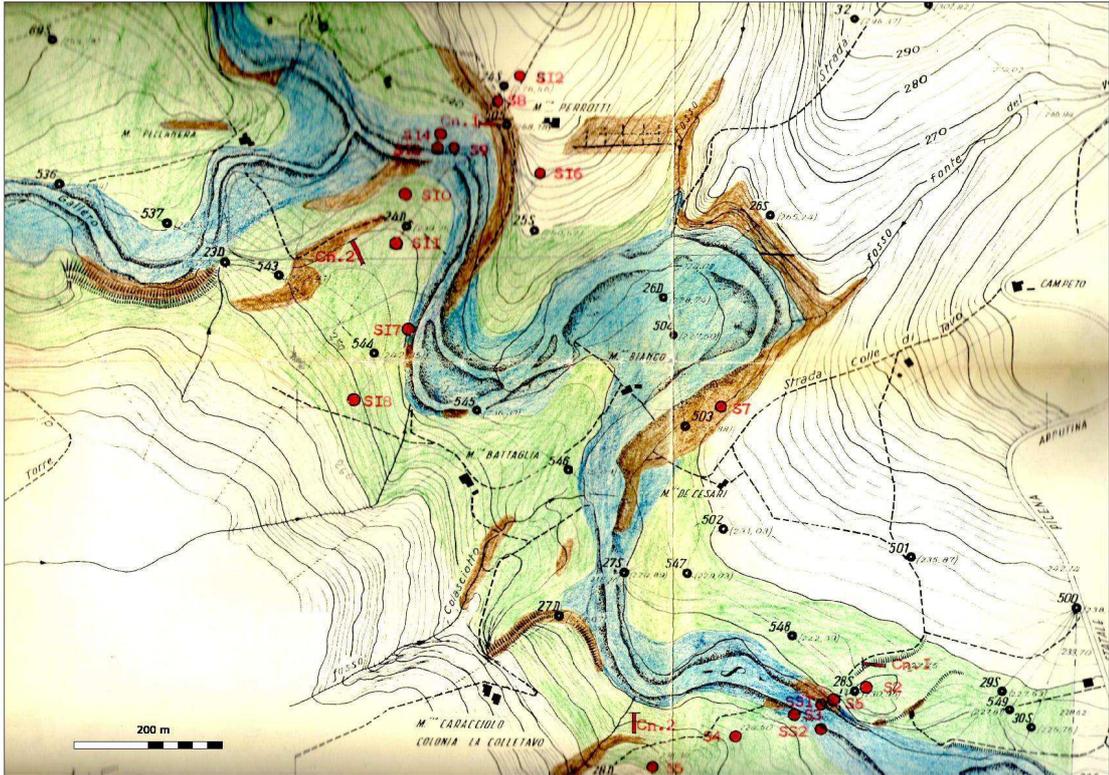
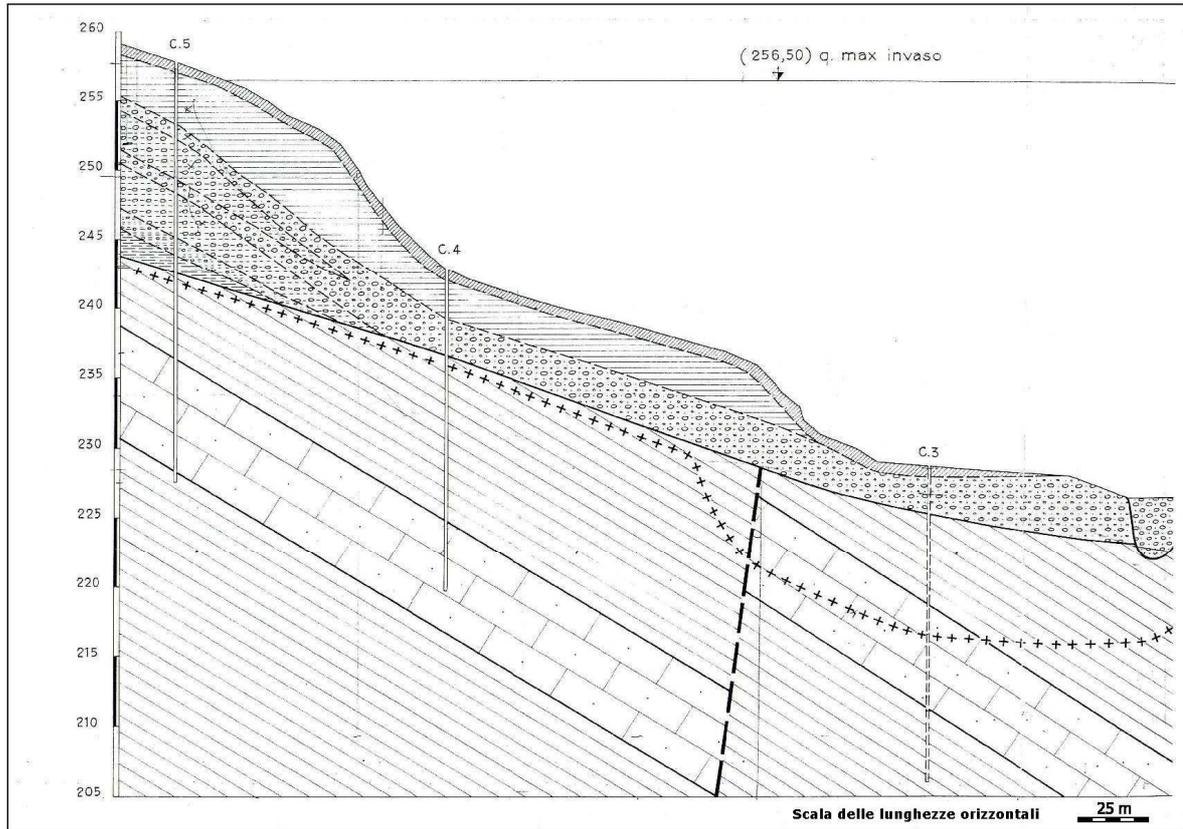


Figura 2 – Stralcio della carta geologica elaborata da Capozza nel 1964

sede), la costituzione geologica rappresentata nella figura 4 è stata aggiornata in qualche aspetto di dettaglio sulla base dei risultati dei sondaggi di indagine eseguiti nel 2006.



- TERRENO VEGETALE** {  - Materiale sabbio-limoso argilloso.
- ALLUVIONI ATTUALI** {  - Ghiaie debolmente sabbiose.
- ALLUVIONI ANTICHE** {
  -  - Limo sabbioso-argilloso di colore brunastro.
  -  - Ghiaia con grossi ciottoli e sabbia.
  -  - Ghiaia e sabbia con argilla.
  -  - Argilla grigia, sabbiosa, con ciottoli.
  -  - Argilla sabbiosa grigia.
- FORMAZIONE MARNOSO-ARENACEA** {
  -  - Marna sabbiosa.
  -  - Sabbia fine, micacea, ed arenaria con grado di cementazione variabile.
- +++** - Limite superiore della formazione marnoso-arenacea con comportamento di terreno praticamente impermeabile.
- - Faglia probabile.
- C.4 C.3** - Sondaggio contenuto nel piano della sezione o proiettato (i sondaggi C.2 e C.3 sono inclinati a 45° rispettivamente verso valle e verso monte).

**Figura 3 - Sezione geologica della spalla destra in asse diga (da F. Capozza, 1964)**

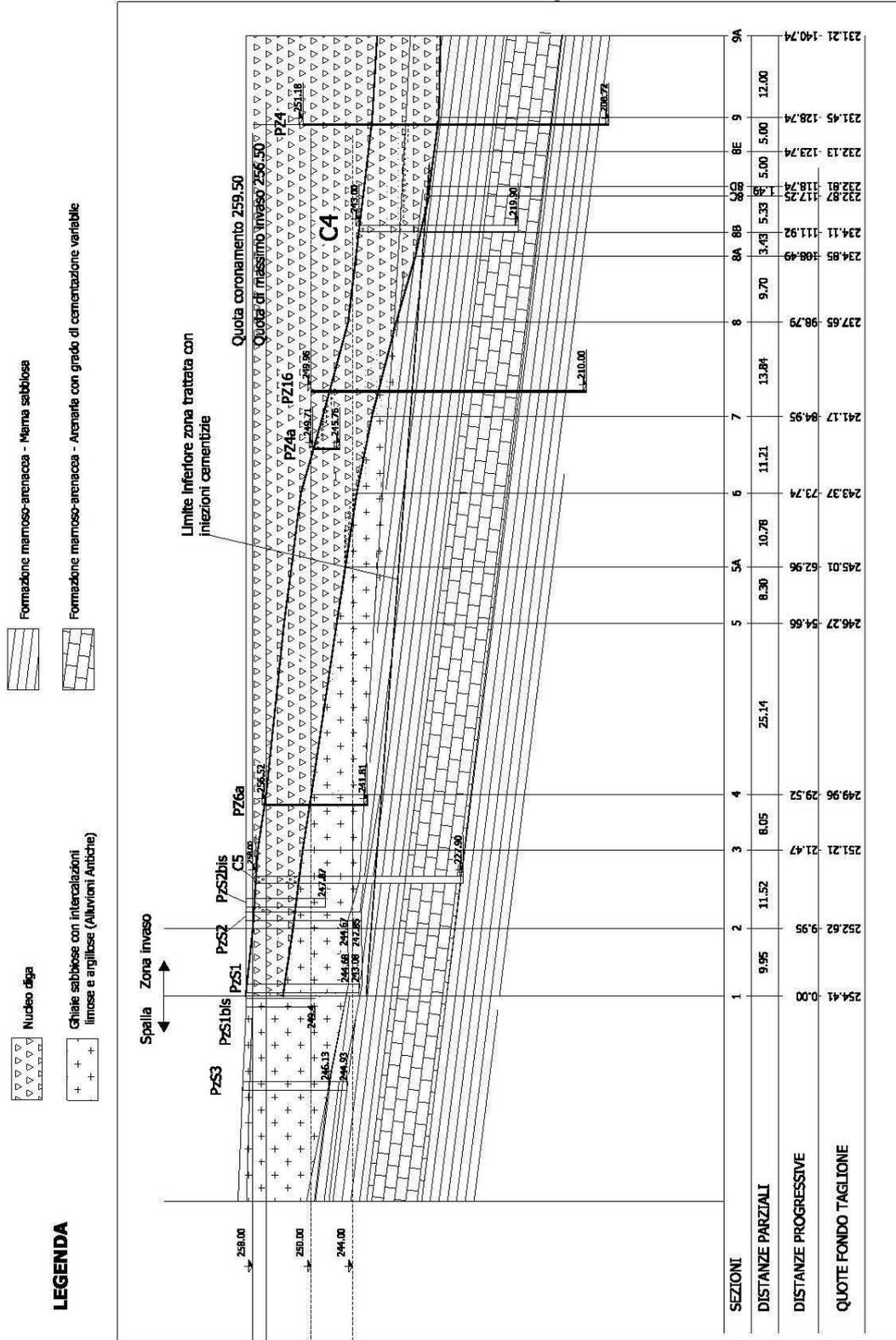


Figura 4 - Sezione geologica aggiornata con sondaggi marzo 2006

### *2.3.1 Caratteri litologici e strutturali della spalla destra*

Per quanto si riferisce alla tenuta idraulica dello sbarramento, nella già citata relazione di F. Capozza (1964) le caratteristiche di tenuta delle formazioni interessate nella valutazione precedente alla fase costruttiva sono descritte come segue:

*“La formazione marnoso-arenacea pliocenica presenta una permeabilità per filtrazione del tutto trascurabile ed una permeabilità per fratture che assume entità considerevole nelle zone più superficiali, ove le fratture stesse sono “aperte” per rilasciamento e dilavamento, ma che risulta praticamente nulla in profondità, ove le fratture sono serrate.*

*La parte superficiale permeabile si estende sino a profondità di una dozzina di metri e risulta non si prolunghi nell'estremo destro della sezione d'imposta della diga.*

*In tale parte superficiale permeabile della formazione marnoso-arenacea si conferma la necessità di realizzare un velo di tenuta, la cui estensione in profondità dovrebbe mantenersi sull'ordine di grandezza di almeno una quindicina di metri già indicato nella relazione geologica in data 25/4/62. Sarà prudente estendere tale velo anche all'estremo destro della sezione di imposta, limitandone peraltro la profondità a circa 5 m.”*

Per quanto si riferisce alle alluvioni antiche, la medesima relazione si esprime come segue:

*“Sono costituite da materiali praticamente impermeabili (materiale sabbioso-limoso-argilloso, ghiaie e sabbie con argilla, argilla più o meno sabbiosa con o senza ciottoli) e da materiale di non trascurabile permeabilità (ghiaie sabbiose e limose). Ove i due tipi si sovrappongono oppure si alternano sulla verticale, l'insieme deve risultare spiccatamente anisotropo nei riguardi della permeabilità. In particolar, potrebbe risultare trascurabile la sua permeabilità verticale, ma non altrettanto è da ritenere possa accadere per la sua permeabilità in orizzontale.*

*Pertanto, poiché i livelli permeabili affiorano a monte e a valle della diga, per evitare un moto di filtrazione delle acque a valle dello sbarramento attraverso tali livelli è necessario realizzare un diaframma attraverso l'intera coltre di alluvioni antiche, esteso lateralmente entro la sponda destra in modo da seguire con continuità il tetto della formazione fin dove questo raggiunge la prevista quota di massimo invaso.”* (La sottolineatura è dello scrivente)

La suddetta considerazione costituiva evidentemente un richiamo al rischio di *filtrazioni per aggiramento laterale dello sbarramento*, qualora il diaframma suddetto non fosse stato prolungato a monte della diga fin dove la *marna del substrato pliocenico* (che nel sottosuolo della sezione terminale della diga si trova al letto delle *alluvioni antiche*, a quota 245 m s.m. circa) raggiunge nel sottosuolo la quota corrispondente al massimo livello di invaso previsto (257,50 m s.m.).

Nel corso della fase costruttiva (sviluppata nella seconda metà degli anni '60), e in particolare nelle prime fasi esecutive dello schermo di tenuta mediante iniezioni, furono rilevate permeabilità non trascurabili: in spalla destra, non solo nelle *alluvioni antiche*, ma anche nei sottostanti terreni del *substrato pliocenico* e in particolare nei membri *arenacei* di tale formazione.

In quest'ultimo caso la riscontrata permeabilità fu riferita al reticolo di diaclasi presenti e a piccola profondità relativamente aperte. Tale constatazione portò ad un sostanziale ridimensionamento dello schermo di iniezioni originariamente previsto<sup>(4)</sup>, che ha riguardato sia la profondità sia la densità dei fori di iniezione. Rimase comunque attuata, per la porzione superiore della sponda destra, la soluzione costruttiva di progetto che alla base del nucleo di tenuta, a partire dalla quota 237,6 m s.m. circa, conserva il lembo di *alluvioni antiche* al tetto della formazione pliocenica.

### ***2.3.2 Le falde idriche naturali e i rapporti con l'invaso***

Come già segnalato dalle indagini che precedettero ed accompagnarono la costruzione della diga ed è stato confermato dalle osservazioni piezometriche relative a periodi con invaso ai minimi livelli, il sottosuolo del versante destro del Tavo, anche nella zona della stretta di sbarramento, risulta sede di falde idriche naturali alimentate dalle precipitazioni atmosferiche.

Tale circolazione idrica interessa sia le *alluvioni antiche* ghiaioso-sabbioso-limose, localmente affioranti o oggi coperte dal corpo della diga, sia gli eventuali livelli permeabili dei sottostanti terreni del *flysch marnoso arenaceo* del substrato pliocenico.

Le previsioni progettuali sulla tenuta dello sbarramento consideravano particolarmente permeabili il pacco di *alluvioni antiche* ghiaioso-sabbioso-limose ed, in subordine, anche le *arenarie* del substrato pliocenico; queste, in relazione con il loro grado di fessurazione, peraltro alquanto variabile da sito a sito.

In effetti, le caratteristiche di permeabilità, sia delle *alluvioni antiche*, sia delle *arenarie* del *substrato pliocenico*, nel corso delle lavorazioni sono risultate alquanto variabili da sito a sito, con punte localmente molto elevate in entrambe le formazioni interessate.

Gli orizzonti rappresentati in fig. 4 alla base del nucleo di tenuta<sup>(5)</sup> sono continui da monte a valle della sezione di sbarramento. Quindi, in relazione con le caratteristiche di permeabilità specifiche di

(4) Le vicende relative alla realizzazione dello schermo di tenuta sono riassunte nel rapporto del Direttore dei Lavori, in data 12.02.1968. Fu adottata una miscela costituita dal 40% di cemento e 60% di "argilla" (non è nominata la *bentonite*).

(5) In spalla destra, il sottosuolo immediato del nucleo di tenuta della diga tra le "sezioni costruttive 1 e 8" comprende essenzialmente quattro orizzonti, con giacitura a franapoggio. Dal basso verso l'alto sono presenti: una "marna sabbiosa" con tetto a quota variabile da 210 m circa a 230 m; al tetto di questa, una bancata di arenarie con spessore di circa 10 m ed un secondo banco di marna sabbiosa con spessore variabile da 6 a 10 m. Al tetto di quest'ultimo segue un deposito di alluvioni antiche che, dopo la parziale asportazione eseguita in fase costruttiva, presenta uno spessore variabile (misurato dalla base del nucleo di

ciascuno, quelli presenti nel sottosuolo del semicorpo di valle della diga, in carenza dello schermo di tenuta, sarebbero naturalmente in comunicazione idraulica con il serbatoio.

E' realistico ritenere che, nonostante gli interventi sullo schermo di ritenuta effettuati in passato, un certo flusso possa persistere. Le portate normali dei drenaggi alla base del semicorpo di valle della diga per livelli di invaso fino a 250 m s.m. attestano comunque una situazione di tenuta generalmente accettabile entro tale limite. Gli interventi considerati in questa sede riguardano perciò la situazione che si determina solo per i livelli di invaso superiori al suddetto limite, e quindi il comportamento dei terreni di fondazione al di sopra della suddetta quota.

A questo proposito, il pacco di *alluvioni antiche* al di sopra di quota 250 m s.m. fa parte dei terreni alluvionali depositati in corrispondenza dell'ampio terrazzo di erosione dell'antica sponda destra del torrente Gallero (che oggi corrispondono alla sponda del serbatoio) per un centinaio di metri (vedi fig.1). Come esposto nei paragrafi successivi, quando questo pacco alluvionale viene raggiunto dalle acque dell'invaso, la falda idrica che si forma nel sottosuolo del terrazzo si porta alla quota dell'invaso stesso e la segue nelle sue variazioni.

Questo aspetto sarà esaminato più oltre nel cap. 3.

---

tenuta) compreso tra 0 in corrispondenza della "sezione costruttiva 8C" e una quindicina di metri, a monte della "sezione costruttiva 1" (vedi Fig. 2).

### 3 LA SITUAZIONE IDROGEOLOGICA IN SPALLA DESTRA DURANTE L'ESERCIZIO SPERIMENTALE DELL'INVASO

Nei paragrafi seguenti si farà riferimento alla sezione geologica del sottosuolo della diga riportata in fig. 4, ripresa, come s'è detto, da un grafico redatto nella fase costruttiva (con un modesto aggiustamento, derivato dai risultati dei sondaggi di indagine eseguiti nel 2006).

#### 3.1 Interventi supplementari relativi alla tenuta idraulica realizzati prima del 1994

A partire dal 1974, con diga ormai terminata, e invasi sperimentali in corso (vedi doc.[6]) “*furono riscontrate delle perdite nel sistema di drenaggio esistente a valle del nucleo, particolarmente nel ramo destro; perdite di valore modesto, ma che sono salite ad oltre 100 l/min in corrispondenza di aumenti della quota di invaso del lago. Corrispondentemente, sono variate le quote dei piezometri in spalla destra*”. In altro documento viene citata una perdita di 190 l/min con quota di invaso 252,40 m s.m.<sup>(6)</sup>.

Tali *perdite* furono attribuite essenzialmente a filtrazioni da monte a valle dello sbarramento, soprattutto attraverso il citato banco di *alluvioni antiche* (che dall'estremità destra della diga, fino alla “*sezione costruttiva 8c*”, costituisce il terreno di fondazione del nucleo di tenuta; vedi fig. 4).

A fronte di tale quadro, nel 1981 fu deciso un intervento supplementare sulla tenuta dello schermo (attuato poi dall'impresa Rodio). L'intervento ha compreso due file di fori di iniezione verticali, perforati lungo i cigli della strada di coronamento, con interasse di 3 m, approfonditi fino ad attraversare interamente il banco di *alluvioni antiche* ed interessare anche i sottostanti terreni del substrato pliocenico. I fori furono iniettati con una miscela di cemento e bentonite.

Fu eseguita inoltre una terza fila di fori in posizione centrale rispetto alle prime due. I fori furono spinti fino ad interessare il banco di *arenarie* (sottostante al livello di *marne* che localmente costituisce il letto delle *alluvioni antiche*; vedi fig. 4). In quest'ultimo e nelle *alluvioni antiche* a tetto delle *marne* sono state eseguite iniezioni di *silicato*.

L'intervento è stato sviluppato su tutto il tratto di fondazione che corrisponde ai primi 130 m circa di coronamento del corpo diga (a partire dall'estremità destra), interessando quindi anche tutto il tratto nel quale il nucleo è fondato sull'orizzonte ghiaioso-sabbioso-limoso delle *alluvioni antiche*.

Sulla spalla il suddetto intervento è stato inoltre esteso sul versante a monte dello sbarramento, per una ottantina di metri (seguendo la sede stradale in curva già esistente sul prolungamento della strada di coronamento della diga), evidentemente (anche se non esplicitamente) in relazione a temuti flussi di

---

<sup>(6)</sup> A proposito di tali valori di portata particolarmente elevati, il Direttore dei Lavori, nel rapporto alla Commissione di collaudo del giugno 1985, segnala però che questi erano sempre marcatamente influenzati

“*aggiramento laterale*” dello sbarramento precedentemente citati. Anche in questo tratto è stato interessato dalle iniezioni principalmente il banco delle “*alluvioni antiche*”, il letto del quale è riportato in un grafico di cantiere a quote non superiori a 245 -247 m s.m.

Nell’intervento quindi il livello di *marne* plioceniche alla base delle *alluvioni antiche* non è stato seguito fino alla quota del livello di massimo invaso, ma solo fino a quota 245-247 m s.m. (non è stato cioè rispettato il corretto criterio esposto nel già citato rapporto Capozza, 1964). Nei riguardi dei *flussi di aggiramento*, quindi l’intervento non li ha sbarrati ma ha solo introdotto una maggiore perdita di carico, corrispondente a un più lungo percorso.

Dai dati relativi risulta che ben tre delle quattro prove che hanno riscontrato i valori di permeabilità maggiori (e in termini assoluti elevati)<sup>(7)</sup> erano comprese nel tratto di una quarantina di metri a partire dall’estremità destra del coronamento (e procedendo verso il centro della diga) e, riguardano le *alluvioni antiche* alla base del nucleo, tra le “*sezioni costruttive 2 e 5*” (vedi sezione geologica di fig. 4).

Agli effetti del problema che interessa in questa sede, si ricorda che le prove di permeabilità eseguite prima e durante l’intervento hanno segnalato nelle *alluvioni antiche* valori localmente elevati.

Successivamente all’intervento Rodio precedentemente citato, un rapporto della Direzione Lavori (1984) riferisce che, in condizioni di invaso ai maggiori livelli, i valori massimi delle *portate del drenaggio destro* (che raccoglie le acque della parte destra del semicorpo di valle della diga, compresi i corrispondenti apporti meteorici) sono stati rispettivamente:

1981-82:	20 l/min con invaso a 254,10 m
1982-83:	24 l/min con invaso a 253,45 m
1983-84:	74 l/min con invaso a 256,00 m.

---

dalle precipitazioni piovose. L’osservazione è documentata anche nei recenti diagrammi di registrazione in continuo dei valori delle portate, a fronte dei dati sulle precipitazioni stesse.

<sup>(7)</sup> *Prova n. 2* (quota base nucleo 252 m circa)

sul versante a monte Nelle alluvioni: 93 l/(min-m) senza pressione alla bocca; 16 l/(min-m) a 1,5 bar (oltre 100 Unità Lugeon convenzionali).

Nelle arenarie: fino a 65 l/(min-m) a 3,4 bar (quasi 200 Unità Lugeon convenzionali).

*Prova n. 6* (quota base nucleo a m 249 circa)

Nelle alluvioni: 23 l/(min-m) senza pressione a intervento parzialmente realizzato.

Nelle arenarie: 4 l/(min-m) a 3,75 bar (circa 11 Unità Lugeon convenzionali).

*Prova n. 5* (quota base nucleo a m 248,5 circa)

Nelle alluvioni: 11 l/(min-m) senza pressione; 5,3 l/(min-m) a 2,4 bar (circa 22 Unità Lugeon convenzionali).

Tali dati provengono da una registrazione continua delle misure di portata e non tengono conto dei valori giudicati “anomali”, perché marcatamente influenzati da contemporanee precipitazioni piovose particolarmente intense<sup>(8)</sup>.

Nei riguardi della filtrazione, tali valori sono stati comunque allora giudicati correttamente solo come indici di un miglioramento (rispetto al periodo precedente all'intervento) e non della eliminazione dell'inconveniente.

### **3.2 Condizioni di tenuta in spalla rilevate nell'esercizio sperimentale del serbatoio nel periodo 1994-2012**

#### *3.2.1 Generalità*

Nel periodo qui considerato, in spalla destra sono stati realizzati alcuni interventi per estendere e migliorare il monitoraggio piezometrico (vedi fig. 5), allo scopo di chiarire il comportamento di tenuta in corrispondenza di quote di invaso superiori a quella (250 m s.m.) segnalata come “critica”.

Obiettivi degli interventi sono stati: la verifica della correttezza del modello di costituzione del sottosuolo di fondazione della porzione superiore dello sbarramento e del sottosuolo a monte dello sbarramento stesso e soprattutto la situazione idrogeologica che si installa in tali settori in corrispondenza dei livelli di invaso superiori a 250 m s.m.

Quest'ultimo aspetto, in particolare, aveva anche lo scopo di chiarire se, e in quale misura, all'incremento brusco delle portate del drenaggio destro contribuisse un flusso di filtrazione *aggirante* il nucleo di tenuta della diga interessando il sottosuolo del pendio a monte di questa, ed eventualmente anche un flusso di filtrazione per sottopasso della porzione terminale del nucleo stesso.

Sugli interventi realizzati a questo scopo sono stati redatti specifici rapporti trasmessi alla Direzione Dighe. In questa sede si riassumono soltanto i risultati essenziali connessi con l'argomento specifico della presente proposta progettuale.

---

<sup>(8)</sup> A proposito dei valori “anomali” delle portate del drenaggio destro influenzati dalla piovosità, il citato rapporto del giugno 1984 espone alcune osservazioni importanti anche agli effetti degli interventi in esame nella presente proposta progettuale. Si cita in particolare la seguente osservazione che risulta in ragionevole accordo con quanto rilevato anche nel successivo periodo 1994-2012: *“Tali anomalie risultano, d'altronde, evidenti, poiché ad un fenomeno piovoso intenso fa seguito un immediato brusco innalzamento della portata del drenaggio (destra) cui fa seguito una diminuzione quasi altrettanto rapida, mentre, nel caso delle filtrazioni in fondazione, la risposta del drenaggio al variare del livello del lago avviene sempre con un ritardo di circa 3-4 settimane.”*

Nelle osservazioni del periodo suddetto in effetti *il ritardo* citato è risultato molto più breve.

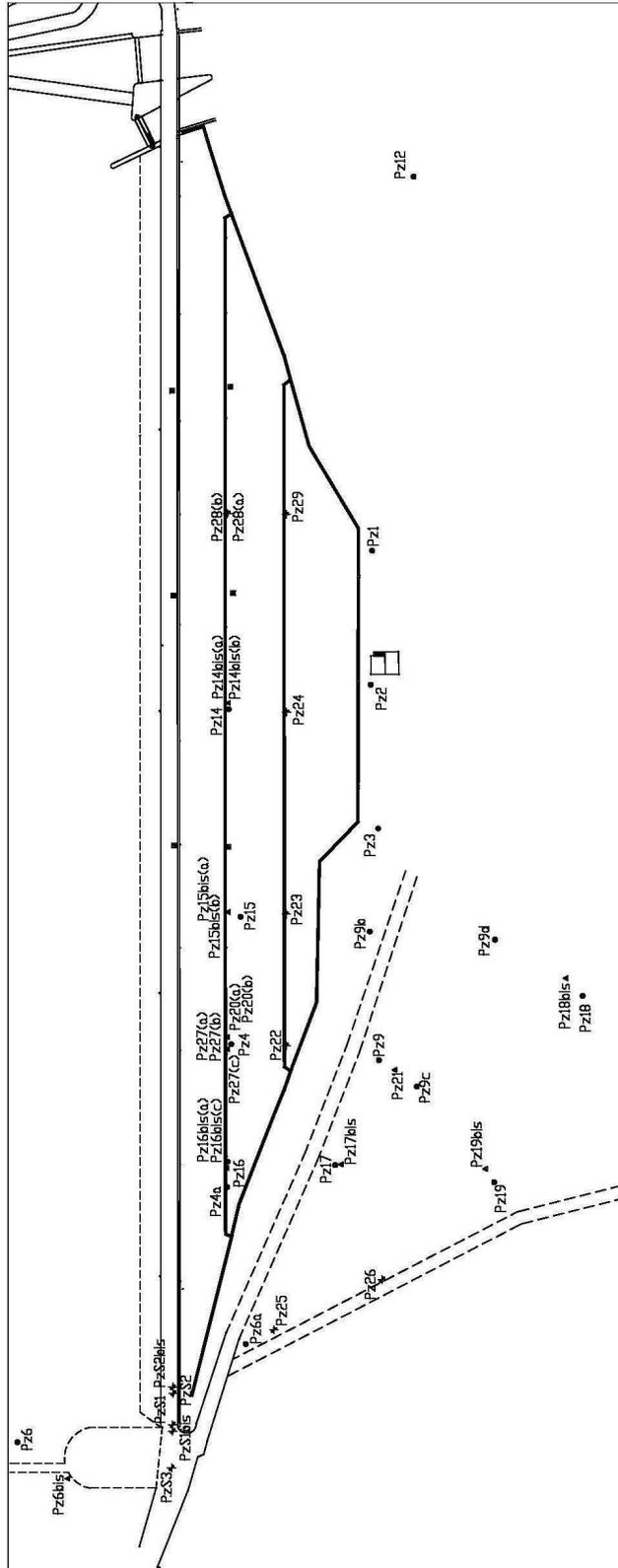


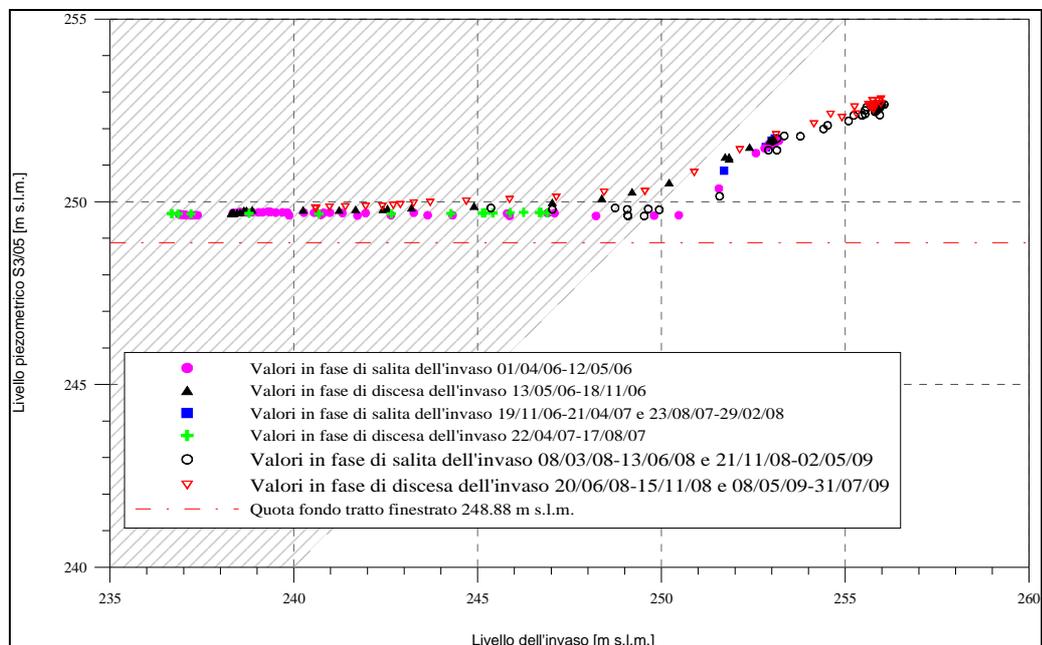
Figura 5 - Ubicazione planimetrica dei piezometri

### 3.2.2 *Comportamento dei piezometri ubicati sul pendio a monte dello sbarramento ed indizi di un “flusso di aggiramento” laterale.*

I piezometri S3/05, Pz 6 bis, Pz 6, Pz 7 (vedi fig. 5), ubicati sul pendio a monte della quota di massimo invaso (256,50 m s.m.), interessano lo stesso banco di *alluvioni antiche* sul quale è impostato il nucleo di tenuta della diga nel suo tratto terminale<sup>(9)</sup>.

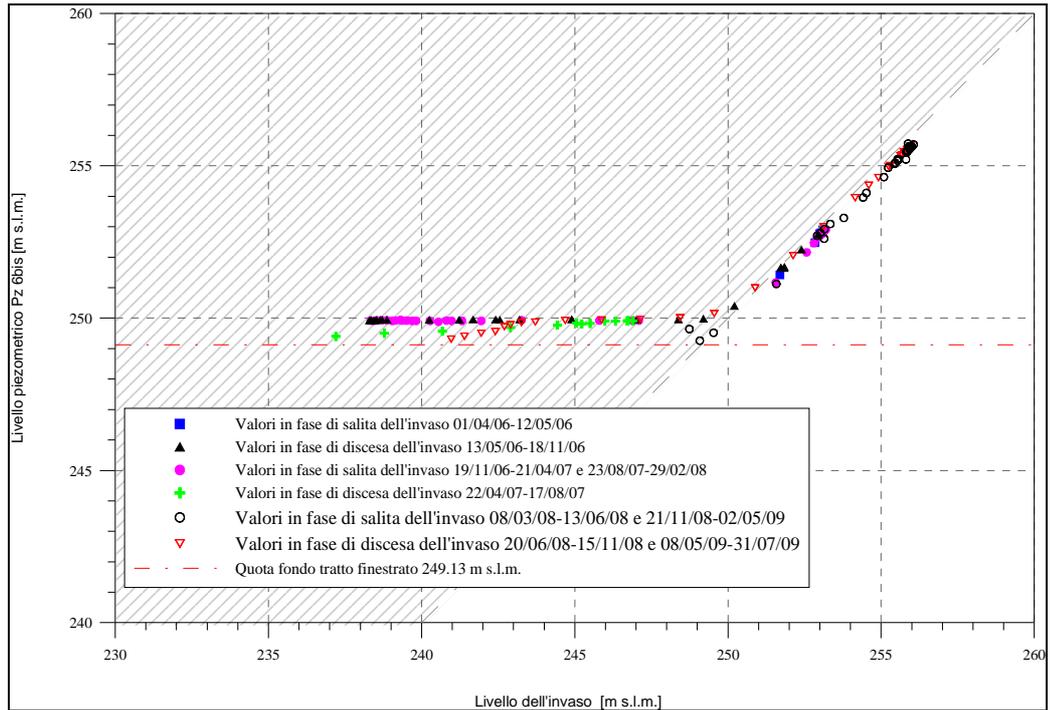
Le misure nei piezometri citati, in condizioni di invaso basso (anche molto inferiore a 250 m s.m.) si mantengono generalmente intorno a quota 250 m s.m., o poco inferiore. Quando la quota dell’invaso raggiunge e poi supera il valore “critico” suddetto, i livelli di questi piezometri la seguono, spesso con pari valori. Il medesimo comportamento si verifica all’inverso anche nella fase discendente del livello del serbatoio (vedi figg. 6 ÷ 9). Quando il livello dell’invaso scende, anche il livello della falda nel sottosuolo lo segue, fino a portarsi circa alla quota critica suddetta o ancora inferiore.

Quando la quota dell’invaso raggiunge e supera la quota “critica” suddetta, le acque del serbatoio invadono quindi il sottosuolo permeabile a monte dello sbarramento. I terreni costituenti questo sottosuolo si estendono anche alla parte del pendio a valle dello sbarramento. La falda alimentata dall’invaso può quindi a sua volta alimentare le falde dei terreni del suddetto pendio, determinando l’innalzamento dei livelli dei piezometri ivi installati (vedi par. 3.2.3) e parallelamente l’aumento degli apporti al *drenaggio destro* alla base del semicorpo della diga (vedi par. seguente 3.2.4)<sup>(10)</sup>.

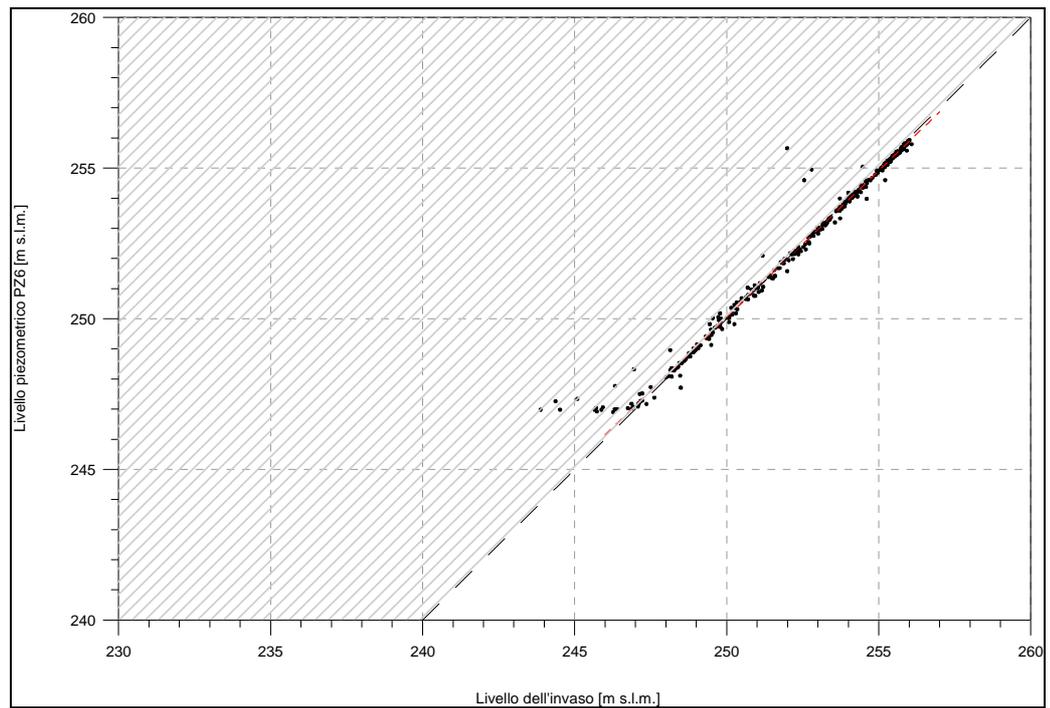


**Figura 6 - Livello del piezometro PzS3/05 rispetto al livello dell' invaso**

<sup>(9)</sup> La base della sezione di estremità destra del nucleo (“sezione costruttiva 1”) è alla quota 254,41 m.

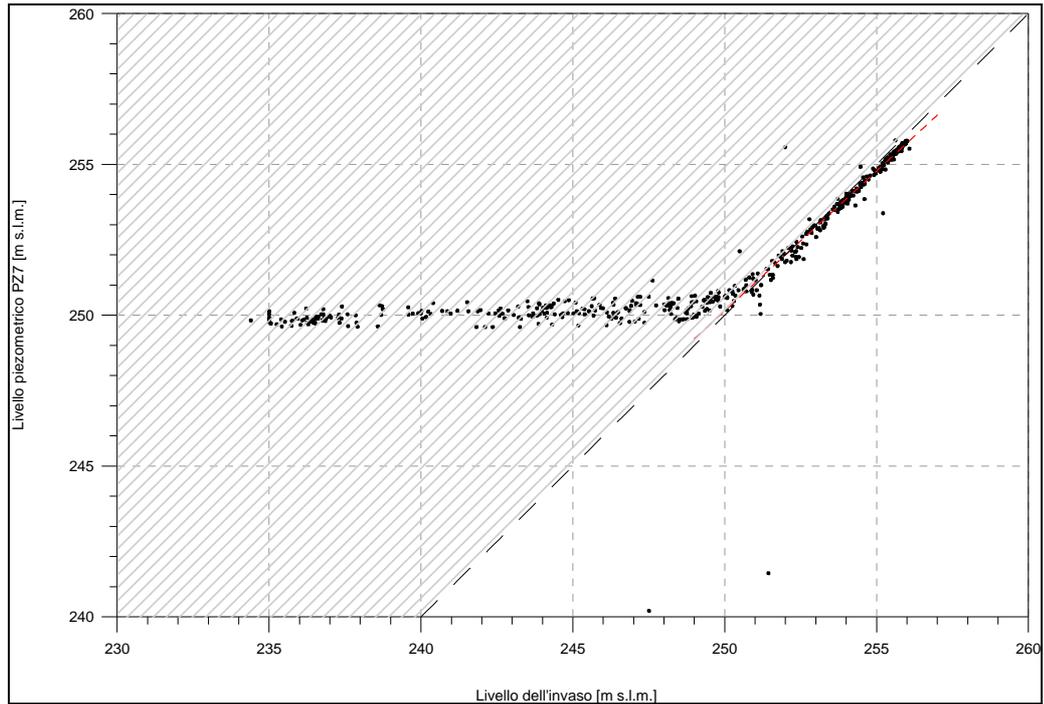


**Figura 7 - Livello del piezometro Pz6bis rispetto al livello dell' invaso**



**Figura 8 - Livello nel piezometro PZ6 in funzione del livello dell'invaso**

(10) A questo flusso dovrebbe opporsi il tratto di schermo di tenuta a monte dello sbarramento realizzato nell'intervento Rodio 1981 (citato nel precedente paragrafo 3.1); ma di fatto forse riesce tutt'al più solo ad attenuarlo, come risulta dalle constatazioni seguenti.



**Figura 9 - Livello nel piezometro PZ7 in funzione del livello dell'invaso**

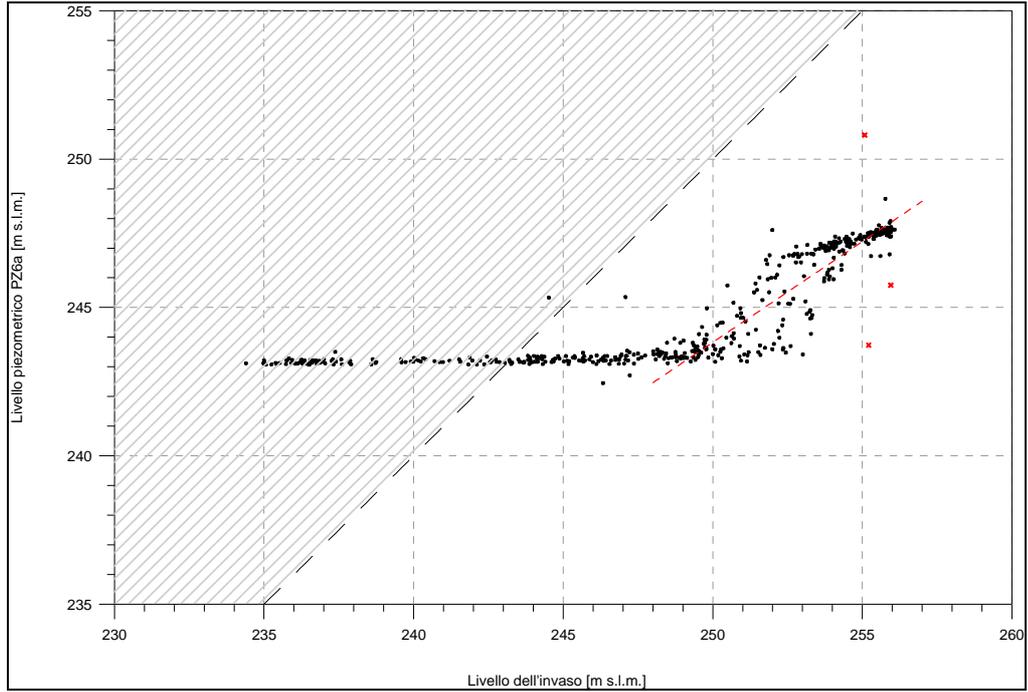
### ***3.2.3 Comportamento dei piezometri ubicati sul pendio a valle della diga***

Il comportamento dei *piezometri* della sponda destra del Tavo a valle del corpo diga (vedi figg. 10÷13) presenta generalmente riscontri evidenti di una correlazione tra livello piezometrico locale misurato e quota dell'invaso quando quest'ultima raggiunge il campo di valori critico precedentemente definito.

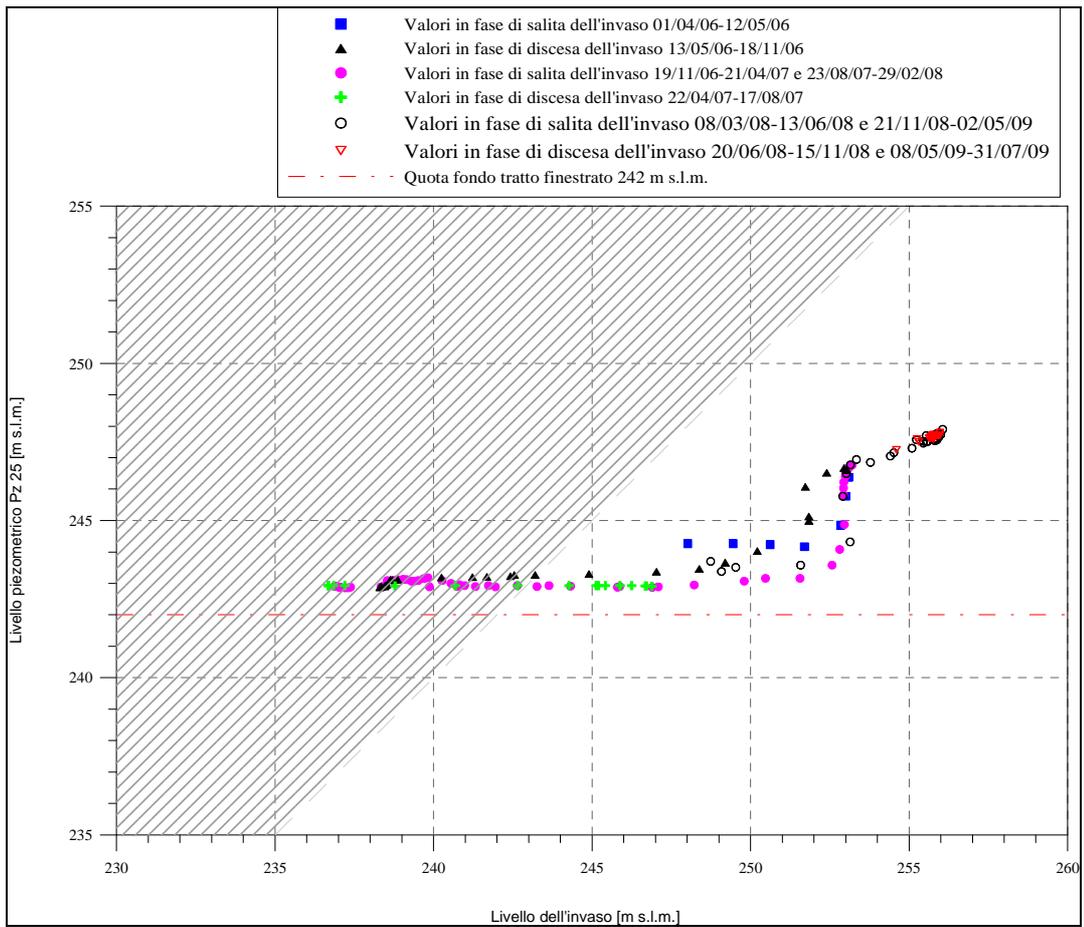
Nella fase crescente del livello del serbatoio, queste misure indicano un più o meno brusco innalzamento dei livelli di falda (rispetto ai valori normali) in corrispondenza del raggiungimento dell'intervallo di quote d'invaso indicato come "*critico*" ed un lento ritorno ai valori normali in concomitanza con il ritorno a livelli di invaso inferiori al valore critico (vedi ad es. figg. 10 e 11 relative ai piezometri Pz 6a e Pz 25).<sup>(11)</sup>

Le forme effettive con cui tale correlazione si presenta sono nel dettaglio piuttosto varie. Intervengono certamente circostanze particolari di ciascuna situazione di sottosuolo monitorata: presenza di falde idriche naturali, quota indagata alla singola postazione, distanza dallo sbarramento, prossimità a drenaggi, ecc. (vedi ad es. il comportamento dei piezometri 16 a e 16 bis ubicati nell'area del semicorpo della diga).

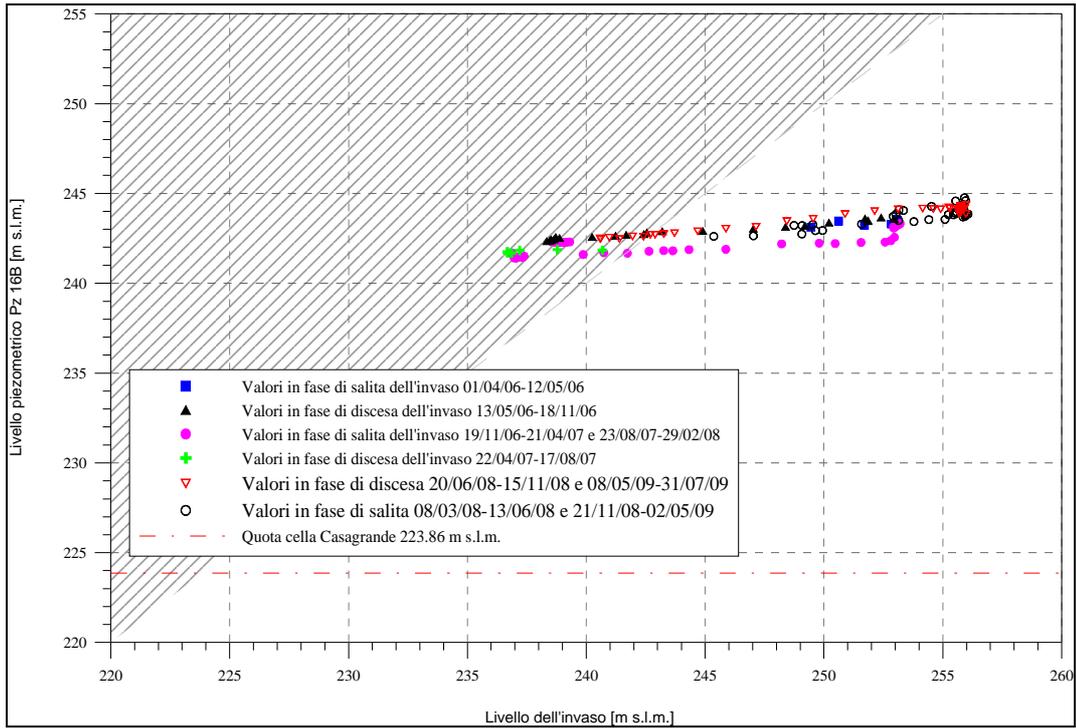
<sup>(11)</sup> Comportamento simile hanno anche le piccole emergenze idriche al bordo di valle destro del semicorpo della diga in sponda destra.



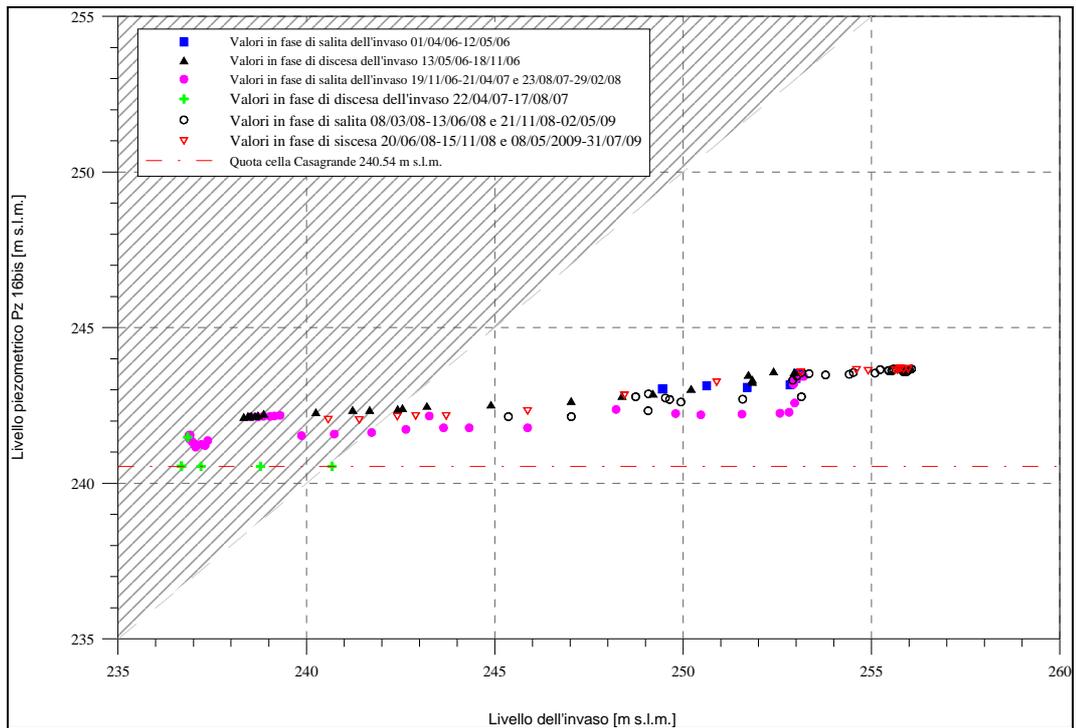
**Figura 10 - Livello nel piezometro PZ6a in funzione del livello dell'invaso**



**Figura 11 - Livello nel piezometro PZ25 in funzione del livello dell'invaso**



**Figura 12 - Livello del piezometro Pz16b rispetto al livello dell' invaso**



**Figura 13 - Livello del piezometro Pz16bis rispetto al livello dell' invaso**

### *3.2.4 Le portate del drenaggio destro*

Nelle documentazioni che riportano i dati idrogeologici essenziali forniti dalla strumentazione di monitoraggio, le portate dei *drenaggi* sono esposte in dettaglio. Caratteristica costante è il forte aumento delle portate del *drenaggio destro* (e, in minor misura, anche quelle del *drenaggio centrale*) quando le quote di invaso hanno raggiunto e superato una quota prossima a 250 m s.m., valore già rilevato come *critico* nel periodo precedente il 1994.

Nel periodo 1994-2012, i valori delle portate si sono mantenuti nell'ordine di 10-20 l/min., per quote di invaso inferiori a 250 m s.m. e si sono portati intorno a 50 l/min per quote di invaso superiori. Punte singolari di valori molto alti (nel 1994 fino a 125 l/min) risultano evidentemente correlate con episodi di precipitazioni piovose particolarmente intense, come già segnalato (vedi nota nel par. 3.2.1 e fig. 14).

I risultati delle misure di *portata* come delle misure *piezometriche*, relativi all'esercizio del serbatoio dal 1994 al 2012 (fino alla quota massima assentita dal RID, peraltro molto prossima a quella massima di progetto), segnalano come "*critico*" l'intervallo delle quote di invaso già citato nelle osservazioni precedenti.

CONSORZIO DI BONIFICA CENTRO - DIGA DI PENNE SUL FIUME TAVO

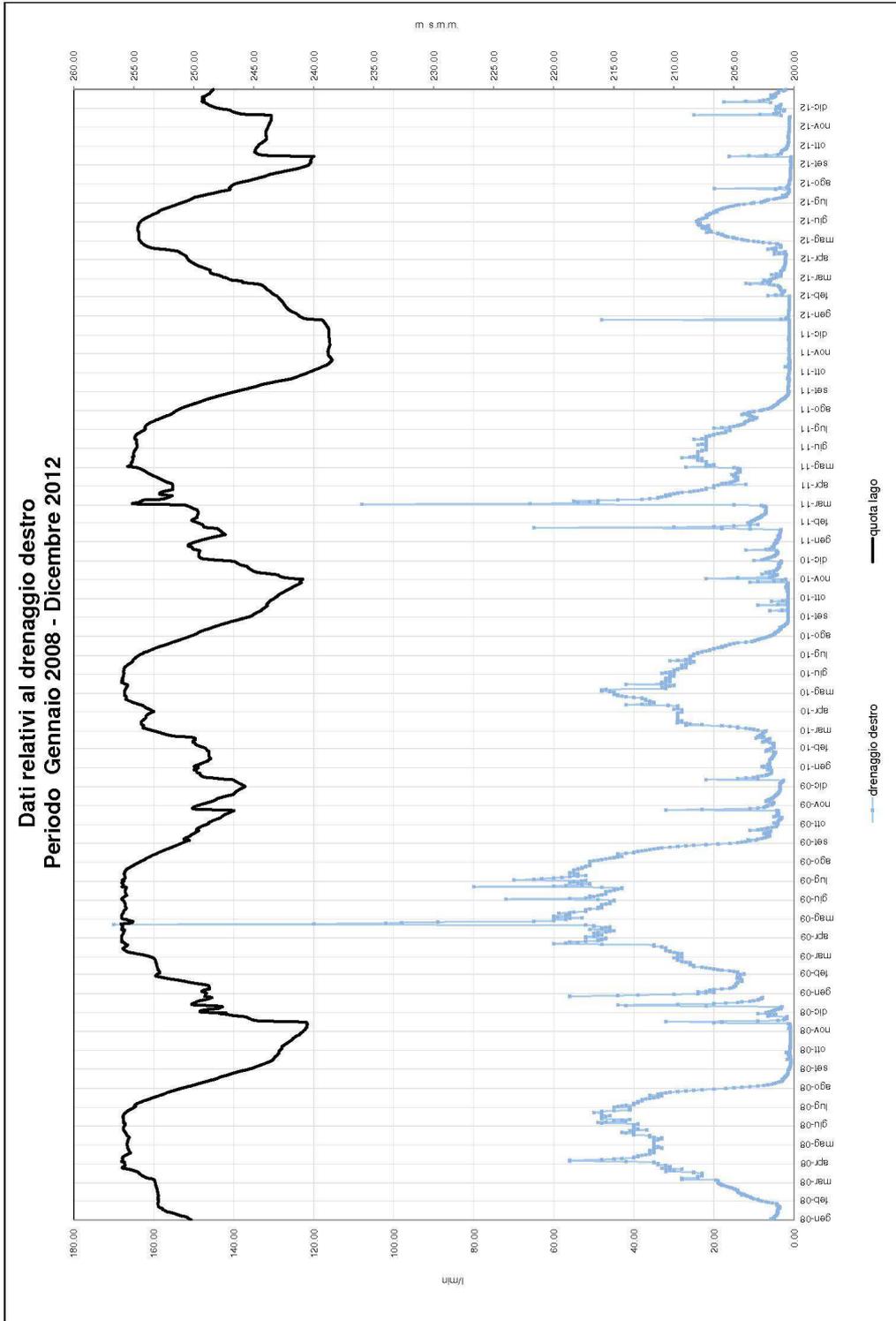


Figura 14 – Portate del drenaggio destro

### 3.2.5 *Modello schematico del flusso di filtrazione in spalla destra*

I riscontri del monitoraggio citati concordano quindi nel segnalare l'instaurazione di un *flusso di aggiramento* dal serbatoio al pendio a valle della diga quando il livello di invaso supera la quota critica.

Come già accennato in precedenza, l'eventualità di un tale flusso era stata già considerata a suo tempo, quando il citato intervento supplementare sullo schermo di tenuta sviluppato nel 1981 fu prolungato sul pendio a monte dello sbarramento. Evidentemente il prolungamento realizzato può aver ridotto l'inconveniente<sup>(12)</sup>, ma non lo ha eliminato.

Il criterio da seguire per lo sbarramento degli eventuali *flussi di aggiramento* nel sottosuolo della spalla a monte dell'invaso era stato indicato in sede di progetto (vedi relazione F. Capozza, 1964) e prescriveva di prolungare lo schermo fino dove il contatto tra alluvioni antiche e marne plioceniche avesse raggiunto la quota corrispondente al massimo livello di invaso. Tale condizione non poté essere nel caso rispettata. L'allineamento dello schermo suddetto si sviluppò infatti nell'area del già citato terrazzo di erosione dell'antica sponda del torrente Gallero, dove il contatto *alluvioni antiche/marne* rimase sub-orizzontale a quote prossime a 245 - 247 m s.m. per tutti gli ottantacinque metri di sviluppo.

In effetti la conformazione della sponda in oggetto alla quota interessata corrisponde (come già detto nel par. 2.3.2) ad un ampio terrazzo di erosione a quote comprese tra 260 e 265 m s.m.. Nell'area del terrazzo affiorano le *alluvioni antiche*, il cui letto è intorno a quota 245 m s.m.. Queste confinano con l'invaso e sono sede di una falda idrica che per quote di invaso sopra 245 m s.m. si porta a livello di quest'ultimo.

Il prolungamento a monte dello schermo Rodio '81 resta perciò praticamente inefficace agli effetti dello sbarramento del *flusso di aggiramento*.

### 3.3 **Eventualità di una filtrazione per "sottopasso" del nucleo di tenuta**

Nell'ambito delle quote di invaso superiori a quella critica, flussi di filtrazione "monte-valle" potrebbero svilupparsi - contemporaneamente al flusso di *aggiramento* considerato nei paragrafi precedenti - anche per *sottopasso* del nucleo di tenuta, la base del quale, sul tratto di una trentina di metri tra le "sezioni costruttive 1 e 4", è a quote superiori alla *soglia critica* 250 m s.m.

---

(12) Come già indicato nel par. 3.1 del presente rapporto, allora non fu rispettato il criterio indicato nella nota Capozza 1964, sviluppando in particolare lo schermo allora realizzato quasi secondo la direzione del banco di marne, per cui nell'intervento questo fu incontrato per l'intero sviluppo quasi alla stessa quota, prossima a 245 m s.m, ben lontana dalla quota di massimo invaso indicata dal criterio suddetto. Probabilmente la scarsa efficacia dell'intervento è almeno in parte imputabile anche alla difficoltà di ottenere una permanente riduzione di permeabilità con iniezioni cemento-bentonite nelle *alluvioni antiche*, localmente in

In questo tratto, tra la quota di “soglia critica” suddetta e la base del nucleo all’estremità destra della diga (quota 254,41 m s.m.) la tenuta è affidata, solo allo schermo di iniezioni eseguito nella fase costruttiva della diga e ripreso successivamente nell’intervento Rodio nel 1981.

In sintesi, al di sopra della quota di vaso critica, valutata convenzionalmente a 250 m s.m., le acque del serbatoio invadono le *alluvioni antiche* permeabili nel sottosuolo del pendio a monte dello sbarramento (esteso alle alluvioni depositate sull’intero paleo-terrazzo di erosione della sponda del T. Gallero), o generando (o solo impinguando) una falda che si estende anche verso il sottosuolo della sponda del Tavo a valle della diga aggirando l’estremità destra di quest’ultima.

Nel sottosuolo a monte della diga, il flusso suddetto probabilmente è contrastato ma non confinato dallo schermo di iniezioni realizzato a suo tempo da Rodio nel 1981 sul prolungamento verso monte dello schermo in asse diga.

Non vi sono al momento prove evidenti anche di un flusso consistente che attraversi la porzione di schermo di tenuta nel sottosuolo del corpo della diga, in particolare tra le *sezioni costruttive 1 e 4*<sup>(13)</sup>.

---

prevalenza sabbiose o sabbioso- limose, comunque difficilmente trattabili con tali iniezioni, specialmente a piccola profondità e quindi solo con pressioni modeste.

(13) E’ da osservare però, a questo proposito, che il sottosuolo alla base del nucleo di tenuta ha avuto certamente, negli interventi attuati in passato, un trattamento di impermeabilizzazione più intenso di quello eseguito nel citato prolungamento dell’intervento “RODIO 1981” nel pendio a monte dello sbarramento.

#### 4 CONSIDERAZIONI RELATIVE AI RISULTATI DELLE INDAGINI DEL 2016

Dal momento che l'andamento medio della superficie di contatto *substrato pliocenico - alluvioni antiche* nel sottosuolo dell'area interessata a monte dello sbarramento era conosciuto nelle grandi linee, nel 2016 sono state eseguite, a cura del Committente, indagini preliminari (geofisiche e con sondaggi) per costruire una mappa sufficientemente approssimata delle quote della superficie di tetto del *substrato mio-pliocenico* nel sottosuolo dell'area entro la quale si prevede sia sviluppato il tracciato del diaframma.

Si espongono di seguito le considerazioni preliminari circa l'esito delle indagini svolte.

##### 4.1 Indagini geofisiche

Sono state eseguite dall'Università la Sapienza di Roma, a cura del responsabile scientifico Prof. Ettore Caldarelli. Per maggiori dettagli si rimanda all'elaborato *Indagini geofisiche sulla diga di Penne (PE) – Relazione finale* (cod. *PESD00RL0004*).

Sono state realizzate prospezioni geofisiche "integrate" (Sismica a rifrazione 2D – indagine geoelettrica 2D – Indagini Down-Hole) per la ricostruzione dell'andamento del contatto coltre di *alluvioni antiche/substrato* nel sottosuolo dell'area interessata dall'intervento. I caratteri fisici rispettivamente della coltre e del substrato hanno consentito di prevedere una buona differenziazione dei due terreni negli aspetti geofisici. Tali indagini (controllate dai sondaggi di cui al seguente par. 4.2), hanno consentito di confermare la posizione planimetrica del tracciato del diaframma ed i caratteri definitivi di lunghezza e di profondità di questo.

##### Indagini geoelettriche

Il modello del sottosuolo ricostruito tramite le indagini geoelettriche mostra la presenza di tre strati relativi ai litotipi presenti nella zona in esame. In particolare, i due allineamenti circa paralleli all'asse del diaframma (L1 e L2 – vedi elaborato grafico *Planimetria ubicazione indagini e profili geologici* - cod. *PESD00PL0006*) mostrano la seguente successione stratigrafica:

- al di sopra della quota 250 m s.l.m. sono presenti delle zone a bassa resistività legate alla presenza dello strato limo argilloso-sabbioso;
- il tetto dello strato ad alta resistività, associabile alla presenza dello strato di ghiaia e sabbia, è ad una quota circa costante di circa 250 m s.l.m., con potenza dello strato compresa tra 8.00 m e 10.00 m. Tale strato si assottiglia nella parte terminale degli allineamenti;
- in profondità (quote inferiori a 240 m s.l.m.) è presente lo strato conduttivo riconducibile al substrato marnoso.

L'allineamento L3, circa trasversale all'asse del diaframma, investiga le zone immediatamente a contatto con il corpo diga e conferma i risultati ottenuti dai precedenti allineamenti (quota del tetto e spessore dello strato ghiaioso e profondità dello strato flysch-marnoso).

#### Indagini sismica a rifrazione

Gli allineamenti L1 e L2 mostrano la presenza dei seguenti tre strati a differenti velocità:

- coltre superficiale (a bassa velocità) con spessore pari a circa 2.00-3.00 m;
- strato di limi argillosi avente bassa resistività (velocità comprese tra 500-1000 m/s) e che raggiunge una profondità di circa 13.00 m;
- strato di ghiaia e sabbia ad alta resistività (velocità > 1500 m/s) a profondità comprese tra 6.00 m e 18.00 m dal p.c., che mostra una tendenza ad assottigliarsi a quote elevate.

Con tale tecnica non è stato possibile investigare lo strato flysch-marnoso.

#### Indagini Down-Hole

In linea generale, le prove Down-Hole hanno mostrato una buona corrispondenza tra i litotipi rinvenuti nel corso dell'esecuzione dei fori di sondaggio (vedi par. 4.2 seguente) e le variazioni di velocità di propagazione delle onde longitudinali (onde P) e di taglio (onde S): le marne di base hanno evidenziato valori dell'ordine dei 2330-2660 m/s per le onde P e dei 500-600 m/s per le onde S. Lo strato ghiaioso-sabbioso compatto, rinvenuto nel corso dell'esecuzione dei sondaggi SG1 e SG2, al tetto delle marne e caratterizzato da buone proprietà elastiche, risulta presente con spessore esiguo nel sondaggio SG3.

### **4.2 Indagini con sondaggi**

Sono state eseguite dalla società GEO – geotecnica e geognostica s.r.l. a cura della dott.ssa Maria Manuel. Per maggiori dettagli si rimanda al *Report preliminare sulle indagini geognostiche finalizzate all'intervento sulle condizioni di tenuta in spalla destra* (cod. PESD00RL0005).

Sono stati realizzati tre sondaggi a carotaggio continuo, con profondità 30 m, a controllo/corredo della suddetta ricostruzione su base geofisica, nel corso dei quali sono stati prelevati campioni indisturbati dei terreni attraversati ed eseguite prove di permeabilità e prove SPT.

I risultati dei sondaggi hanno consentito, come s'è detto, il controllo dei risultati della ricostruzione geofisica del sottosuolo e di effettuare la scelta definitiva del tracciato del diaframma di progetto. I litotipi identificati lungo i tre fori di sondaggio sono i seguenti:

- formazione alluvionale limo-argillosa a tratti sabbiosa a medio-bassa permeabilità, ritrovata fino ad una profondità compresa tra 250.00 m s.l.m e 253 m s.l.m.;

- formazione alluvionale ghiaioso-sabbiosa rinvenuta a profondità variabili e comprese tra 253.00 m s.l.m. e 246.00 m s.l.m., caratterizzata da un grado di cementazione variabile. Lo spessore di tale formazione si riduce procedendo in direzione delle quote crescenti della scarpata, come mostrato dalla stratigrafia del sondaggio SG3 in cui raggiunge un valore di circa 0.50 m;
- formazione marnosa di base a bassa permeabilità, ritrovata a profondità inferiori e comprese tra 246 m s.l.m. e 243 m s.l.m.. Le marne sono caratterizzate da un grado di fratturazione variabile, a tratti intenso, e dalla presenza di interstrati sabbiosi.

I campioni indisturbati sono stati prelevati in corrispondenza della formazione alluvionale limo-argillosa, ad esclusione di due campioni prelevati nel sondaggio SG1 nella formazione marnosa di base. Essi sono stati trasmessi al laboratorio per le seguenti determinazioni:

- a) le principali caratteristiche fisiche (analisi granulometriche, limite liquido e limite plastico, indice di plastico e indice di consistenza);
- b) i parametri di stato in sito;
- c) i parametri di resistenza al taglio ottenuti dalle prove di taglio alla scatola di Casagrande ed in cella triassiale, tutte eseguite in modalità consolidata-drenata ed i valori di resistenza a compressione uni assiale ottenuti mediante prove di compressione ad espansione laterale libera sui campioni di argille marnose/marne;
- d) il coefficiente di permeabilità misurato con prova di permeabilità in cella triassiale solo sul campione di argille marnose/marne che ha mostrato un valore pari a  $1,56 \times 10^{-8}$  cm/s.

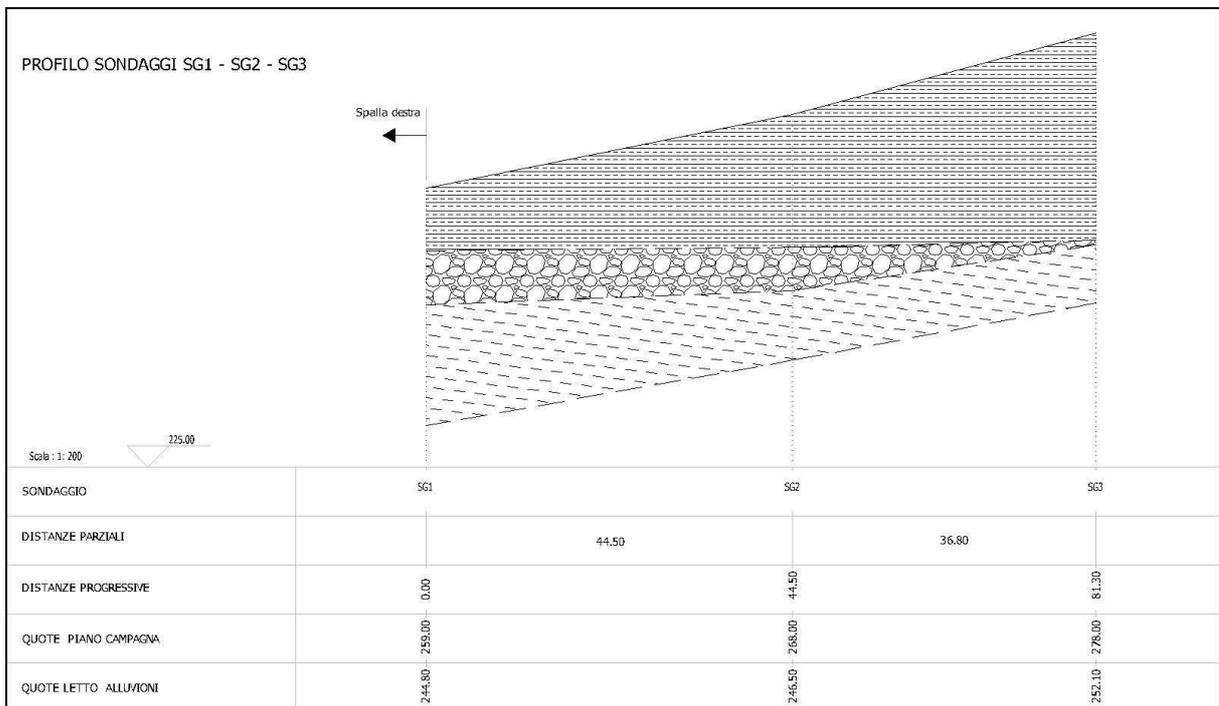
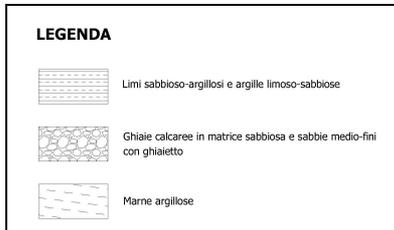
In appendice è riportata la valutazione dei parametri geotecnici dei terreni relativi alle unità litostratigrafiche interessate dall'esecuzione del diaframma plastico e dagli scavi di sbancamento, necessari per realizzare l'area di lavoro propedeutica all'esecuzione del diaframma stesso.

#### **4.3 Considerazioni conclusive**

Dall'esame dei risultati emersi dalle indagini superficiali ed in foro e della loro interpretazione integrata, si può affermare in buona sostanza che il sottosuolo della spalla destra della Diga di Penne risulta essere stratificato nelle tre formazioni principali, in accordo con il quadro formulato in sede di progettazione esecutiva del 2014.

Procedendo verso monte, il pacco di *alluvioni antiche* ghiaioso-sabbioso-limose, dopo il tratto iniziale che mantiene un andamento sub-orizzontale a partire dalla spalla destra, risale gradatamente e si assottiglia a quote elevate fino quasi ad esaurirsi in corrispondenza del sondaggio SG3.

Dalle indagini eseguite è emerso che il contatto *alluvioni antiche/marne* ha un andamento sub-orizzontale nel tratto compreso tra il sondaggio SG1 e SG2 (con quota mediamente prossima a 245.00 m s.m.), per poi risalire gradatamente fino a quota pari circa a 252.00 m s.m., procedendo in direzione monte (vedi profilo geologico di fig. 15).



**Figura 15 – Profilo geologico sondaggi SG1 – SG2 – SG3**

## **5 CONSIDERAZIONI RELATIVE AI DATI ESPOSTI E CONSEGUENTE PROPOSTA PROGETTUALE**

### **5.1 Considerazioni preliminari**

Il complesso dei dati di conoscenza attuali ha portato a riconoscere che il brusco incremento delle falde idriche del sottosuolo a valle della diga in sponda destra e delle portate del drenaggio destro, che si verifica in corrispondenza del raggiungimento di quote di vaso superiori a circa 250 m s.m., è riferibile, se non interamente almeno in gran parte, a un flusso che aggira sul fianco destro lo sbarramento, sviluppandosi nei terreni permeabili del sottosuolo a monte di questo per poi attraversare (e/o aggirare) lo “schermo Rodio 1981”, andando a diffondersi nel sottosuolo della sponda destra a valle della diga.

L'eventuale contributo anche di una filtrazione “*sottopassante*” il nucleo di tenuta nel suo tratto terminale destro allo stato attuale non può essere escluso, ma seppure esistente, sarebbe verosimilmente minoritario. Premesso che un'esigenza di interessare anche il corpo della diga esistente con interventi di impermeabilizzazione alla base del nucleo si porrebbe solo in presenza di un flusso di filtrazione importante e con rischio di ulteriore aggravamento, è apparso opportuno indirizzare intanto gli interventi sull'accertato *flusso di aggiramento*.

### **5.2 L'intervento proposto in progetto**

Come esposto nella *Relazione tecnica* – codice elaborato *PESD00RL001* per superare le inevitabili incertezze connesse a schermi di iniezioni in terreni già verificati difficili da trattare con tali sistemi (vedi per es. quello “Rodio 1981” già citato), si prevede che lo sbarramento nel sottosuolo sia realizzato mediante un “*diaframma*” realizzato con “pali secanti” mediante la tipologia costruttiva con perforazione ad “elica continua tubata” nell'impiego della metodologia CSP (Cased Secant Piles).

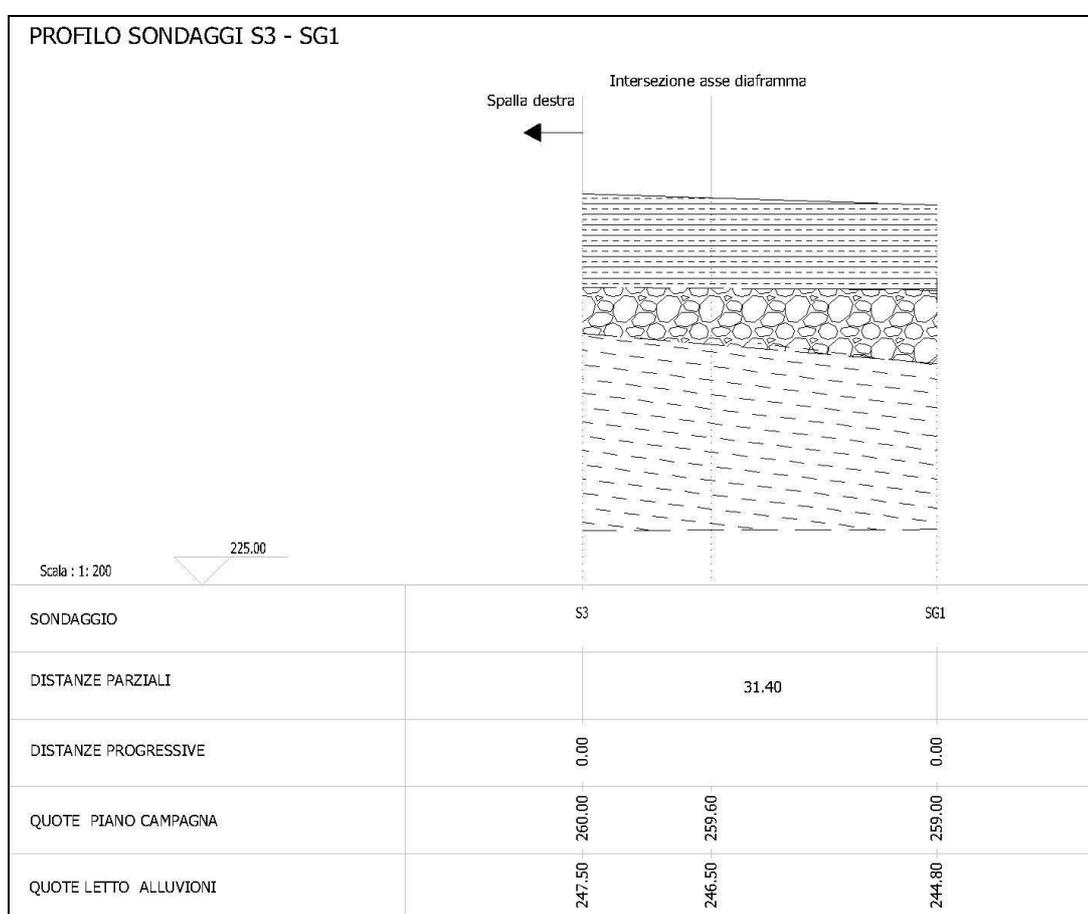
Questa tecnica consente di eseguire il diaframma solo in una porzione prescelta del sottosuolo utile per lo sbarramento idraulico richiesto.

Nei documenti progettuali presentati in questa sede si è prevista pertanto la realizzazione di un diaframma sviluppato sul proseguimento verso monte del nucleo di tenuta della diga.

Il diaframma interesserà nel sottosuolo l'intero spessore delle *alluvioni antiche* al di sotto di quota 257,50 m s.l.m. sede del flusso da sbarrare, intestandosi all'estremità inferiore entro i terreni del *substrato pliocenico*, con riferimento particolare ai livelli di marne incontrati nel sottosuolo della diga.

La quota di approfondimento del diaframma è stata stimata dai profili geologici delle seguenti figura da 16 a 19, sviluppati integrando i risultati delle campagne di indagini del 2006 con quelle del 2016 estrapolando la quota del contatto *alluvioni antiche/marne* nei punti di intersezione con l'asse del diaframma.

Nella porzione di sottosuolo in corrispondenza dell'estremità destra della diga (indagata dai sondaggi eseguiti nella campagna di indagini del 2006) il banco di *marne* è stato incontrato al letto delle *alluvioni antiche* a partire da quota 247.50 m s.m. circa (si veda sondaggio S3), mentre in corrispondenza dell'intersezione del profilo geologico S3 – SG1 con il tracciato del diaframma si trova a quota 247.00 m s.m. circa (vedi profili di fig. 16 e di fig. 17).

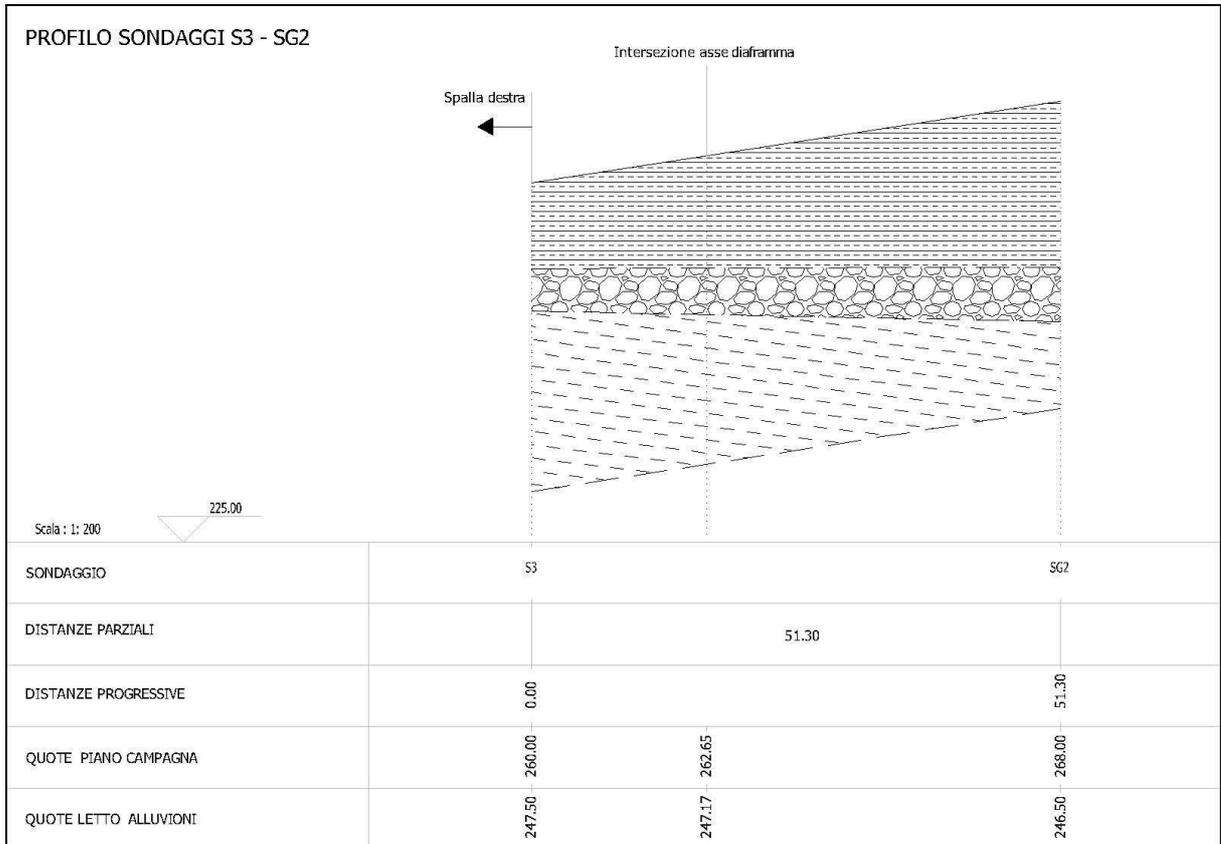


**Figura 16 – Profilo geologico sondaggi S3 – SG1**

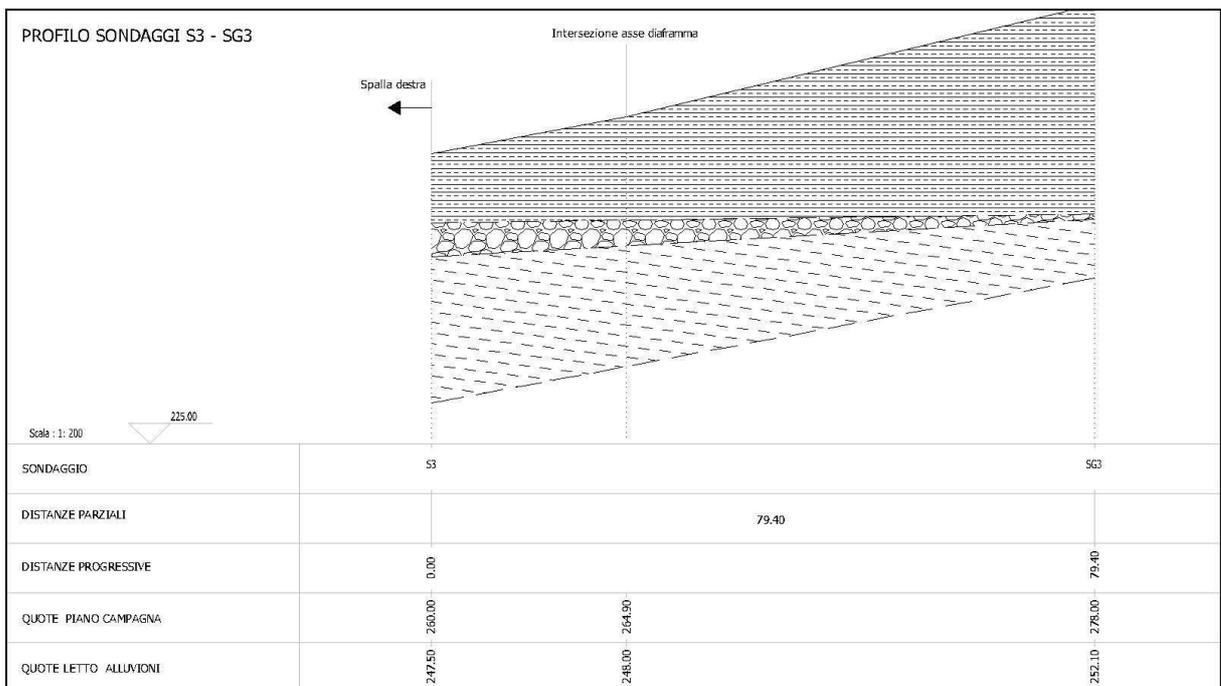
La profondità dei pali qui stimata è compresa tra 16 m (in corrispondenza della spalla destra) per poi ridursi gradatamente fino alla profondità minima di 10 m nella porzione più a monte.

Come detto in precedenza, procedendo verso monte lo strato di *alluvioni antiche* ghiaioso-sabbioso-limose risale gradatamente fino a quasi esaurirsi in prossimità del sondaggio S3: in corrispondenza dell'intersezione tra il profilo S3 – SG3 e l'asse del tracciato di progetto (vedi fig. 18) il contatto con

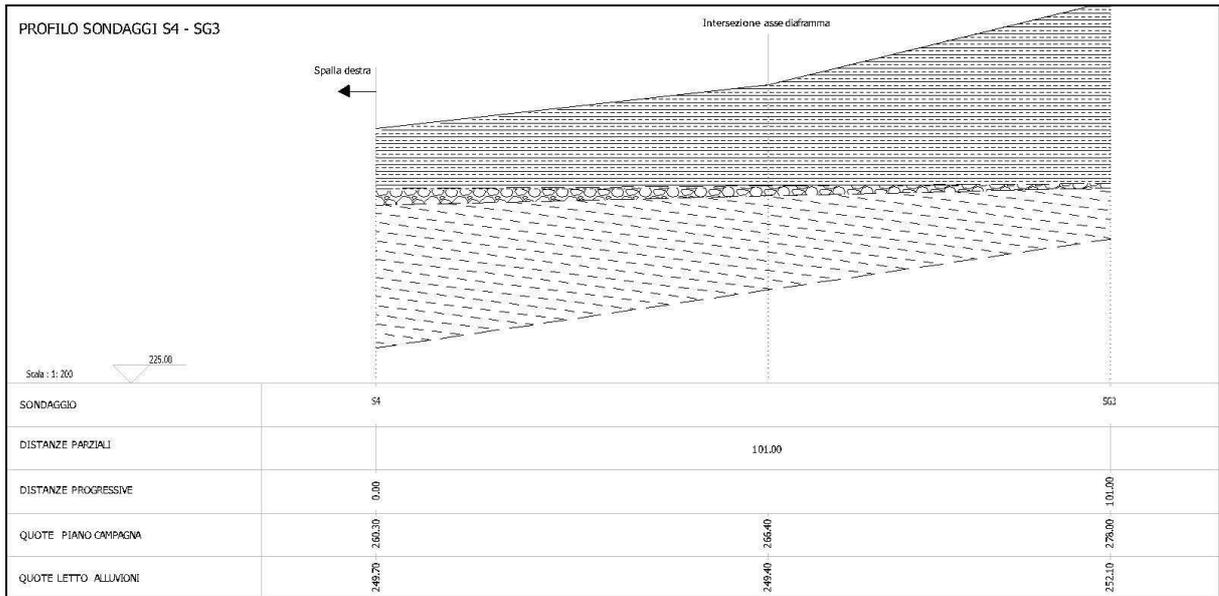
le marne è a quota 248.00 m s.m. circa, mentre in corrispondenza del profilo S4 – SG3 si rinviene a quota 249.50 m s.m. circa (vedi fig. 19).



**Figura 17 – Profilo geologico sondaggi S3 – SG2**



**Figura 18 – Profilo geologico sondaggi S3 – SG3**



**Figura 19 – Profilo geologico sondaggi S4 – SG3**

In merito all'estensione planimetrica, le ipotesi progettuali del 2014 supponevano che nella porzione di sottosuolo interessata dall'intervento il tetto del substrato pliocenico da sub-pianeggiante, in corrispondenza della base del terrazzo di erosione, passasse a molto inclinato in corrispondenza della falesia a monte del terrazzo stesso. Quindi era da attendersi che, localmente, nel sottosuolo, il contatto delle *alluvioni antiche* con i terreni del *substrato pliocenico* procedendo verso monte passasse da sub-orizzontale (come risultato in corrispondenza del tracciato dell'intervento Rodio) a molto inclinato con immersione circa verso Nord.

Il diaframma era indirizzato dall'estremità della diga verso il citato affioramento del substrato a quota 270.00 m s.m. circa, procedendo verso monte fino a dove, nel sottosuolo, il contatto tra substrato e alluvioni antiche si era ipotizzato raggiungesse la quota di massimo invaso del serbatoio (257.50 m s.m.).

L'estensione ipotizzata era all'incirca di 70 m.

Nel modello geologico locale ricostruito a seguito della campagna di indagini del 2016, procedendo verso monte, il contatto delle *alluvioni antiche* con i terreni del *substrato pliocenico* si conferma essere sub-orizzontale mentre lo spessore del pacco di *alluvioni antiche* ghiaioso-sabbioso-limose (particolarmente permeabili) tende ad esaurirsi con l'aumentare delle quote del piano campagna (quota 268.00 circa m s.l.m.).

Nel progetto del 2014 era stato inoltre ipotizzato che il tetto dei *terreni pliocenici*, che comprendono il banco di *marne*, procedendo verso monte, risalisse fino ad affiorare a quote prossime a 268-270 m s. m (vedi planimetria geologica di fig. 1).

In definitiva, l'estensione planimetrica dell'intervento è stata sviluppata partendo dall'estremità destra della diga, verso il citato affioramento del substrato, con un'estensione tale da raggiungere la zona in cui, in base alle risultanze delle indagini del 2016, lo strato di *alluvioni antiche* ghiaioso-sabbioso-limose si assottiglia (circa quota 268 m s.l.m.) e cautelativamente prolungato fino a quota prossima 272.00 m s.l.m. (vedi *Profilo longitudinale dell'intervento* - codice elaborato *PESD00PR002*). L'estensione dell'intervento così stimata è di circa 84.00 metri.

## 6 DOCUMENTAZIONE DI RIFERIMENTO

- [1] Prof. Ing. Felice Ippolito (febbraio 1955). *Relazione geologica sullo sbarramento del F. Tavo*
- [2] Prof. Ing. Felice Ippolito e Dott. Ing. F. Capozza (aprile 1962). *Relazione geologica sullo sbarramento di Penne sul F. Tavo*
- [3] Dott. Ing. F. Capozza (marzo 1964). *Diga di Penne sul F. Tavo. Indagini geognostiche supplementari*
- [4] Consorzio della Bonifica Vestina-Pescara. Progetto “As Built”. *Opere irrigue nella valle del Tavo-Saline. Lavori di costruzione della DIGA DI PENNE. Allegati vari*
- [5] Ditta RODIO (marzo 1983). *Lavori di somma urgenza di cui alla perizia del 31.07.79. Prog. A.C. 5209/12 – Costruzione dello schermo integrativo di impermeabilizzazione in destra della diga di Penne sul F. Tavo*
- [6] C. Lotti & Associati S.p.A. (giugno 1997). *Opere integrative di cui alla perizia 4 luglio 1989. Relazione geologica del Progetto Esecutivo*
- [7] Consorzio di Bonifica Centro (giugno 2004). *Rilievo plano-altimetrico del coronamento e del paramento di valle della diga di Penne. Planimetria quotata*
- [8] Consorzio di Bonifica Vestina (12/02/1968). *Iniezioni; planimetria 1:500 – Allegato 5*
- [9] Consorzio di Bonifica Vestina (1967). *Iniezioni di impermeabilizzazione. Rapporti della Direzione lavori*

## 7 APPENDICE - VALUTAZIONE DEI PARAMETRI GEOTECNICI DEI TERRENI INTERESSATI DAGLI SCAVI DI SBANCAMENTO

### 7.1 Interpretazione delle indagini in sito

I lavori di scavo in superficie riguarderanno prevalentemente l'apprestamento della pista di lavoro in trincea destinata alla realizzazione del diaframma e, con l'eccezione della parte della pista che attraversa la strada in proseguimento del coronamento della diga, interesseranno solo i terreni sciolti (limi ed argille) riferiti alle "alluvioni antiche".

Il diaframma plastico come detto attraverserà il banco di *alluvioni antiche* e sarà approfondito di due metri oltre nel *substrato marnoso*.

Nel corso dei sondaggi SG1, SG2, SG3 sono stati prelevati campioni indisturbati prevalentemente nelle *alluvioni antiche* costituite da limi argilloso-sabbiosi e argille limoso-sabbiose.

### 7.2 Interpretazione delle prove di laboratorio

Sono disponibili i risultati delle analisi granulometriche (vedi grafico di fig. 2020 ) che indicano per questo deposito:

- una percentuale di ghiaia pari a 0%;
- una percentuale media di sabbia pari a circa 14%;
- una percentuale media di limo pari a circa 40%;
- una percentuale media di argilla pari a circa 45%.

In base alla classificazione del sistema USCS (Unified Soil Classification System) tali terreni sono classificati come ML (limi inorganici con  $w_L < 50\%$ ) e CL (argille inorganiche con  $w_L > 50\%$ ). Quindi si tratta prevalentemente di limi argillosi.

Il peso di volume determinato in laboratorio dai campioni prelevati è in media pari a  $19 \text{ kN/m}^3$  (vedasi fig. 21).

Il limite liquido è in media pari a 45%, il limite plastico è pari a 27%, il contenuto naturale d'acqua medio è pari a circa il 19% (vedasi figura 2222 ).

L'indice di plasticità IP è pari al 15÷20% (si veda fig. 23).

Dall'esame della carta di plasticità di Casagrande (vedi figura 24), i campioni di questa unità litostratigrafica rientrano nel campo delle argille inorganiche di media plasticità e dei limi inorganici di media compressibilità. Trattasi quindi di un materiale plastico.

Per la determinazione dei parametri di resistenza al taglio in condizioni drenate, si hanno a disposizione i risultati di:

- n. 2 prove triassiali consolidate-drenate effettuate sui campioni prelevati dai sondaggi SG1 e SG3;
- n. 6 prove di taglio consolidate-drenate effettuate sui campioni prelevati dai sondaggi SG1, SG2 e SG3.

Come si evince dalla tabella 6 del *Report preliminare sulle indagini geognostiche* (cod. PESD00RL005) nel seguito riportata, i risultati delle prove mostrano una varianza molto ampia. In effetti, le *alluvioni antiche* presentano una diversa composizione granulometrica dei litotipi che localmente le costituiscono: nei livelli in cui prevale la componente sabbioso-ghiaiosa aumenta il valore dell'angolo di resistenza al taglio con valori della coesione più bassi rispetto ai livelli in cui prevale la componente limoso-argillosa.

Sond.	Campione	Profondità	Litologia	c'	$\phi'$	$\sigma$	c <sub>u</sub>
		m		kPa	°	MPa	MPa
SG1	C1	2.7-3.00	Argille limose	28,3 (TD) 145,0 (TX)	27,9 (TD) 13,4 (TX)		
	C2	15.10-15.55	Argilla marnosa			1,03	0,52
	C3	22.30-22.72	Argilla marnosa			1,17	0,59
SG2	C1	1.60-2.00	Limi argilloso-sabbiosi	11,7	29,5		
	C2	5.95-6.55	Argille sabbiose	4,3	30,3		
SG3	C1	1.40-1.90	Limi argilloso-sabbiosi	28,3	24,7		
	C2	4.50-5.00	Limi argilloso-sabbiosi	3,1	29,9		
	C3	10.50-11.50	Argille limose	100,0 (TX)	11,4 (TX)		
	C4	16.50-17.00	Limi argilloso-sabbiosi	5,9	31,3		

Per cui cautelativamente e trascurando i valori ottenuti dalle prove triassiali ed alcuni valori poco rappresentativi, è ragionevole considerare per le unità litostratigrafiche interessate dagli scavi ovvero i terreni appartenenti alle *alluvioni antiche* i seguenti parametri di resistenza al taglio:

Limi argilloso-sabbiosi:

- $c' = 10$  kPa;
- $\phi' = 28^\circ$

Argille-limose:

- $c' = 12 \text{ kPa}$ ;
- $\varphi' = 29^\circ$

Sui due campioni di marne prelevati nel sondaggio SG1 sono state eseguite prove di resistenza a compressione laterale libera che hanno fornito valori dell'ordine di 1 MPa. Sugli stessi è stata inoltre eseguita una prova di permeabilità in cella triassiale che ha fornito il seguente valore del coefficiente di permeabilità  $k = 1.565^{-8} \text{ cm/sec}$ .

**7.3 Interpretazione delle prove SPT**

Sono disponibili anche valori di NSPT che sono generalmente compresi tra

- 14 e 17 colpi/0.3 m per i limi sabbioso-argillosi
- 37 e 76 colpi/0.3 m per le ghiaie e sabbie

come si osserva dal grafico di figura 25.

L'angolo di resistenza al taglio ( $\varphi'$ ) è stato stimato dalle prove SPT in base alle correlazioni proposte da *Schmertmann (1977)* per le ghiaie e sabbie e *Road Bridge Specification* per i limi argillosi.

In particolare, per i terreni limo-sabbioso-argillosi i valori dell'angolo di resistenza al taglio sono stati stimati utilizzando la correlazione di *Road Bridge Specification*

$$\varphi' = \sqrt{15N+15}$$

che fornisce buoni risultati per questi terreni.

Dall'interpretazione di tali dati è risultato il seguente range di valori (vedi figura 26):

$$\varphi' = 29^\circ \div 31^\circ$$

in linea pertanto con i risultati ottenuti dalle prove di laboratorio.

Per quanto riguarda i terreni a prevalente frazione ghiaioso-sabbiosa è stata calcolata la densità relativa, in accordo a quanto indicato in *Skempton (1986)*, che può essere correlata al valore  $N_{SPT}$  con la seguente relazione:

$$Dr = \left( \frac{1}{A + B \cdot \sigma_{vo}'} \cdot N_{SPT} \right)^{0.5}$$

essendo:

A, B = costanti empiriche in funzione della granulometria del terreno

$\sigma_{vo}'$  = pressione verticale efficace esistente in sito alla quota della prova SPT ( $\text{kg/cm}^2$ )

$N_{SPT}$  = numero di colpi per 30 cm di infissione

$D_r$  = densità relativa

Nel caso in esame sono state considerate, cautelativamente, le costanti empiriche relative a sabbie fini normal-consolidate.

L'interpretazione ha fornito il seguente range di valori (vedi figura 27):

$$D_r = 65-67\%$$

Per quanto riguarda la stima dell'angolo di resistenza al taglio, è stata utilizzata la correlazione di *Schmertmann* che mette in relazione l'angolo di resistenza al taglio con la densità relativa attraverso la seguente relazione:

$$\varphi = 34.5 + 0.10 \cdot D_R \quad \text{sabbia grossa-media uniformemente ben gradata}$$

$$\varphi = 31.5 + 0.115 \cdot D_R \quad \text{sabbia medio-fine uniformemente ben gradata}$$

$$\varphi = 28.0 + 0.14 \cdot D_R \quad \text{sabbia fine uniforme}$$

essendo:

$D_r$  = densità relativa

Nel caso in esame si è considerata cautelativamente la correlazione valida per sabbia fine.

L'interpretazione ha fornito il seguente range di valori (vedi figura 28):

$$\varphi' = 39^\circ \div 42^\circ$$

#### 7.4 Prove di permeabilità in sito

Sono state realizzate n.3 prove di permeabilità in foro di cui due nel foro di sondaggio SG2, rispettivamente negli intervalli di profondità di 15,70 - 15,90 m e di 16,90-17,20 m da p.c., per la determinazione della permeabilità degli strati ghiaioso-sabbiosi (misure poco attendibili a causa del franamento del foro) ed una nel foro di sondaggio SG3, nell'intervallo di profondità di 25,10-27,65 m da p.c., per la valutazione della permeabilità delle argille marnose e marne di base.

Nella seguente tabella sono riassunti i risultati delle prove.

Sond.	Profondità	Litologia	Kv
	m		cm/sec
SG2	15.70-15.90	Sabbie con ghiaietto	2,33E-04 – 2,99E-04
	16.90-17.20	Ghiaie in matrice sabbiosa	1,06E-02
SG3	25,10-27,65	Argille (spessore 2,4m) su sabbie (spessore 0,6m) su marne (2,8m)	3,25E-05

### 7.5 Scelta dei parametri geotecnici

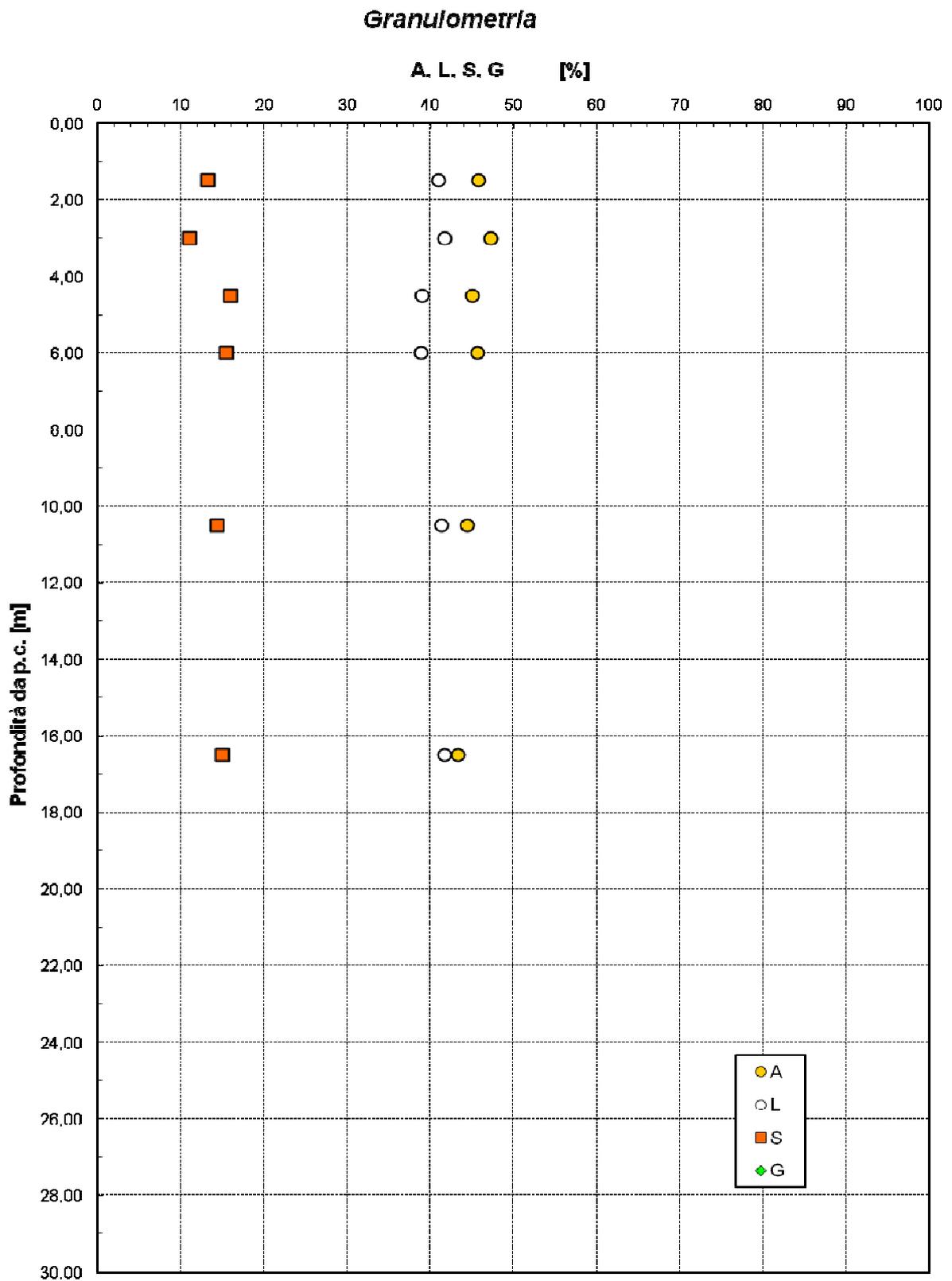
In definitiva, lungo il tracciato del diaframma si possono assumere i seguenti range dei parametri geotecnici dei due litotipi:

#### Limi sabbioso-argillosi

$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 10\div 12 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\varphi' = 24^\circ\div 28^\circ$	angolo di resistenza al taglio

#### Ghiaie e sabbie

$\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$	peso di volume naturale
$c' = 0 \text{ kPa}$	coesione drenata
$\varphi' = 30^\circ\div 35^\circ$	angolo di resistenza al taglio.



**Figura 20 – Granulometria**

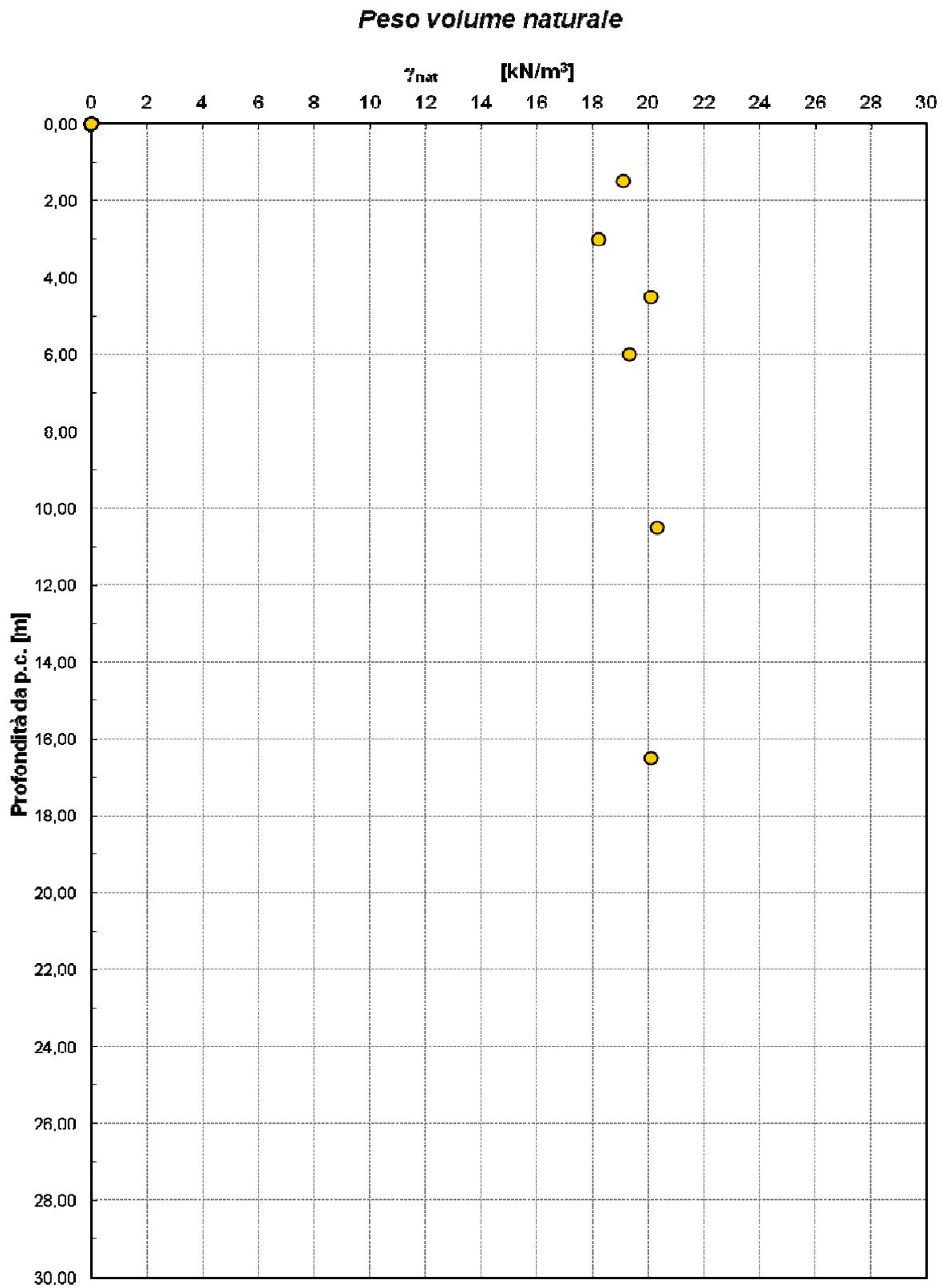


Figura 21 – Peso volume naturale

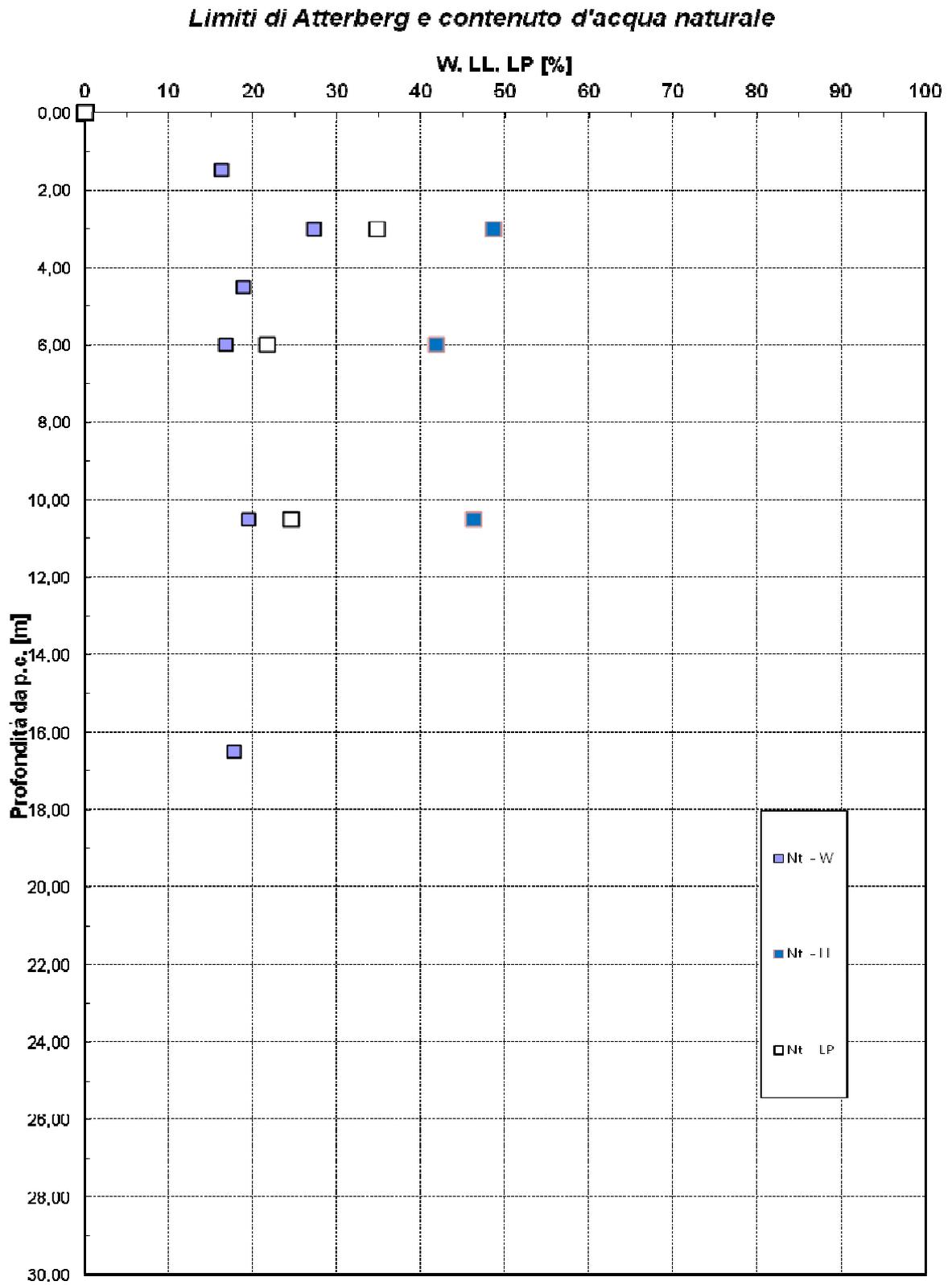
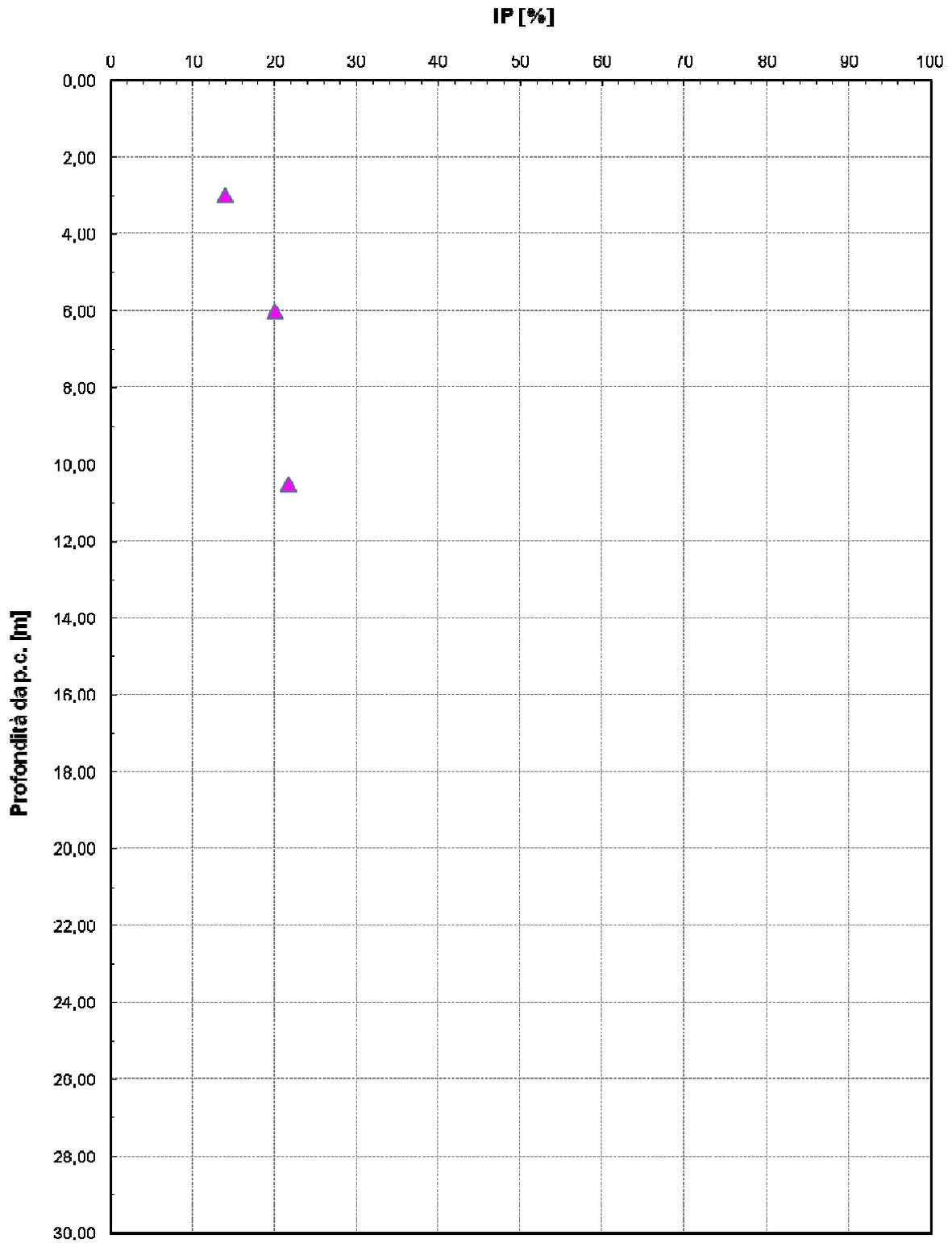


Figura 22 – Limiti Atterberg e contenuto d'acqua naturale

**Andamento dell'indice plastico****Figura 23 – Indice plastico**

### Carta di Plasticità di Casagrande

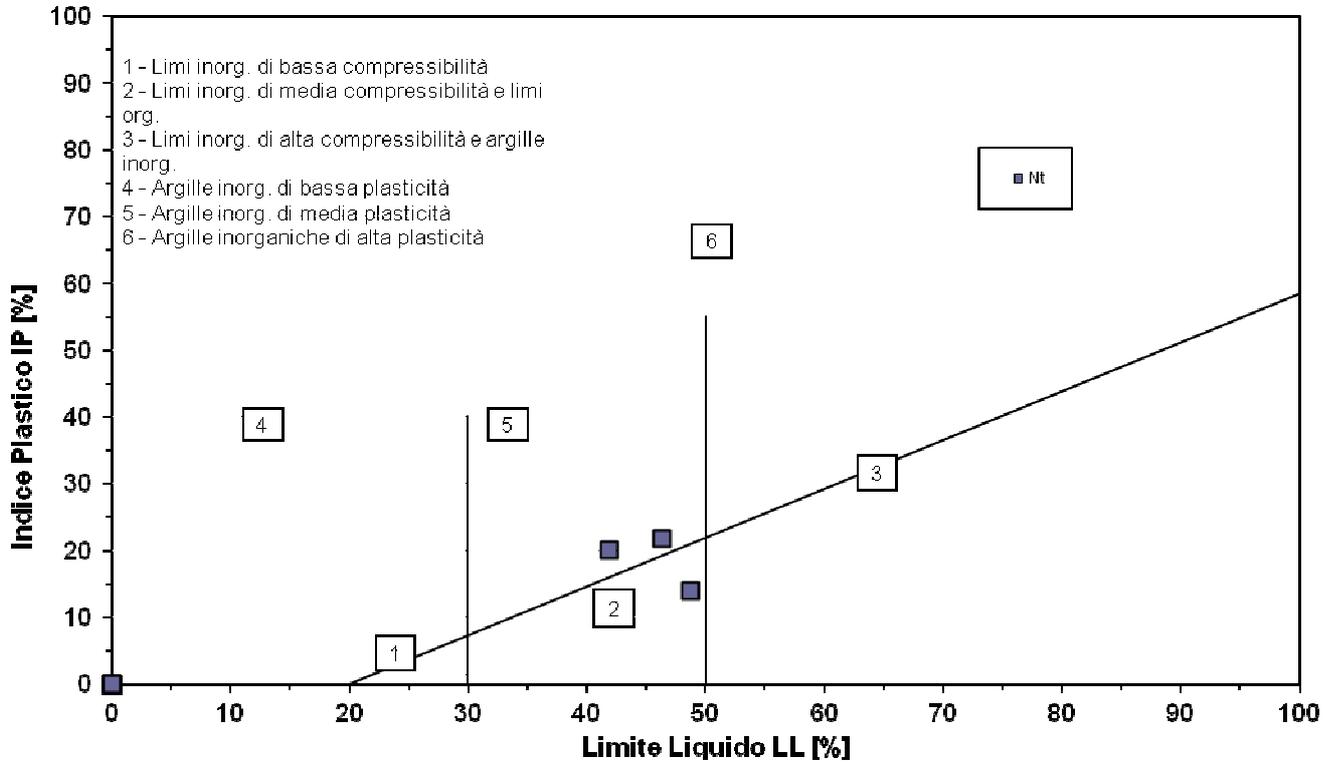
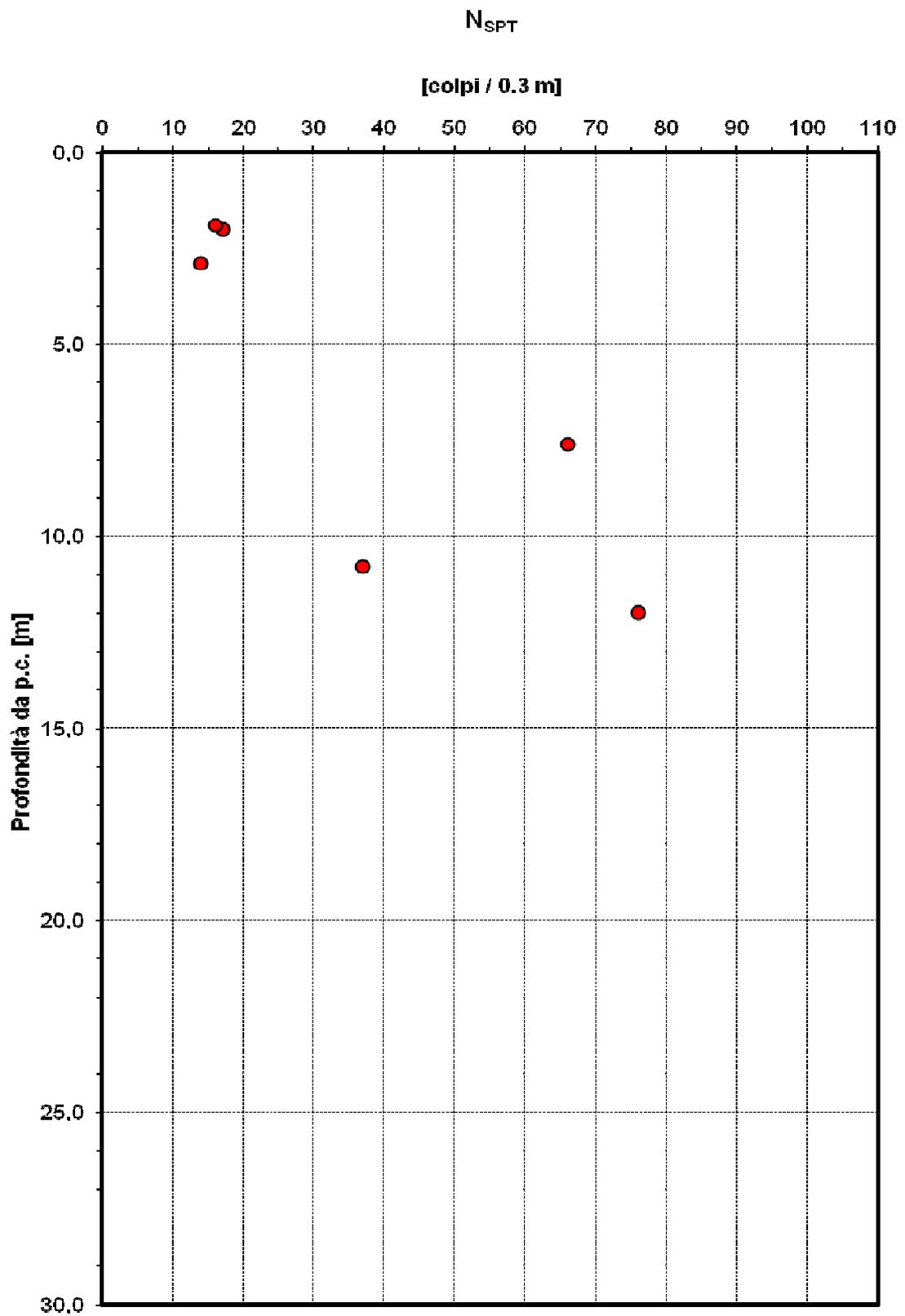


Figura 24 – Carta plasticità Casagrande

Figura 25 – Valori  $N_{SPT}$

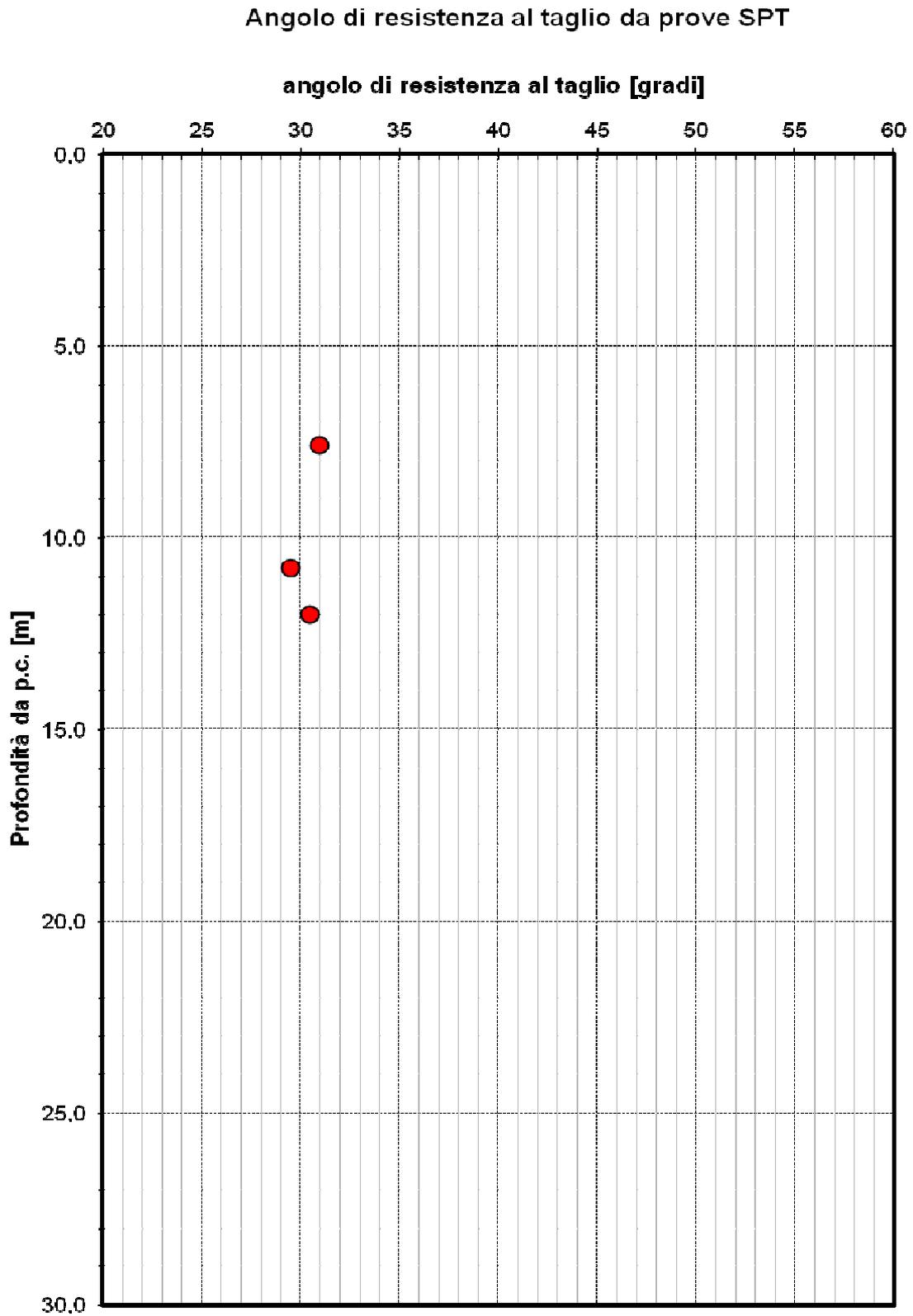
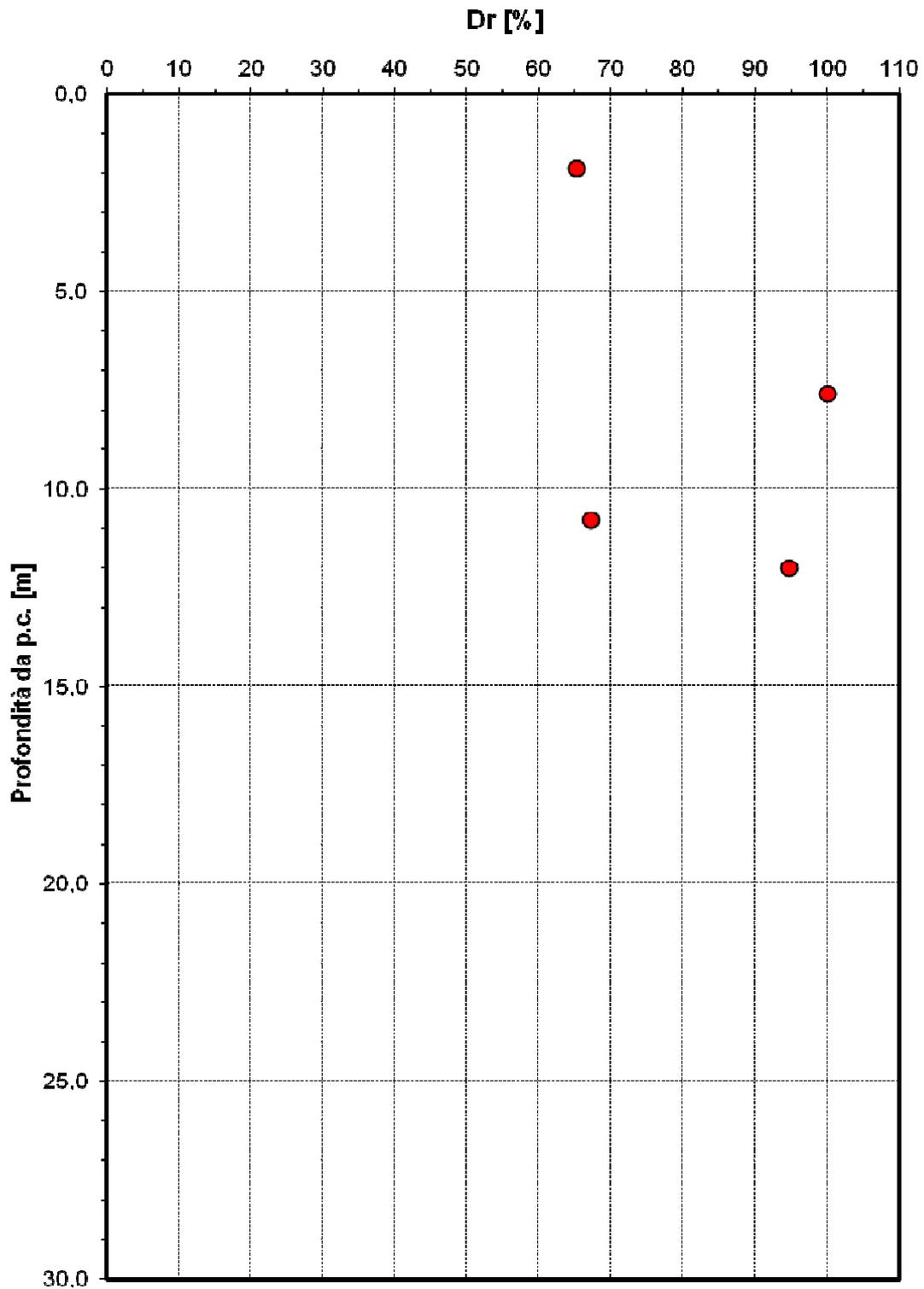


Figura 26 – Valori angolo resistenza al taglio limi sabbioso-argillosi (*Road Bridge Specification*)

## Densità relativa da prove SPT

Figura 27 – Valori della densità relativa ghiaie e sabbie (*Skempton 1977*)

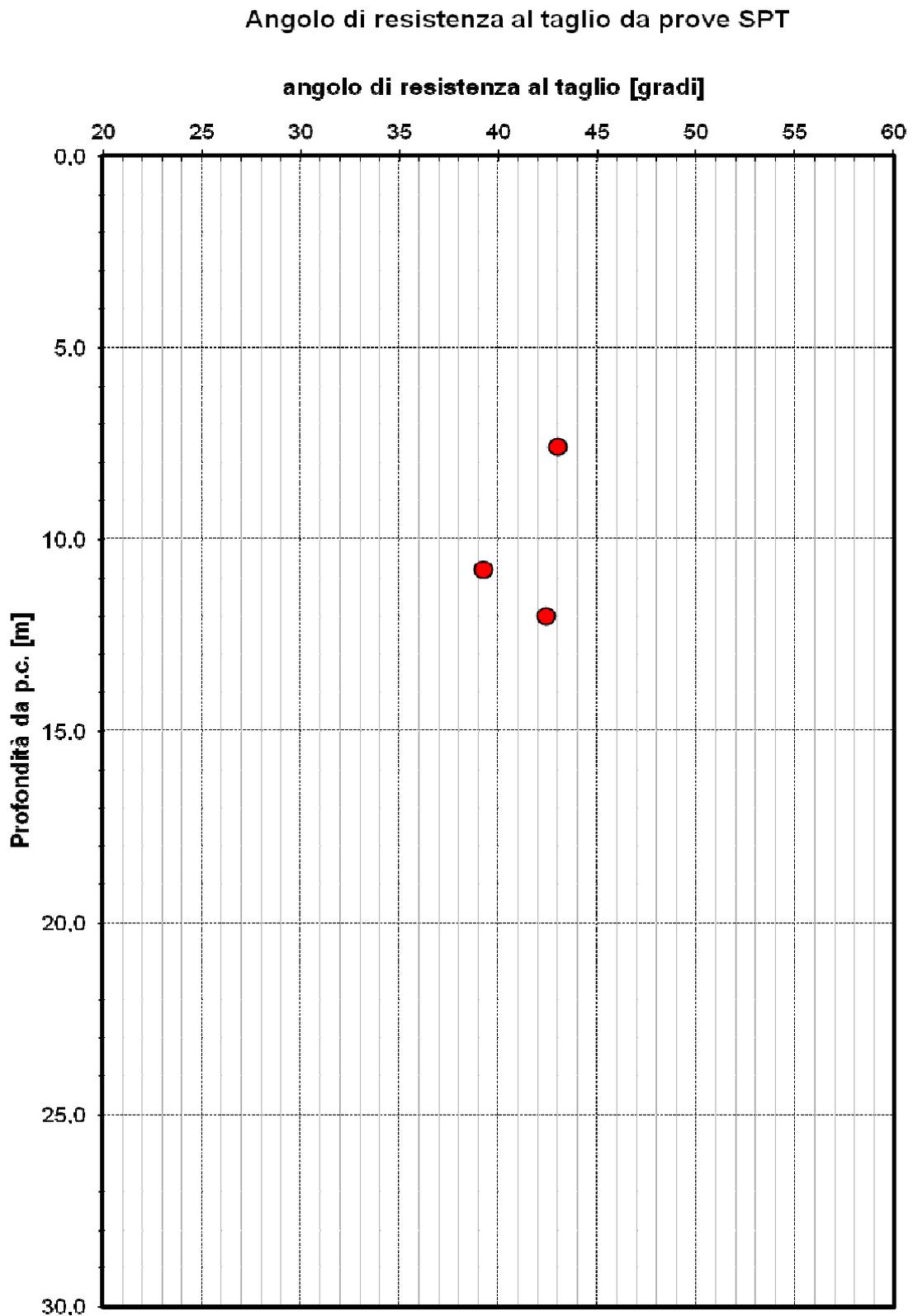


Figura 28 – Valori angolo resistenza al taglio ghiaie e sabbie (*Schmertmann 1977*)