

SATTI
S.p.A. TORINESE TRASPORTI INTERCOMUNALI TORINO

METROPOLITANA AUTOMATICA DI TORINO
LINEA 1
TRATTA FUNZIONALE COLLEGNO – TORINO PORTA NUOVA

TRATTA POZZO STRADA-ACAJA
PROGETTO ESECUTIVO

STUDI E INDAGINI

GEOLOGIA IDROGEOLOGIA E GEOTECNICA

RELAZIONE GEOTECNICA

REV.	REDAZIONE		VERIFICA		APPROVAZIONE		
	NOME	FIRMA	NOME	FIRMA	NOME	FIRMA	DATA
0	Dott. E.Rabbi		Prof. G. Barla		Ing. P.Grasso		31/07/2000
a							
b							
c							

INDICE

1. INTRODUZIONE	1
2. STUDIO GEOLOGICO	2
2.1 Aspetti geologico-morfologici	2
2.2 La cementazione dei depositi quaternari	2
2.3 Inquadramento idrogeologico.....	3
2.4 Condizioni di deflusso della falda superficiale	3
2.5 Presenza di altri fluidi.....	5
2.6 Caratteri sismici.....	5
3. QUADRO DI RIFERIMENTO PROGETTUALE	6
3.1 Geologia e Geomorfologia	6
3.2 Idrogeologia.....	6
4. LE INDAGINI.....	8
4.1 Indagini esistenti.....	8
4.2 Indagini per il progetto definitivo ed esecutivo.....	8
4.3 Prove di laboratorio per la caratterizzazione geotecnica.....	12
4.4 Prove di laboratorio per la scelta del metodo di scavo.....	12
5. RISULTATI DELLE INDAGINI E INDIVIDUAZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE	14
5.1 Considerazioni preliminari	14
5.2 Analisi dei dati.....	14
5.2.1 Sondaggi.....	14
5.2.2 Diagrafie.....	14
5.2.3 Pozzi geognostici praticabili	16
5.2.4 Prove penetrometriche dinamiche	17
5.2.5 Prove di carico su piastra	17
5.2.6 Prove di laboratorio	19
5.3 Individuazione e descrizione delle unità geotecniche	20
5.3.1 Unità 1: terreno superficiale.....	20
5.3.2 Unità 2: ghiaie con sabbie da sciolte a debolmente cementate	21
5.3.3 Unità 3: ghiaie con sabbie con cementazione da debole a media	21
5.3.4 Unità 4: ghiaie con sabbie con cementazione da media ad elevata.....	21
6. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	23
7. MODELLO GEOLOGICO-GEOTECNICO.....	25
7.1 Zonazione geotecnica	25
7.2 Affidabilità del modello	26
8. PROBLEMATICHE DI SCAVO LEGATE ALLA NATURA DEL TERRENO.....	27
8.1 Ciottoli e trovanti.....	27
8.2 Cementazione e/o addensamento	28
8.3 Presenza di lenti di sabbia	28
8.4 Presenza di acqua	28
8.5 Presenza di gas	29
8.6 Zone inquinate (acqua e terreno).....	29

8.7	Zone disturbate, presenza di cavità	29
8.8	Canali storici.....	29
8.9	Danni di guerra.....	30
8.10	Presenza di reperti archeologici	30
9.	NORMATIVA.....	31
10.	BIBLIOGRAFIA	32

1. INTRODUZIONE

Questa relazione illustra, congiuntamente alla tavola del profilo geologico-geotecnico, la caratterizzazione delle diverse unità geotecniche riconosciute e discretizzate lungo il tracciato del lotto 4.

La prima tratta funzionale della linea 1 della Metropolitana di Torino si sviluppa per circa 9,6km da Collegno (area Deposito-Officina) fin poco oltre la Stazione di Porta Nuova (asta di manovra) e si articola in 5 lotti di opere civili al rustico:

- lotto 1 Deposito
- lotto 2 Tratta Deposito - Fermi
- lotto 3 Tratta Fermi - Pozzo Strada
- lotto 4 Tratta Pozzo Strada - Acaja
- lotto 5 Tratta Acaja - Porta Nuova.

Lungo la linea saranno realizzate 15 stazioni di cui 13 poste in corrispondenza dei principali incroci (Fermi, Paradiso, Marche, Massaua, Pozzo Strada, Monte Grappa, Rivoli, Racconigi, Bernini, Principi d'Acaja, XVIII dicembre, Vinzaglio, Re Umberto) e 2 di interscambio con linee delle Ferrovie dello Stato: le stazioni di Porta Susa e di Porta Nuova.

Il piano banchina è normalmente a -15,50m dal piano campagna.

Tre stazioni e precisamente Paradiso, XVIII Dicembre e Vinzaglio sono più profonde (-17,40m da p.c.).

La galleria di linea verrà realizzata con una macchina di scavo a piena sezione (TBM: Tunnel Boring Machine) e avrà diametro interno finito pari a 6.80m.

Il tracciato, muovendosi da Ovest verso Est con progressive crescenti, percorre inizialmente via De Amicis, nel Comune di Collegno, quindi, entrando nel comune di Torino, si sviluppa in asse a Corso Francia, fino all'intersezione con Corso Inghilterra; da qui, in curva ampia, sottopassa il Passante Ferroviario e si porta in Piazza XVIII dicembre, di fronte all'attuale stazione di Porta Susa, per proseguire poi lungo Corso Bolzano fino alla seconda curva, prevista per permettere l'imbocco di Corso Vittorio Emanuele II. Il corso, uno dei più importanti di Torino, viene percorso fin poco oltre la stazione di Porta Nuova.

Il tracciato, da un punto di vista costruttivo, risulta così suddiviso:

- tratta eseguita a cielo aperto, che si sviluppa nel Comune di Collegno, lungo via Fratelli Cervi e via De Amicis, tra il Deposito/Officina e la Stazione Fermi;
- tratta eseguita a foro cieco, dalla stazione Fermi fino alla stazione di Porta Nuova di cui il lotto 4 costituisce un tratto di 2.6km circa, compreso tra le stazioni Pozzo Strada e Principi d'Acaja.

2. STUDIO GEOLOGICO

2.1 Aspetti geologico-morfologici

Il territorio comunale di Torino si estende per circa l'80% su un'area semi-pianeggiante costituita dagli apporti successivi delle conoidi alluvionali poste allo sbocco delle valli alpine della Dora Riparia e della Stura di Lanzo; la restante parte del territorio è costituita dai rilievi collinari posti a est del fiume Po. L'area urbana presenta una debole pendenza procedendo da ovest verso est, passando da 260-270 m s.l.m. a circa 220 m s.l.m.

Le conoidi alluvionali sono costituite da depositi di origine fluvioglaciale, successivamente rimodellati, almeno nei livelli più superficiali, dai corsi d'acqua che attraversano il territorio comunale. I termini litologici dei depositi fluvioglaciali sono legati ai litotipi del bacino idrografico di alimentazione: il Massiccio Ultrabasico di Lanzo (serpentiniti, ultrabasiti) per la Stura di Lanzo; il Complesso del Dora Maira (gneiss, quarziti), il Complesso dei Calcescisti con Pietre Verdi, e la Serie dell'Ambin (micascisti, quarziti), per la Dora Riparia.

L'assetto geologico generale, ricostruito dalle numerose indagini svolte nel sottosuolo torinese, è suddiviso, per i primi 150 m circa, in tre complessi litostratigrafici:

- depositi fluvioglaciali e fluviali Rissiani (Quaternario), principalmente composti da ghiaie, sabbie e ciottoli in matrice limosa;
- depositi lacustri e fluviolacustri (Villafranchiano Autoctono?) (Pleistocene Inferiore-Pliocene Superiore), composti da limi argillosi e livelli sabbioso ghiaiosi;
- depositi d'ambiente marino neritico del Pliocene, composti da limi argillosi, limi sabbiosi e sabbie grigio azzurre con fossili.

Lo spessore del primo complesso (depositi fluvioglaciali e fluviali Rissiani) è variabile da un minimo di 25 m (zona a nord di Torino) a un massimo di 50 m circa nella zona centrale della città. Questi depositi presentano, al loro interno, orizzonti e livelli ad andamento discontinuo e a vario grado di cementazione; i livelli a maggior cementazione (livelli conglomeratici) sono caratteristici del sottosuolo di Torino e sono noti in letteratura con il termine formazionale di "puddinghe".

Il limite inferiore dei depositi fluvioglaciali Rissiani è costituito da un contatto di tipo erosionale.

La potenza del secondo complesso varia molto in relazione alla zona di riferimento, da un massimo di 140 m in Piazza Marmolada a pochi metri nella zona nord di Torino, nelle vicinanze della Stura di Lanzo. Il contatto tra la base del complesso Villafranchiano e i sottostanti depositi Pliocenici è in eteropia di facies.

2.2 La cementazione dei depositi quaternari

Il sottosuolo di Torino, se da un punto di vista geologico può essere definito relativamente semplice, presenta delle rilevanti variazioni sia lateralmente sia lungo la profondità, relativamente alla cementazione dei depositi fluvioglaciali (ghiaie, ciottoli e sabbie in matrice limosa).

La natura della cementazione è dovuta alla precipitazione del carbonato di calcio e magnesio presente in soluzione sia nell'acqua di falda sia nell'acqua di infiltrazione meteorica, per variazioni di temperatura e di pH.

I carbonati presenti in soluzione nelle acque della falda superficiale provengono principalmente dalle acque della Dora Riparia (350-400 mg/l CaCO_3 disciolto), che alimenta la falda nei periodi di maggior portata. Quando le acque della falda superficiale, cariche di carbonati, si miscelano con acque provenienti da altri bacini di alimentazione, la variazione di temperatura (diminuzione) o di pH (innalzamento del valore) provoca la precipitazione dei carbonati disciolti in soluzione.

Le acque di precipitazione meteorica infiltrandosi nel suolo si arricchiscono di CO_2 che, combinandosi con l'acqua, produce acido carbonico (H_2CO_3) e determinano, dunque, una diminuzione del pH. Le acque così divenute aggressive riescono a portare in soluzione il carbonato di calcio e magnesio presente nei depositi. All'aumentare della profondità, il variare della temperatura (la temperatura delle acque di infiltrazione non è più influenzata dalla temperatura dell'aria, generalmente si verifica un abbassamento della temperatura) modifica l'equilibrio chimico delle specie carbonatiche disciolte, provocandone la precipitazione.

I due meccanismi di formazione dei depositi cementati sopracitati spiegano la formazione di lenti e livelli di materiale cementato sia nella zona non satura sia al di sotto del livello di oscillazione della falda superficiale.

2.3 Inquadramento idrogeologico

Con riferimento all'assetto litostratigrafico per i primi 150-200m, il sottosuolo di Torino è sede di un sistema di falde sovrapposte. Dalle informazioni ricavate dalla letteratura e dai dati riassunti nelle schede dei pozzi, risulta evidente il seguente assetto idrogeologico:

- acquifero superficiale a falda libera costituito da depositi grossolani riferibili al Quaternario (ciottoli, ghiaie e sabbie in matrice sabbioso-limosa), con uno spessore della zona satura variabile tra 15 e 30 m e limitato alla base da uno strato di argille con spessore pari a circa 30 m, presente in quasi tutte le stratigrafie dei pozzi analizzati. La superficie dell'acquifero a falda libera si trova a una profondità variabile dai 40 ai 15 metri di profondità dal piano campagna.
- acquifero profondo, verosimilmente confinato e del tipo multifalda, è situato indicativamente tra 70 e 200 m dal p.c., come desunto dalle informazioni provenienti da diversi pozzi profondi presenti nell'area oggetto di studio. Tale acquifero è costituito da alternanze di depositi medio grossolani e fini (argille limose con livelli di ghiaie e sabbie), appartenenti a depositi fluviolacustri; la sua base è rappresentata da uno strato di argille presente, a seconda delle zone, a circa 150-200 m dal piano campagna.

2.4 Condizioni di deflusso della falda superficiale

La carta delle curve isopiezometriche riferite alle misure del periodo febbraio-marzo 2000 mostra un andamento della superficie piezometrica piuttosto regolare, con gradiente medio pari a circa 0,4-0,5% e direzione di flusso orientata da nord-ovest verso sud-est; lo stesso gradiente aumenta nel settore orientale, in vicinanza del Po, e mostra valori pari a circa 0,8-1%. Appare comunque evidente come il Po risulti essere il livello di base locale dell'acquifero a falda libera, mentre la Dora Riparia agisca, a seconda delle zone, come dreno o come alimentatore della falda stessa.

Il confronto con la situazione relativa al giugno 1995, nonostante la restituzione delle curve isopiezometriche si basi su un minor numero di punti di misura (circa 50 tra piezometri e

pozzi) e copra inoltre un'area più limitata di quella attualmente oggetto di studio, evidenzia una situazione di deflusso sotterraneo decisamente simile, dalla quale si possono ricavare le seguenti considerazioni:

- l'andamento della superficie piezometrica appare regolare e confrontabile per entrambe le campagne di misura;
- i gradienti sono decisamente simili, così come le direzioni generali di flusso delle acque sotterranee, le zone di drenaggio e/o di alimentazione;
- appare evidente come la superficie piezometrica definita in base ai dati del febbraio-marzo 2000 abbia subito un abbassamento di circa 1-2 m rispetto a quella relativa al 1995. In particolare, le differenze sono evidenti nelle zone di Piazza Bernini (229 m nel 1995 rispetto ai 227 m nel 2000), Porta Susa (226 m nel 1995 e 225 nel 2000) e Porta Nuova (221 m nel 1995 rispetto ai 220 m nel 2000).

I valori di permeabilità indicati nel Profilo Geotecnico caratterizzano l'intero sviluppo del tracciato con la classe K3 (AFTES, 1992). Le classi sono così definite:

K1 < 10^{-8} m/s

K2 da 10^{-8} a 10^{-6} m/s

K3 da 10^{-6} a 10^{-4} m/s

K4 > 10^{-4} m/s

In merito al campo di variazione possibile della classe K3 è stata indicata la classe K4, fatta eccezione per la tratta compresa tra le progressive 7+100 km e 8+250 km, dove l'estesa presenza di cementazione dei depositi porta alla locale diminuzione della permeabilità verso i valori della classe K2.

In merito alla possibile variazione del livello di falda nel tempo si possono fare le seguenti considerazioni:

- l'escursione annuale è dell'ordine di 1-1,5m, per quanto riguarda la zona di interferenza tra opera e falda superficiale. Il trend annuale mostra un minimo ad agosto-settembre ed un massimo a gennaio-febbraio;
- il valore rilevato (periodo febbraio-marzo 2000) risente delle scarse precipitazioni dell'annata in corso, mentre il 1999 (918mm, dato della stazione presso l'Ufficio Idrografico) ha registrato valori di poco superiori alla media (836mm calcolata nel periodo 1913-1999);
- i valori del 1995 sono conseguenti ad un periodo particolarmente umido, dato che nel 1994 le precipitazioni sono state pari a 1195 mm.

Nell'ambito della progettazione di precedenti opere in sottterraneo presenti nel territorio comunale, si è tentato in passato di calcolare il trend evolutivo della falda partendo dai dati storici riferiti a due pozzi per acqua costruiti in epoca ottocentesca nella zona di Porta Susa, che indicavano il livello della superficie piezometrica a circa 230m s.l.m. Tale calcolo relativo all'andamento evolutivo della falda è stato impostato considerando le misure piezometriche effettuate negli anni 1962-64, 1979, 1982, 1987, 1991, 1995.

Il progressivo decentramento degli insediamenti produttivi dal territorio urbano e la conseguente chiusura dei pozzi usati a scopo industriale, agli inizi degli anni '80, ha

determinato un innalzamento della piezometrica che, sulla base dei dati disponibili, avrebbe dovuto coincidere, nel 2010, con la quota dei pozzi ottocenteschi (230m s.l.m.)

I dati piezometrici riferiti al febbraio-marzo 2000, contrariamente a quanto previsto sulla base dell'andamento evolutivo della falda, mostrano un abbassamento della superficie piezometrica rispetto alle misure effettuate nel 1995, indicando probabilmente una stabilizzazione generalizzata delle condizioni piezometriche in ambito urbano.

Infine, considerando che il livello massimo teorico di risalita della falda possa coincidere con quello storico dei pozzi ottocenteschi, e nell'ipotesi che l'andamento della superficie piezometrica (geometria delle curve isopieze) si mantenga simile nel tempo variando unicamente la quota, si potrebbe presupporre un potenziale innalzamento della falda di circa 3.5-4m rispetto al livello del 1995 e di circa 4-5m rispetto al livello attuale.

Questa indicazione è comunque da ritenersi cautelativa in ragione delle mutate condizioni del territorio comunale (impermeabilizzazione per la estensione del territorio urbano), dove la quasi totalità delle precipitazioni viene intercettata e convogliata nella rete di scarico a scapito della ricarica degli acquiferi.

2.5 Presenza di altri fluidi

Nei depositi che compongono il sottosuolo di Torino, anche in relazione alla loro genesi e natura, non sono segnalati accumuli di gas naturali.

E' invece da segnalare la possibile presenza, in particolare a Collegno e lungo tutto corso Francia, di accumuli di gas generati da percolazione nel terreno di idrocarburi e solventi clorurati, provenienti da stazioni di rifornimento carburanti e industrie come evidenziato da alcuni rilevamenti diretti e da monitoraggi intrapresi dal Dipartimento Ambiente della Provincia di Torino. Queste attività hanno immesso in falda, tramite pozzi perdenti, i reflui delle lavorazioni, mentre le stazioni di rifornimento, i cui serbatoi sono interrati, possono aver dato origine alla formazione, nel sottosuolo, di pennacchi di idrocarburi. Una parte di queste attività è stata delocata, ma il grado di persistenza di questi inquinanti è tale da farne ipotizzare la presenza anche adesso.

Il meccanismo di formazione di accumuli di gas è dovuto alla infiltrazione di liquidi a basso punto di evaporazione. L'accumulo di gas può avvenire in coincidenza di lenti o livelli più limosi o cementati, dove l'infiltrazione dei liquidi è rallentata o impedita. Il gas formato tende a "migrare" lateralmente e si concentra in zone non necessariamente in prossimità alla sorgente di inquinamento.

2.6 Caratteri sismici

Il territorio comunale della città di Torino non è inserito nell'elenco delle località sismiche di prima e seconda categoria (legge 25/11/1962 n. 1684, e successive integrazioni) dunque non è sottoposto a particolari provvedimenti o restrizioni riguardanti la costruzione di opere o manufatti.

3. QUADRO DI RIFERIMENTO PROGETTUALE

Il lotto 4 si sviluppa in galleria naturale tra la stazione Pozzo Strada (progr.4+071, quota progetto di 249m slm, quota terreno 266m slm) e la stazione Principi d'Acaja (progr.6+717, quota progetto 232m slm, quota terreno 249m slm) per complessivi 2646m di tratta.

Il tracciato si dispone totalmente nel comune di Torino sempre mantenendosi in asse a corso Francia, che rappresenta una delle principali direttrici Est-Ovest della metropoli.

Le stazioni previste nel lotto 4 sono: Monte Grappa, Rivoli, Racconigi, Bernini e Principi d'Acaja, tutte disposte in corso Francia, in prossimità degli incroci con gli omonimi corsi trasversali, nel comune di Torino.

Nel lotto, oltre alla galleria naturale e alle stazioni sono presenti alcune opere accessorie:

- 5 pozzi di intertratta, P05, P06, P07, P08 E P09, ubicati tra le stazioni;
- 2 sifoni, posti in corrispondenza delle omonime stazioni Racconigi e Monte Grappa.

3.1 Geologia e Geomorfologia

La ricostruzione dell'andamento dei principali livelli litologici riconosciuti è stata realizzata utilizzando informazioni derivanti dalle indagini eseguite appositamente per il progetto, da altre indagini eseguite nelle fasi progettuali precedenti e da indagini condotte per progetti diversi.

Sostanzialmente l'opera (galleria, stazioni e opere accessorie) si svilupperà attraverso depositi fluvioglaciali e fluviali Rissiani costituiti da ghiaie, ciottoli e sabbie in matrice limosa, caratterizzati da livelli con cementazione variabile da assente ad elevata, con una prevalenza di cementazione media. Localmente sono presenti livelli di ciottoli o sabbie privi di matrice fine e blocchi. La continuità laterale di questi livelli è altamente variabile.

I numerosi ciottoli, campionati con valori percentuali massimi del 36% (campagna di indagine per il Passante Ferroviario), risultano sostanzialmente composti da quarziti, gneiss, serpentiniti e metagabbri e raramente presentano un'alterazione tale da comprometterne la struttura. La forma, sia per i ciottoli che per i blocchi (passante >75mm), varia da sub-arrotondata ad arrotondata e le dimensioni sono da un minimo di 10cm circa di diametro fino a 1.2m (zona Passante Ferroviario), con elevata frequenza di blocchi di dimensione 40-50 cm. Sono inoltre presenti livelli di ciottoli ben addensati e privi di matrice sabbioso limosa fine (percentuali massime del 20-25%). La presenza di concrezioni di calcite e cemento calcareo, prevalentemente sulla parte superiore dei ciottoli, avvalorà l'interpretazione che vede la cementazione legata al fenomeno della percolazione delle acque di infiltrazione (zona non satura).

3.2 Idrogeologia

La situazione idrogeologica relativa al lotto in questione mostra la profondità della falda superficiale variabile da 32m (Stazione Pozzo Strada) a 23m (Stazione Principi d'Acaja) dal piano campagna (situazione relativa al periodo febbraio-marzo 2000). La direzione di deflusso sotterraneo, come evidenziato dalla carta delle isopiezometriche relativa alla campagna di misure febbraio-marzo 2000, è orientata da nord-ovest a sud-est (N100E) e mostra un gradiente (calcolato lungo lo sviluppo del tracciato) variabile tra 0.2% e 0.35%. Dai dati acquisiti durante la campagna geognostica (prove Lefranc a carico costante) e dall'analisi dei dati bibliografici si può attribuire la classe di permeabilità K3 (AFTES, 1992)

ai terreni interessati dallo sviluppo dell'opera. I valori di permeabilità della classificazione AFTES sono così definiti:

K1 < 10^{-8} m/s

K2 da 10^{-8} a 10^{-6} m/s

K3 da 10^{-6} a 10^{-4} m/s

K4 > 10^{-4} m/s.

Data la profondità dell'opera e la quota della falda superficiale, non si evidenziano problemi di interferenza tra lo scavo dell'opera e il deflusso sotterraneo dell'acqua di falda per tutto lo sviluppo del lotto. La quota di progetto si mantiene generalmente al di sopra della quota della falda piezometrica rilevata relativamente ai periodi febbraio-marzo 2000 e giugno 1995; limitatamente alle stazioni Racconigi, Bernini e Principi d'Acaja si evidenzia, tuttavia, una interferenza tra la falda superficiale e la profondità massima di infissione delle paratie.

E' stata osservata (scavo del pozzo geognostico praticabile P2 in C.so Monte Grappa) la possibile formazione di falde idriche sospese a limitata potenzialità, direttamente ricaricate dalle acque di infiltrazione meteorica. La presenza di livelli limosi discontinui e di potenza non cartografabile, ubicati a profondità variabile nella zona non satura ed il meccanismo di ricarica favoriscono l'accumulo di esigue quantità d'acqua che in ogni caso, non essendo ricaricate in maniera costante, tendono ad esaurirsi in breve tempo.

4. LE INDAGINI

4.1 Indagini esistenti

Sono stati presi in esame i risultati delle campagne di indagini geognostiche realizzati per precedenti fasi progettuali dell'opera ed i dati derivanti da indagini condotte per progetti diversi e che risultano documentati in archivi pubblici (Enti ed Università) e privati (Imprese).

In particolare le indagini prese in esame sono state:

- Campagna indagini Sicos 1981 (Comune di Torino);
- Campagna indagini Sicos 1978 (Fiat Engineering);
- Campagna indagini 1987 (ATM).

I dati reperiti sono stati organizzati in una banca dati georeferenziata ed analizzati in termini di qualità ed affidabilità del dato. I parametri presi in esame per quest'ultima analisi sono stati il periodo di esecuzione e la finalità dell'indagine, la qualità della restituzione dei risultati, l'ubicazione assoluta e relativa dell'indagine rispetto al tracciato del lotto 4 e la profondità dell'indagine.

In particolare l'analisi ha evidenziato la carenza di informazioni relative alla distribuzione spaziale ed al grado di intensità (debole, media, elevata) della cementazione diffusa nei depositi fluvio-glaciali; questo ha portato ad escludere, visto il grado complessivamente basso di affidabilità, la quasi totalità delle indagini.

In Tabella 4.1 viene riportato l'elenco delle indagini pregresse, delle quali si è tenuto conto nella ricostruzione del modello geologico-geotecnico del lotto in esame.

Tabella 4.1 – Indagini pregresse disponibili in prossimità del tracciato

Codice	Tipologia Indagine	Esecutore Indagine	Periodo Esecuz.	Profondità (m)	Affidabilità dell'indagine
150/2	Sondaggio	Sicos	1978-1981	30.2	Bassa
150/4	Sondaggio	Sicos	1978-1981	14.1	Media
152/1	Sondaggio	Sicos	1978-1981	12.1	Media
S2ML	Sondaggio	n.d.	1987	35.0	Media

4.2 Indagini per il progetto definitivo ed esecutivo

Le nuove indagini eseguite nel periodo dicembre 1999-giugno 2000, articolate nelle diverse metodologie descritte nel seguito, hanno consentito di acquisire informazioni omogeneamente rappresentative, in termini di quantità e qualità del dato.

Sono stati, in tal modo, perseguiti i seguenti obiettivi:

- affinamento del grado di conoscenza dei terreni in termini di ricostruzione della sequenza litostratigrafica e individuazione delle unità geotecniche (con particolare riferimento a grado di cementazione dei livelli cementati e loro disposizione spaziale);
- verifica della situazione idrogeologica e delle caratteristiche della falda (posizione attuale, permeabilità).

- caratterizzazione geotecnica dei terreni con determinazione dei parametri fisici e meccanici (deformabilità e resistenza) da utilizzare nelle analisi progettuali;
- valutazione degli stessi terreni in rapporto alla scelta delle tecnologie di scavo da adottare.

Le indagini realizzate per la progettazione definitiva della Metropolitana sono riportate in Tabella 4.2; in tabella sono evidenziate le indagini ricadenti nel lotto in esame.

Tabella 4.2 – Indagini in sito eseguite nel periodo dicembre 1999 - aprile 2000

Codice Sondaggio	Prof. (m)	N _{SPT} (n° prove)	Profondità Falda (m)	Campioni Rimaneg. (n°)	Strument. in foro (-)	Prova Lefranc (n°)	Indagine Relativa a lotto 4 (-)
D1	15	-	Assente	-	p.t.a.	-	-
D3	15	-	-	-	p.t.a.	-	-
D4	25	-	-	-	Tubo ABS	-	-
D4bis	20	-	-	-	Tubo ABS	-	-
D4ter	20	-	-	-	-	-	-
D6	20	-	-	-	p.t.a.	-	-
D8	25	-	-	-	-	-	Sì
D11	25	-	Assente	-	p.t.a.	-	Sì
D12	22	-	-	-	p.t.a.	-	Sì
D15	25	-	-	-	-	-	Sì
D16	25	-	-	-	p.t.a.	-	-
D18	30	-	-	-	Tubo ABS	-	-
D19	30	-	-	-	Tubo ABS	-	-
D20	25	-	19.6	-	p.t.a.	-	-
D22	25	-	-	-	Tubo ABS	-	-
D23	25	-	-	-	Tubo ABS	-	-
D27	25	-	-	-	Tubo ABS	-	-
D28	25	-	-	-	Tubo ABS	-	-
D30	20	-	17.7	-	p.t.a.	-	-
D31	25	-	18.3	-	p.t.a.	-	-
D32	20	-	-	-	Tubo ABS	-	-
D33	20	-	-	-	Tubo ABS	-	-
S2	30	10	29.44	9	p.t.a.	22.0m-22.5m	-
S3	20	6	Assente	6	p.t.a.	15.0m-15.5m	-

Tabella 4.2 (continua) – Indagini in sito eseguite nel periodo dicembre 1999 - aprile 2000

Codice Sondaggio	Prof. (m)	N _{SPT} (n° prove)	Profondità Falda (m)	Campioni Rimaneg. (n°)	Strument. in foro (-)	Prova Lefranc (n°)	Indagine Relativa a lotto 4 (-)
S6	20	6	18.90	6	p.t.a.	19.5m-20.0m	-
S7	20	6	Assente	6	p.t.a.	16.0m-16.5m	-
S9	25	8	Assente	8	p.t.a.	22.0m-23.5m	-
S11	25	8	Assente	8	p.t.a.	21.0m-22.5m	-
S12	20	6	Assente	-	p.t.a.	19.5m-20.0m	Sì
S13	20	6	Assente	-	p.t.a.	19.0m-19.5m	Sì
S15	20	6	Assente	6	p.t.a.	17.5m-18.0m	Sì
S16	25	8	Assente	8	p.t.a.	19.5m-21.0m	Sì
S18	22	7	21.2	6	p.t.a.	21.0m-22.0m	Sì
S23	40	8	20.7	13	p.t.a.	20.0m-20.5m	-
S25	25	8	18	8	Tubo ABS	20.5m-21.0m	-
S26	20	6	Assente	5	Tubo ABS	19.5m-20.0m	-
S27	20	6	19.5	6	p.t.a.	19.5m-20.0m	-
PZ1	1.20	-	-	1	-	-	-
PZ2	1.15	-	-	1	-	-	-
PZ3	0.60	-	-	1	-	-	-
PZ4	1.90	-	-	1	-	-	-
PZ5	1.95	-	-	1	-	-	-
P5	21.70	-	21.7	3 ⁽¹⁾ + 16 ⁽²⁾	-	-	-
P7	17.3	-	17.4	3 ⁽¹⁾	-	-	-
CR.H. 3: D18-D19	-	-	-	-	-	-	-
CR.H. 4: D22-D23	-	-	-	-	-	-	-
CR.H. 5: D27-D28-S25	-	-	-	-	-	-	-
CR.H. 7: D4-D4bis	-	-	-	-	-	-	-

D: diagrafia; S: sondaggio; PZ: pozzetto geognostico; P: pozzo praticabile; CR.H.: indagine geofisica; p.t.a.: piezometro a tubo aperto; Tubo ABS: tubo cieco in materiale plastico (ABS) attrezzato per indagini geofisiche.

⁽¹⁾Si tratta di macrocampioni di materiale non cementato di circa 0.8 m^3 ciascuno. Il materiale prelevato è stato sottoposto ad un' operazione di quartatura per assicurare la rappresentatività del campione da sottoporre in seguito ad analisi granulometrica.

⁽²⁾Nel pozzo P5 sono stati prelevati dei campioni di materiale cementato che sono stati sottoposti a prove di taglio diretto e di compressione monoassiale, nonché campioni su cui sono state eseguite prove per la determinazione delle caratteristiche mineralogiche, petrografiche, di abrasività, di durezza e perforabilità.

Ad integrazione della campagna geognostica precedente, per la progettazione esecutiva del lotto 4 sono state eseguite le indagini riportate in Tabella 4.3., in cui sono mostrati i dati sintetici delle indagini eseguite.

Tabella 4.3 – Indagini in sito eseguite sul lotto 4 nel periodo aprile 2000 – giugno 2000

Codice Sondaggio	Prof. (m)	N _{SPT} (n° prove)	Profondità Falda (m)	Campioni Rimaneg. (n°)	Strument. in foro (-)	Prova Lefranc (n°)
D38	25	-	-	-	-	-
D39	25	-	-	-	-	-
D40	25	-	-	-	-	-
P2	19.50	-	-	2 ⁽¹⁾ + 4 ⁽²⁾	-	-

D: diagrafia; P: pozzo praticabile;

⁽¹⁾ Si tratta di macrocampioni di materiale non cementato di circa 0.8 m^3 ciascuno. Il materiale prelevato è stato sottoposto ad un' operazione di quartatura per assicurare la rappresentatività del campione da sottoporre in seguito ad analisi granulometrica.

⁽²⁾ Nel pozzo P2 sono stati prelevati dei campioni di materiale cementato che sono stati sottoposti a prove di compressione monoassiale.

In definitiva le indagini in sito, eseguite nel periodo dicembre 1999-giugno 2000 relativamente al lotto 4, sono le seguenti:

- 5 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, aventi diametro di 101 mm e profondità comprese tra 20 e 25m, con esecuzione di prove penetrometriche in foro (Standard Penetration Test) ogni 3m, esecuzione di 5 prove Lefranc ed installazione di 5 piezometri a tubo aperto;
- 7 sondaggi geognostici a distruzione di nucleo con registrazione in continuo dei parametri di perforazione (diagrafia), aventi profondità variabile tra 22 e 25m, con installazione di 2 piezometri del tipo a tubo aperto per il monitoraggio della eventuale falda;
- 1 pozzo geognostico praticabile avente diametro di scavo di 2.4m e profondità di 19.50m, finalizzato alla verifica litostratigrafica (con particolare riferimento al grado di cementazione del materiale scavato), al prelievo di campioni (per analisi granulometriche su grandi volumi di materiale e prove di compressione monoassiale) e all'esecuzione di 1 prova di carico su piastra in direzione verticale.

Per quanto riguarda l'ubicazione planimetrica dei punti d'indagine si rimanda alla tavola "Ubicazione delle indagini" (MTL1T1A4EGEOGN2S001).

4.3 Prove di laboratorio per la caratterizzazione geotecnica

Sui campioni prelevati durante l'esecuzione delle indagini in sito sono state eseguite prove di laboratorio relative a determinazioni del contenuto d'acqua e delle curve granulometriche.

Nel lotto in esame sono state realizzate 5 analisi granulometriche, eseguite su campioni prelevati durante i carotaggi e 2 analisi granulometriche, eseguite su macrocampioni prelevati nel pozzo P2; sono state, inoltre, realizzate 4 prove di compressione uniassiale su campioni di ghiaia con sabbia e ciottoli con grado di cementazione elevato, prelevati nel pozzo P2. Per la caratterizzazione geotecnica dei terreni, sono stati utilizzati i risultati derivanti, oltre che dal lotto in esame, dagli altri lotti.

4.4 Prove di laboratorio per la scelta del metodo di scavo

Al fine di caratterizzare i terreni per una corretta individuazione delle tecnologie di scavo e della relativa progettazione di dettaglio sono stati utilizzati i risultati delle prove eseguite su campioni ricavati da ciottoli e blocchi di grandi dimensioni prelevati dal pozzo P5 dell'adiacente lotto 5. La valenza di tali prove è comunque effettiva per il lotto in oggetto, data l'omogeneità delle litologie reperite lungo il tracciato. Le prove hanno consentito la determinazione delle caratteristiche mineralogiche, petrografiche, di abrasività, di durezza, di perforabilità e di resistenza meccanica. In particolare si tratta di:

- sezioni sottili;
- prove Cone Indenter;
- prove Cerchar;
- prove Sievers;
- prove Drop Test;
- prove di compressione uniassiale e di trazione Brasiliana.

In Tabella 4.3 viene fornita una sintesi delle tipologie e dello scopo delle prove di laboratorio eseguite.

Tabella 4.3: Tipologia e scopo delle prove di laboratorio per la scelta dei metodi di scavo

PROVE DI LABORATORIO		
	Tipologia	Scopo
1	VAGLIATURA DI MACROCAMPIONI	Classificazione completa e dettagliata descrizione della parte ciottolosa. Determinazione del Dmax e determinazione del passante al setaccio di 75µm
2	PROVE DI ABRASIVITA' (Cerchar)	Determinazione dell'abrasività dei ciottoli in funzione della valutazione del consumo degli utensili e delle prestazioni di scavo

Tabella 4.3 (continua): Tipologia e scopo delle prove di laboratorio per la scelta dei metodi di scavo

PROVE DI LABORATORIO		
	Tipologia	Scopo
3	PROVE DI DUREZZA E PERFORABILITA' (Cone Indenter NCB, Sievers, Drop Test)	Determinazione della durezza e perforabilità dei ciottoli in funzione della valutazione della disposizione degli utensili sulla testa di scavo, del consumo degli utensili e delle prestazioni di scavo
4	ANALISI MINERALOGICHE E PETROGRAFICHE (Sezioni sottili)	Determinazione composizione mineralogica, tessitura e struttura intrinseca; classificazione litologica dei ciottoli in funzione della valutazione del consumo degli utensili e delle prestazioni di scavo

5. RISULTATI DELLE INDAGINI E INDIVIDUAZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE

5.1 Considerazioni preliminari

La principale caratteristica del materiale componente il sottosuolo della città di Torino è data dalla presenza di lenti e livelli a differente grado e diffusione di cementazione ed addensamento.

In particolare, da quanto è stato possibile osservare direttamente, soprattutto nel pozzo ispezionabile realizzato nel lotto 4 ma anche in quelli realizzati nei lotti adiacenti, la cementazione si presenta in livelli di spessore da centimetrico a decimetrico, cui sono intercalati livelli sciolti di varia potenza. Ne risulta, conseguentemente, un insieme omogeneo a grande scala che, nel dettaglio, è costituito da alternanze ripetute di materiali a diverso grado di cementazione.

5.2 Analisi dei dati

5.2.1 Sondaggi

I sondaggi a carotaggio continuo eseguiti non hanno permesso il recupero indisturbato di campioni di materiale cementato, in relazione al disturbo indotto dalla rotazione dell'utensile di perforazione. Ricorrendo ad un'adeguata descrizione del materiale estratto, con il lavaggio e l'osservazione dei singoli ciottoli, è però stato possibile riconoscere e distinguere tre livelli di cementazione differenti:

<i>Elementi di riconoscimento nel carotaggio</i>	<i>Livello cementazione</i>
Singoli clasti con tracce di materiale fine cementato	Tracce di cementazione
Clasti con patina carbonatica	Cementazione diffusa
Materiale "bruciato"	Elevato

5.2.2 Diagrafie

Le diagrafie sono ottenute attraverso la registrazione continua dei parametri di perforazione: velocità di avanzamento della perforazione, velocità di rotazione, spinta, coppia e pressione dei fluidi nel circuito.

Sulla base delle grandezze registrate è stato calcolato il valore dell'energia specifica E_s , intesa come quantità di lavoro che deve essere spesa per la perforazione dell'unità di volume di terreno ed espressa in MJ/m³.

Per tutte le diagrafie, i dati di energia specifica E_s sono stati trattati eliminando improvvisi e puntuali valori di picco, dovuti, con buona probabilità, alla presenza di ciottoli ad elevata resistenza; tali dati sono stati, inoltre, mediati per intervalli di 10cm (diametro medio dei ciottoli) lungo la profondità.

Successivamente è stato eseguito un confronto tra i dati provenienti dalle due campagne di indagine (progetto definitivo e progetto esecutivo), notando che i valori di E_s provenienti dalla campagna più recente sono sistematicamente più elevati (fatto questo connesso sostanzialmente ad una diversa viscosità del fluido utilizzato durante la perforazione, in funzione della temperatura esterna differente durante le due fasi). Si è ovviato a questo

inconveniente introducendo un fattore di riduzione sui dati della campagna del Progetto Esecutivo, rendendoli, in tal modo, paragonabili in termini di E_s a quelli del Progetto Definitivo.

Sul profilo sono riportati i valori di energia specifica sottoposti alle elaborazioni sopra illustrate.

L'interpretazione dei dati di energia specifica è stata finalizzata a mettere in luce le proprietà di cementazione e di scavabilità dei terreni.

Precedenti esperienze maturate nel medesimo contesto e verificate sin dalla fase di progettazione definitiva hanno messo in luce che il terreno risulta cementato se i valori di energia specifica E_s verificano le seguenti disequazioni:

$$\begin{aligned} E_s &\geq 125 + 4 \cdot z \text{ MJ/m}^3 & (1) \\ s &\geq 40 \text{ cm} \end{aligned}$$

dove z (m) è l'approfondimento rispetto al piano campagna e s (cm) è lo spessore elementare dello strato di terreno.

Si è inoltre accertato che valori di energia specifica pari a:

$$\begin{aligned} E_s &\geq 142 \text{ MJ/m}^3 & (2) \\ s &\geq 40 \text{ cm} \end{aligned}$$

con s spessore dello strato elementare di terreno, rendono impossibile lo scavo dei diaframmi con benna mordente.

Le disuguaglianze (1) e (2) consentono di definire le grandezze percentuali "cementazione" e "scavabilità" indicate, rispettivamente, con i simboli $C\%$ e $S\%$ e definite dai seguenti rapporti:

$$C\% = \frac{\sum (\Delta L_c)_{\geq 40 \text{ cm}}}{L} \cdot 100 \quad S\% = \frac{\sum (\Delta L_s)_{\geq 40 \text{ cm}}}{L} \cdot 100 \quad (3)$$

essendo:

$C\%$ cementazione percentuale;

$S\%$ scavabilità percentuale;

$\sum \Delta L_c$ sommatoria spessori degli strati di terreno cementati (dove $E_s \geq 125 + 4z \text{ MJ/m}^3$);

$\sum \Delta L_s$ sommatoria spessori degli strati di terreno scavabili con benna (dove $E_s < 142 \text{ MJ/m}^3$);

L lunghezza totale del tratto di diagrafia analizzato.

Sulla base di queste ultime grandezze, in particolare modo della $C\%$, si è quantificata l'influenza della cementazione sulle caratteristiche geotecniche dei terreni.

5.2.2.1 Cementazione $C\%$ e Scavabilità $S\%$

In considerazione dell'importanza che assume la presenza degli orizzonti cementati ai fini della caratterizzazione dei terreni, in Allegato (Figure 1-6) sono presentati i diagrammi di frequenza dei valori di E_s che percentualmente superano il limite di cementazione dato dalla (1), suddividendo ciascuna diagrafia in tratte di 0.5m-2m-4m-8m-lunghezza totale diagrafia.

In questo modo si è evidenziata la percentuale della cementazione per intervalli di profondità via via maggiori; inoltre è stato possibile accertare la persistenza e la geometria dei livelli

cementati, in modo da ricostruire l'andamento lungo il tracciato dei livelli di terreno con caratteristiche simili.

Dai grafici risulta che la maggior incidenza della cementazione si è verificata negli intervalli di profondità compresi tra 5m e 10m circa e tra 14m e 17m circa, per le diagrafie posizionate tra inizio lotto e Stazione Racconigi inclusa. Per le diagrafie tra Stazione Racconigi e fine lotto non appaiono livelli cementati evidenti. Nel profilo sono stati illustrati i diagrammi di incidenza della cementazione a livello della galleria considerando nell'elaborazione dei dati di E_s , la profondità suddivisa in intervalli di 2m (intervallo considerato significativo).

Analogamente a quanto è stato fatto per la cementazione, in Allegato (Figure 7-12) sono presentati i diagrammi di frequenza percentuale dei valori di E_s che superano il limite di scavabilità con benna dato dalla (2) per ogni singola diagrafia, suddivisa in intervalli di 0.5m-2m-4m-8m-lunghezza totale diagrafia. Nella tratta compresa tra inizio lotto e la Stazione Racconigi i valori di E_s risultano mediamente superiori ai limiti di scavabilità. In profilo sono stati riportati i diagrammi di andamento del limite di scavabilità lungo ciascuna diagrafia suddivisa in intervalli di profondità pari a 0.5m, conformemente a quanto indicato dalla (2).

Tabella 5.1 – Correlazione tra E_s e livelli di cementazione

<i>Cementazione</i> (%)	E_s (MJ/m ³)	<i>Livello cementazione</i>
0-25	70-140	assente-tracce
25-50	140-210	tracce-diffusa
50-75	210-280	diffusa-elevata

Facendo riferimento ai livelli di cementazione elencati nella tabella 5.1, il lotto 4 risulta caratterizzato, per un primo tratto di 1600m circa, da un livello di cementazione mediamente compreso in un intervallo di E_s variabile tra 140 e 210 MJ/m³; tali valori tendono a decrescere nella seconda parte del tracciato, a partire dalla progressiva 5600m circa e fino alla fine del lotto e ricadono, come livello di cementazione, nel campo indicato con la dicitura “assente-in tracce” (Figure 14-21: analisi statistiche con andamenti massimo, minimo e medio di E_s rispetto alla profondità e valori medi calcolati).

In tali analisi non sono stati considerati i risultati della diagrafia D8 che, visti i valori maggiori di E_s , sono stati rappresentati separatamente (Figura 13).

5.2.3 Pozzi geognostici praticabili

Lo scopo della realizzazione dei pozzi è stato quello di effettuare un rilievo litostratigrafico con verifica diretta del grado di cementazione dei terreni associato al prelievo di macrocampioni, sia rimaneggiati che indisturbati, del materiale cementato, su cui sono state successivamente condotte prove di laboratorio.

Lungo il tracciato del lotto 4 è stato realizzato il pozzo geognostico P2, spinto ad una profondità di 20m circa.

Nell'Allegato (Foto 1-3) sono visibili alcuni esempi del materiale incontrato nel pozzo P2.

Sul rivestimento del pozzo sono state aperte delle finestre d'ispezione di circa 40x40cm, ripetute ad intervalli di profondità di circa 4m, in cui è stato possibile osservare direttamente il materiale in posto.

In tale pozzo è stato possibile avere un riscontro diretto della dimensione dei ciottoli, altrimenti solo stimabile dall'esame delle carote estratte durante i sondaggi; si è osservato che il blocco di maggiori dimensioni risulta avere forma a bastone, con asse lungo di 50cm.

Nel pozzo P2 è stata eseguita una prova di carico su piastra in direzione verticale alla profondità di 19.5m, per determinare, in via diretta, i parametri di deformabilità, individuando nel contempo la risposta deformativa di un volume sufficientemente rappresentativo di terreno, nelle condizioni di carico previste per le opere di sostegno degli scavi.

5.2.4 Prove penetrometriche dinamiche

Le analisi statistiche eseguite sui valori di Nspt rilevati dal lotto 1 sino al lotto in esame, sono sintetizzate nella Figura 22 (Allegato). Da essa si ricava che la maggior parte delle prove sono andate a rifiuto, ciò sia per la presenza di ciottoli sia per il grado di cementazione. Nella Tabella 5.2 sono riportati i valori medi, minimi e massimi di Nspt, non considerando i valori a rifiuto.

Tabella 5.2 – Valori medi, minimi e massimi di Nspt per ciascuna tratta omogenea individuata

TRATTA	Nspt (medio)	Nspt (min-max)
Lotto 1 – progr.5+670	60	29-86
progr.5+670 – fine lotto 4	49	37-68

Il lotto in esame ricade, quindi, sino alla progressiva 5+670 circa nella prima tratta, e da progressiva 5+670 a fine lotto nella seconda tratta.

5.2.5 Prove di carico su piastra

Per verificare l'omogeneità dei terreni e validare i risultati ottenuti dall'elaborazione dei dati registrati lungo il lotto in esame, sono state considerate le misure delle prove di carico su piastra eseguite lungo l'intero tracciato della metropolitana.

Ad integrazione delle prove di carico su piastra di grande diametro (500mm) eseguite per la fase definitiva della progettazione durante lo scavo del pozzo P5, sono state eseguite nel corso della nuova campagna di indagini, altre prove a diversa profondità nei pozzi P1, P2, P7.

I moduli di deformabilità secanti E_{sec} , calcolati nei vari cicli di carico, sono riportati nelle Tabelle 1-5 (Allegato); si osserva che il modulo aumenta in ogni ciclo in conseguenza della ricompattazione del terreno, e che il materiale ha un diverso comportamento tra carico e scarico, essendo i valori di scarico fino ad un ordine di grandezza superiore a quelli di carico.

Analogamente alla metodologia di analisi adottata per l'interpretazione delle prove nella fase definitiva, i moduli E_{sec} , ritenuti caratteristici del terreno e quindi significativi per la progettazione, sono quelli calcolati nel secondo ciclo. Sono stati tralasciati, invece, quelli ottenuti dal primo ciclo, perché influenzati dal disturbo arrecato dallo scavo del pozzo e dalle operazioni di preparazione delle superfici di prova.

I valori di E_{sec2} sono riportati in Tabella 5.3, mentre il loro andamento con il variare della profondità e della cementazione è riportato nella Figura 5.1.

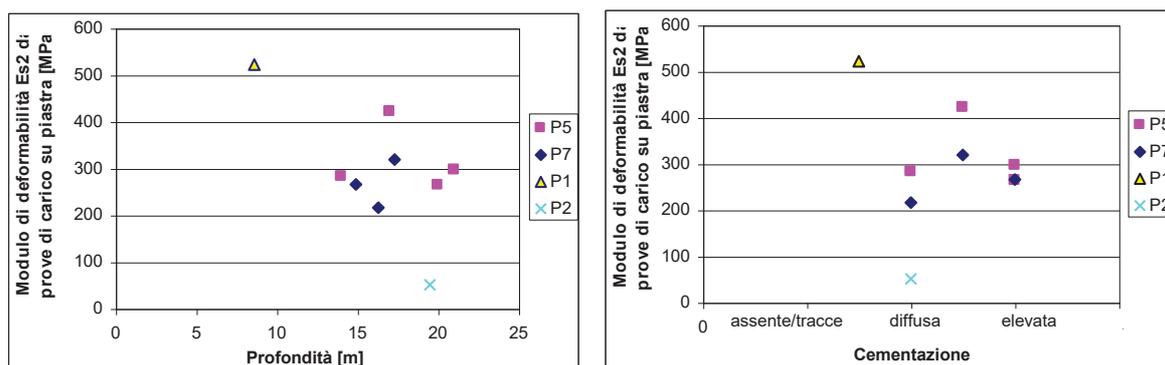
Tabella 5.3– Valori del modulo di deformabilità secante da prove di carico su piastra, calcolati dalla seconda fase di carico e di scarico.

Pozzo		2° carico	2° scarico	Modalità di prova
	Profondità	E_{sec2c}	E_{sec2s}	
	(m)	(MPa)	(Mpa)	
P1	8.60	522.0	1420.0	Orizzontale
P2	19.50	51.0	280.0	Verticale
P5	14.00	283.0	530.0	Orizzontale
	17.00	422.0	792.0	Orizzontale
	20.00	264.0	1021.0	Orizzontale
	21.00	297.0	-	Verticale
P7	14.90	266.0	487.0	Verticale
	16.30	216.0	592.0	Orizzontale
	17.30	319.0	2151.0	Verticale

E_{sec2c} : modulo di deformabilità secante calcolato dalla seconda fase di carico

E_{sec2s} : modulo di deformabilità secante calcolato dalla seconda fase di scarico

Figura 5.1 - Andamento dei moduli di deformabilità secante da prove di carico su piastra al variare della profondità e della cementazione



I moduli di deformabilità risultanti non sembrano dipendere né dalla profondità, né dalla direzione di esecuzione della prova.

Si può osservare, inoltre, che l'effetto della maggiore densità si somma, talora, a quello del grado di cementazione. Difatti la prova eseguita nel pozzo P1 ha fornito un modulo più elevato del valore medio, anche se il corrispondente grado di cementazione è definibile tra

assente ed in tracce. Ciò è spiegabile dal fatto che il livello del terreno interessato dalla prova presentava un elevato grado di addensamento.

5.2.6 Prove di laboratorio

5.2.6.1 Analisi granulometriche

I dati riportati in Tabella 6 (Allegato) documentano tutte le analisi eseguite lungo l'intero tracciato. La valenza di tali risultati è comunque effettiva per il lotto in oggetto data l'omogeneità, a grande scala, dei terreni incontrati.

In particolare si è osservato che:

- nell'insieme (trascorrendo il terreno di riporto) il terreno risulta caratterizzato dalla presenza di tutte le frazioni granulometriche, con la prevalenza di quelle grossolane. Secondo la classificazione USCS i terreni ricadono nelle classi G (ghiaia) ed S (sabbie), mentre secondo la classificazione AASHTO M 145-49 le classi più rappresentate sono A1 e A2-4;
- mediamente non vi sono variazioni rilevanti nelle percentuali granulometriche lungo il tracciato. Un modesto incremento della frazione più fine si registra con l'aumentare della profondità;
- l'indice di plasticità della frazione fine è minore di 11.2 (materiale da non plastico a poco plastico); tale valore, insieme alle percentuali massime di WL e WP, è relativo a campioni prelevati in prossimità della superficie (terreno rimaneggiato) ed è quindi da considerare significativo solo della porzione di terreno più superficiale.

In Tabella 5.4 sono riassunti i valori ricavati dalle analisi granulometriche eseguite su campioni prelevati, esclusivamente nei sondaggi, lungo l'intero tracciato mentre nella Tabella 5.5 sono relativi alle analisi eseguite su macrocampioni prelevati nei pozzi P1, P2, P5 e P7.

Tabella 5.4 – Sintesi caratteristiche fisiche dei terreni derivanti da campioni prelevati nei sondaggi

Caratteristiche	Min.	Max.
Ciottoli [%]	0.0	36.5
Ghiaia [%]	1.0	67.9
Sabbia [%]	10.8	62.9
Fine [%]	4.1	70.0
WL	8.9	32.5
WP	11.8	22.5
IP	0.0	11.2

Tabella 5.5 – Sintesi caratteristiche fisiche dei terreni derivanti da campioni prelevati nei pozzi.

Caratteristiche	Min.	Max.
Ciottoli [%]	0.00	25.6
Ghiaia [%]	43.5	75.8

Sabbia [%]	14.6	32.6
Fine [%]	2.4	4.6

5.2.6.2 Prove di resistenza meccanica

Dallo scavo del pozzo P2 sono stati estratti blocchi di materiale cementato, da cui sono stati ricavati campioni per prove di compressione uniassiale.

I risultati delle 4 prove di compressione monoassiale su campioni ricavati dal pozzo P2 rilevano che il terreno cementato è dotato di un valore massimo di C_o pari a 12.5MPa. I valori medi di resistenza e deformabilità calcolati sui campioni provenienti da tutti i pozzi lungo il tracciato, sono riportati in Tabella 5.6.

La Tabella 6 (Allegato) riporta i risultati a sintesi di tutte le prove eseguite.

Tabella 5.6 – Valori statistici dei risultati delle prove di compressione monoassiale

Grandezze	Media	Dev. St.	Min.	Max.
C_o [MPa]	5.6	4.7	2.0	12.5
E_{tan} [GPa]	1.0	0.8	0.4	2.2
E_{sec} [GPa]	0.5	0.4	0.2	1.0

5.3 Individuazione e descrizione delle unità geotecniche

Sulla base delle indagini descritte e delle elaborazioni eseguite in questa fase ed in quelle precedenti della progettazione, sono state riconosciute quattro unità geotecniche tipo in corrispondenza del lotto 4; le unità vengono descritte e caratterizzate nel seguito.

5.3.1 Unità 1: terreno superficiale

Rappresenta l'orizzonte superiore del profilo stratigrafico e si presenta con potenza variabile da un minimo di 2m ad un massimo di 4m. Questa unità è stata ritrovata in tutte le verticali di indagine. Granulometricamente risulta composta da limi sabbioso-argillosi, limi, e limi argillosi, sabbie con ghiaie, inglobanti materiali derivanti da demolizioni quali frammenti di laterizi, calcestruzzo.

I campioni rimaneggiati prelevati in corrispondenza di tale unità presentano le seguenti caratteristiche fisiche:

Caratteristiche	Min.	Max.	Media
Ciottoli [%]	0.0	18.6	6.2
Ghiaia [%]	5.6	60.6	44.2
Sabbia [%]	20.8	42.7	30.2
Fine [%]	4.4	70.0	19.1
WL	23.8	32.5	29.8
WP	18.3	22.5	20.8
IP	5.4	11.2	9.0

Secondo la classificazione AASHO M 145-49 il materiale è compreso nell'intervallo di classi A1 fino A6 (gruppi da G, ghiaia, a C, argille inorganiche, secondo la classificazione USCS), a testimonianza della sua elevata eterogeneità.

5.3.2 Unità 2: ghiaie con sabbie da sciolte a debolmente cementate

Questo livello è caratterizzato da una distribuzione spaziale discontinua sia in senso orizzontale che verticale. Granulometricamente descritta da ghiaie e sabbie non cementate o debolmente cementate con presenza di ciottoli di dimensione pluridecimetrica, questa unità si ritrova nel tratto iniziale immediatamente al di sotto dell'unità 3, mentre nel tratto successivo, appena oltrepassata la stazione Racconigi e fino alla fine del lotto, si incontra al di sotto dell'unità 1.

Nei sondaggi l'unità è stata descritta in base alla presenza sui singoli clasti, di tracce di materiale fine cementato; a questa corrisponde, in base ai risultati delle diagrafie, un valore di E_s compreso tra 70 e 140MJ/m³ ed una percentuale di cementazione compresa nell'intervallo 0-25%. Questo livello ha spessori massimi rilevati nell'estesa del lotto di 25m circa.

I campioni rimaneggiati prelevati in corrispondenza di tale unità indicano le seguenti caratteristiche fisiche:

Caratteristiche	Min.	Max.	Media
Ciottoli [%]	0.0	15.6	3.4
Ghiaia [%]	29.1	61.3	46.1
Sabbia [%]	27.3	58.3	37.4
Fine [%]	6.4	27.3	13.2
WL	12.9	29.0	19.3
WP	13.5	19.9	16.3
IP	0.2	9.1	3.2

5.3.3 Unità 3: ghiaie con sabbie con cementazione da debole a media

Questa unità è presente nella parte iniziale del lotto, inferiormente all'unità 1 e con spessore massimo determinato di 25m circa.

L'unità è stata definita in base alla presenza di una patina carbonatica diffusa sui clasti rilevata nei sondaggi mentre nelle diagrafie viene segnalata da valori di E_s compresi nell'intervallo 140-210MJ/m³ (cementazione in tracce-diffusa), cui corrisponde una percentuale di cementazione $C_{\%}$ tra 25 e 50%.

Granulometricamente sono presenti ghiaie e sabbie con livelli più francamente limoso sabbiosi. I campioni rimaneggiati prelevati in corrispondenza di tale unità indicano le seguenti caratteristiche fisiche:

Caratteristiche	Min.	Max.	Media
Ciottoli [%]	0.0	12.8	7.6
Ghiaia [%]	22.9	75.8	41.6
Sabbia [%]	24.4	49.5	37.4
Fine [%]	2.4	31.3	20.0
WL	8.9	21.7	17.6
WP	-	-	11.8
IP	-	-	6.9

5.3.4 Unità 4: ghiaie con sabbie con cementazione da media ad elevata

Questa unità è stata individuata esclusivamente in una probabile lente all'interno dell'unità 3, in prossimità della stazione Monte Grappa; il materiale è caratterizzato da valori di E_s

generalmente compresi tra 210 e 280MJ/m³, con punte superiori. A questi valori di E_s corrisponde, secondo quanto esposto precedentemente, una percentuale di cementazione C% compresa generalmente tra 50 e 75% (cementazione da diffusa ad elevata) con locali superamenti di tale soglia.

I campioni rimaneggiati prelevati in corrispondenza a tale unità indicano le seguenti caratteristiche fisiche:

Caratteristiche	Min.	Max.	Media
Ciottoli [%]	0.0	36.5	4.9
Ghiaia [%]	1.0	68.6	44.9
Sabbia [%]	10.8	62.9	33.1
Fine [%]	3.2	60.0	17.2
WL	14.9	26.7	19.3
WP	13.6	20.1	16.5
IP	0.0	7.4	3.0

6. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Le caratteristiche principali dei terreni incontrati lungo il tracciato della Metropolitana sono, come evidenziato in precedenza, il grado e la distribuzione della cementazione; la variazione del grado di cementazione determina differenze nel comportamento geotecnico dei materiali stessi nonché nella loro scavabilità.

Per la caratterizzazione geotecnica dei materiali (cfr. Relazione Geotecnica del progetto definitivo MTL1T1A0DGE0GENR002) è stata adottata, in sintesi, la seguente metodologia,:

- elaborazione dei risultati delle indagini a disposizione per il riconoscimento, in termini generali, delle unità geotecniche lungo il tracciato;
- interpretazione dei parametri di perforazione a distruzione (in particolare dell'energia specifica), in termini di percentuale di cementazione che caratterizza ciascuna unità individuata. Tale interpretazione si basa su valori soglia dell'energia specifica, definiti da esperienze precedenti sui terreni di Torino (Passante Ferroviario-2° lotto) e verificati dalla taratura ottenuta con il confronto tra le diagrafie di E_s e la stratigrafia dei pozzi praticabili;
- modellazione parametrica ad elementi finiti di prove di compressione monoassiale su campioni di materiale, variando opportunamente il grado globale di cementazione del campione tra 0% e 100%; a taratura del modello sono stati considerati i risultati delle prove eseguite in laboratorio e in sito;
- regressione dei risultati della modellazione ad elementi finiti per ricavare l'involuppo di rottura proprio dei terreni di Torino, secondo quanto suggerito dalla letteratura (*Papantonopoulos & D.K. Atmatzidis, 1993*) e per determinare i parametri di deformabilità, variabili in funzione della percentuale di cementazione. Gli involuppi di rottura individuati sono stati approssimanti a un criterio lineare in corrispondenza di due livelli tensionali rappresentativi;
- a verifica dell'attendibilità dei parametri geotecnici assegnati alle varie unità, è stata condotta una back-analysis mediante modellazione ad elementi finiti di una sezione trasversale all'asse delle gallerie della Cittadella.

L'elaborazione dei risultati di tutte le indagini a disposizione per il lotto in esame conferma l'individuazione delle 4 unità geotecniche i cui parametri caratteristici di resistenza e di deformabilità sono riassunti in Tabella 6.1.

Tabella 6.1 – Parametri di resistenza e deformabilità per le unità geotecniche

Unità e descrizione	C _% (%)	Dr (%)	γ (kN/m ³)	E (MPa)	ν (-)	φ' (°)	C' (kPa)	σ _n ' (MPa)
Unità 1: terreno superficiale (riporto e/o limo sabbioso argilloso)		50-60	17-19	10-20	0.35	30-35	0	
Unità 2: ghiaie e sabbie da sciolte a debolmente cementate	0-25	50-70	18-21	150-170	0.30	36-37 35-37	0-10 0-15	0.15 0.30
Unità 3: ghiaie e sabbie con cementazione da debole a media	25-50	60-80	19-22	170-200	0.30	36-40 35-37	10-25 15-40	0.15 0.30
Unità 4: ghiaie e sabbie con cementazione da media ad elevata	50-75	60-80	19-22	200-260	0.30	40-47 35-44	25-90 40-120	0.15 0.30

dove:

C_% : cementazione percentuale

Dr : densità relativa

γ : peso di volume unitario

E : modulo di deformabilità

ν : coefficiente di Poisson

φ' : angolo di attrito

c' : coesione apparente

σ_n' : tensione normale sul piano di rottura

Per il coefficiente di spinta a riposo K₀ è stata considerata l'espressione seguente, valida per terreni normal-consolidati (*Jacky, 1944*):

$$K_0 \approx 1 - \sin \phi'$$

Per quanto attiene ai parametri di resistenza delle unità geotecniche sono riportati i valori istantanei, in funzione di valori delle tensioni σ_n' significativi, dei parametri di resistenza c' e φ', nonché del modulo di deformabilità E, valutato indipendentemente dallo stato tensionale.

Ipotizzando, a scopo esemplificativo, per lo scavo della linea una profondità media dell'ordine dei 15 m, un peso di volume di γ = 20 kN/m³ ed un coefficiente di spinta a riposo compreso tra 0.4 e 0.5, le tensioni naturali assumono valori pari a circa 0.30 e 0.15 MPa, rispettivamente, per la tensione verticale σ_v' e orizzontale σ_h'. Assumendo, dunque, per la tensione normale σ_n' un campo di variazione medio tra i limiti ipotizzati 0.15 e 0.30 MPa, nella Tabella 6.1 sono riportati i parametri di resistenza in termini di coesione c' e angolo di attrito φ', nonché di modulo di deformabilità E, per le unità geotecniche riconosciute lungo il tracciato del lotto 4, ricordando che l'unità geotecnica 1 è costituita da terreno di riporto al quale si attribuiscono parametri di resistenza e deformabilità minimi, stimati mediante i valori N_{SPT} delle prove penetrometriche SPT.

7. MODELLO GEOLOGICO-GEOTECNICO

7.1 Zonazione geotecnica

La definizione delle unità geotecniche e la loro caratterizzazione, in termini di caratteristiche fisiche e parametri di deformabilità e resistenza, ha condotto alla discretizzazione del tracciato lungo il lotto 4.

Inizialmente, nel tratto compreso tra la progr.4+071 e la progr.4+900, il tracciato si sviluppa attraverso l'unità 3 appena sopra il probabile contatto tra questa e l'unità 2, caratterizzata da una minore cementazione. L'unità 3 è costituita da ghiaie e sabbie con cementazione da debole a media, il materiale osservato durante l'esecuzione delle indagini risulta prevalentemente costituito da ghiaie e sabbie con una percentuale di fine compresa tra 8 e 22% circa; si sono inoltre rilevati ciottoli con diametro maggiore di 10cm come messo in evidenza nel profilo geotecnico. In questo tratto, che comprende la stazione Monte Grappa ed i pozzi di ventilazione 5 e 6, la galleria si sviluppa ad una quota compresa tra 249m e 243m circa slm, mentre il piano campagna varia da quota 266m a una quota di 260m.

Dalla progr. 4+900 sino alla progr. 5+375 circa l'opera si dispone attraverso l'unità 3 (superiormente) e 2. In corrispondenza di tale segmento verrà realizzata la stazione Rivoli ed il pozzo di ventilazione n.7.

Quindi dalla progr. 5+375 alla progr. 5+675 la galleria e la stazione Racconigi si svilupperanno attraverso l'unità 3.

Nell'ultima parte del tracciato, dalla progr. 5+675 alla progr. 6+717 (fine lotto), il tracciato si sviluppa esclusivamente attraverso l'unità 2, con una quota di progetto compresa tra 238m e 232m slm ed una quota terreno variabile da 255m a 249m circa slm; in questo segmento sono comprese le stazioni Bernini e Principi d'Acaja ed i pozzi di ventilazione 8 e 9.

Relativamente alla scavabilità dell'unità 3 si osserva che la percentuale di energia specifica maggiore del limite di scavabilità risulta statisticamente significativa (vedi documentazione allegata), mentre per quanto attiene l'unità 2 le percentuali di cementazione si attestano in un campo di variazione compreso tra 0 e 25%.

La falda superficiale si ritrova ad una quota variabile compresa tra 233m di inizio lotto e 226m di fine lotto; questi valori corrispondono ad una profondità della falda superficiale variabile dai 32m (Stazione Pozzo Strada) a 23m (Stazione Principi d'Acaja) dal piano campagna (situazione relativa al periodo febbraio-marzo 2000). La direzione di deflusso sotterraneo, come evidenziato dalla carta delle isopiezometriche relativa alla campagna di misure febbraio-marzo 2000, è orientata da ovest a est (N100E) e mostra un gradiente variabile tra 0.25% e 0.5%. Data la profondità dell'opera e la quota della falda superficiale, non si evidenziano problemi di interferenza tra lo scavo dell'opera e il deflusso sotterraneo dell'acqua di falda per tutto lo sviluppo del lotto. La quota di progetto si mantiene generalmente al di sopra della quota della falda piezometrica rilevata, relativa ai periodi febbraio-marzo 2000 e giugno 1995; limitatamente alle stazioni Racconigi, Bernini e Principi d'Acaja si evidenzia una interferenza tra la falda superficiale e la profondità massima di infissione delle paratie.

E' stata osservata (scavo del pozzo geognostico praticabile P2 in C.so Monte Grappa) la possibile formazione di falde idriche sospese a limitata potenzialità, direttamente ricaricate dalle acque di infiltrazione meteorica. La presenza di livelli limosi discontinui e di potenza

non cartografabile, ubicati a profondità variabile nella zona non satura ed il meccanismo di ricarica favoriscono l'accumulo di esigue quantità d'acqua che in ogni caso non essendo ricaricate in maniera costante si esauriscono in breve tempo.

7.2 Affidabilità del modello

Per la stima del grado di affidabilità delle indagini, esteso di conseguenza indirettamente al modello geotecnico precedentemente descritto, si è fatto ricorso ai criteri dettati dalla Fuzzy Logic.

Il concetto di Fuzzy Logic si basa sull'assunto che due condizioni opposte (vero o falso), possono essere verificate entrambe nello stesso momento, in differente misura, in relazione ad una transizione graduale da una classe di appartenenza all'altra. Il metodo della Fuzzy Logic permette di affrontare il grado di incertezza come un'estensione del concetto di intervallo di confidenza: invece di considerare l'intervallo di confidenza ad unico livello, lo si considera a tutti i livelli compresi tra 0 e 1, laddove 0 è la non appartenenza ad una classe ed 1 rappresenta il 100% dell'appartenenza.

Nella valutazione dell'affidabilità dei dati relativi al caso in esame, gli intervalli di confidenza sono rappresentati dai gradi di cementazione, e i dati esaminati e discretizzati secondo i criteri delle "Fuzzy arithmetic" sono l'energia specifica, Es, il numero di colpi N_{spt}, e la descrizione stratigrafica.

Il valore del grado di affidabilità delle singole verticali di indagine è espresso da definizioni qualitative che sono riportate, per ogni punto di indagine, in allegato, e che sono riassunti nelle tavole "Planimetria e Profilo Geotecnico".

8. PROBLEMATICHE DI SCAVO LEGATE ALLA NATURA DEL TERRENO

Nel lotto 4 è prevista la realizzazione di un tratto di galleria naturale di 2.5km circa, di 5 stazioni, di 5 pozzi intertratta e di una serie di opere accessorie (spostamenti di sottoservizi).

In relazione alla tipologia di opera le problematiche di scavo possono essere differenti o comuni a galleria naturale e stazioni.

Nel seguito vengono analizzate le principali problematiche che ci si attende di dover fronteggiare in relazione alle due tipologie di opera previste: galleria e stazioni.

8.1 Ciottoli e trovanti

Sistematicamente, durante l'esecuzione di sondaggi, diagrafie e pozzi geognostici, (i dati sono riferiti all'intero tracciato e non solo al lotto 4) sono stati individuati ciottoli e trovanti in una percentuale massima pari al 36% del volume indagato.

In particolare su un campione prelevato nel pozzo P1, all'interno del lotto 3, le litologie percentualmente più rappresentate sono, nell'ordine, peridotiti, serpentiniti, gabbri ed anfiboliti (65-70%), gneiss, micascisti e granodioriti (15-20%), quarziti (10-15%); solo in minima parte i ciottoli risultano alterati ed il fenomeno è particolarmente evidente sui ciottoli di gneiss e sulle peridotiti e generalmente ha inizio a partire dai 15m circa di profondità.

I ciottoli di maggiori dimensioni (dimensioni massime incontrate), risultano essere costituiti dal gruppo gneiss, micascisti e granodioriti ($2.2dm^3$), seguiti dal gruppo delle Pietre Verdi ($1.6dm^3$) e dalle quarziti ($1.3dm^3$).

Sulla base dell'analisi di alcune sezioni sottili, i litotipi riconosciuti sono stati descritti come nel seguito illustrato:

Quarziti - quarzo in percentuale compresa tra 89-96%, feldspato potassico 2-9%, mica bianca 0-5% con valori di C_o (resistenza a compressione monoassiale) di 300MPa, T_o (resistenza a trazione) 9.7-12.8MPa, classe di abrasività (determinata con prova Cerchar) altamente abrasiva.

Serpentiniti - serpentino 70%, magnetite 30%; con valori di resistenza a compressione monoassiale nell'ordine di 240MPa, e resistenza a trazione compresa tra 14.5 e 18.7MPa.

Gneiss albitici - albite 60%, mica bianca 15%, quarzo 20%, valori di C_o (resistenza a compressione monoassiale) nell'ordine di 80MPa, classe di abrasività estremamente abrasiva.

I risultati completi delle analisi eseguite, in termini di sintesi delle caratteristiche di scavabilità, sono riportati nella Tabella 7 riportata in Allegato.

Nella Tabella 8.1 vengono indicate le variazioni percentuali delle classi granulometriche, riferite alle varie unità, ricavate in base alle analisi eseguite lungo tutto il tracciato. In corrispondenza dell'unità 2 non sono stati prelevati macrocampioni.

Per quanto riguarda i trovanti (volumi superiori a $0.5m^3$) questi risultano, percentualmente, meno rappresentati, e sono stati incontrati indipendentemente dalla profondità e dall'unità di appartenenza.

Tabella 8.1 –Variazione della composizione granulometrica nelle unità, ricavata dalle prove granulometriche eseguite lungo tutto il tracciato

	<i>Diametro</i>	<i>Unità 1</i>		<i>Unità 2</i>		<i>Unità 3</i>	
	Mm	%min	%max	%min	%max	%min	%max
Ciottoli	>75mm	0.0	18.6	0.0	15.6	0.0	12.8
Ghiaia	4.75-75	5.6	60.6	29.1	61.3	22.9	75.8
Sabbia	0.075-4.75	20.8	42.6	27.3	58.3	24.4	49.5
Fini	<0.075	4.4	70.0	6.4	27.3	2.4	31.3

Relativamente all'unità 4, vista la sua presenza limitata non sono state riportate le percentuali di variazione nella composizione granulometrica.

Dall'analisi delle Figure 23, 24 e 25 (Allegato) si osserva la distribuzione granulometrica ottenuta da campioni prelevati nei sondaggi (Figura 23) e nei pozzi (Figura 24).

Nel primo caso (campioni da sondaggi) la frazione fine risulta ben rappresentata mentre la frazione granulometrica >75mm, in relazione al tipo di campionamento, non compare. Viceversa, nei macrocampioni prelevati nei pozzi e quindi rappresentativi della frazione granulometrica più grossolana, la presenza di ciottoli e blocchi arriva fino al 25.6% (con un valore di 36.5% ottenuto nella campagna di indagini per il Passante Ferroviario).

8.2 Cementazione e/o addensamento

Il lotto in esame si sviluppa prevalentemente attraverso le unità 3 e 2.

Per le due unità menzionate sono state riconosciute diverse percentuali di cementazione:

- unità 2, cementazione compresa tra 0 e 25%;
- unità 3, cementazione compresa tra 25 e 50%.

Il materiale che verrà interessato dalla realizzazione dell'opera si presenta dunque da sciolto a mediamente cementato. Localmente (in prossimità della stazione Monte Grappa) è stata individuata una lente di materiale maggiormente cementato (unità 4, C% compresa tra 50 e 75%).

Sono da prevedere livelli e lenti di potenza metrica di ghiaie molto addensate con ciottoli e blocchi.

8.3 Presenza di lenti di sabbia

Nel lotto in esame non sono stati incontrati livelli di sabbia e sabbia limosa fatta esclusione per l'unità 1; è comunque ipotizzabile una loro presenza in una percentuale del 20-25% circa sul volume di scavo, con punte localmente più elevate (vedi Tabelle 5.4 e 5.5).

8.4 Presenza di acqua

La falda superficiale si ritrova ad una quota variabile compresa tra 233m di inizio lotto e 226m di fine lotto. Data la profondità dell'opera e la quota della falda superficiale, non si evidenziano problemi di interferenza tra lo scavo dell'opera e il deflusso sotterraneo

dell'acqua di falda per tutto lo sviluppo del lotto. La quota di progetto si mantiene generalmente al di sopra della quota della falda piezometrica rilevata relativa ai periodi febbraio-marzo 2000 e giugno 1995; limitatamente alle stazioni Racconigi, Bernini e Principi d'Acaja si evidenzia una interferenza tra la falda superficiale e la profondità massima di infissione delle paratie.

E' stata osservata (scavo del pozzo geognostico praticabile P2 in C.so Monte Grappa) la possibile formazione di falde idriche sospese a limitata potenzialità, direttamente ricaricate dalle acque di infiltrazione meteorica. La presenza di livelli limosi discontinui e di potenza non cartografabile, ubicati a profondità variabile nella zona non satura ed il meccanismo di ricarica favoriscono l'accumulo di esigue quantità d'acqua che in ogni caso non essendo ricaricate in maniera costante si esauriscono in breve tempo.

8.5 Presenza di gas

Il terreno attraversato dallo scavo, allo stato naturale, non è sede di gas. Purtroppo, in relazione alla presenza di insediamenti industriali e depositi di carburante, è da tenere in conto la possibile presenza di sacche di gas, derivante da sversamenti accidentali e da inquinamenti industriali. In particolare, in un raggio di una ventina di metri circa dal tracciato del lotto 3, sono stati censiti, tra attivi e dismessi, una decina di impianti di distribuzione carburanti.

8.6 Zone inquinate (acqua e terreno)

Valgono le considerazioni espresse per il paragrafo relativo alla presenza di gas; quindi sono da prevedere attraversamenti di terreni inquinati in prossimità di impianti distribuzione carburanti, attivi e/o dismessi, e insediamenti industriali. Le interferenze previste con la falda superficiale sono limitate e si verificano, in corrispondenza delle stazioni Racconigi, Bernini e Principi d'Acaja alla profondità massima di infissione delle paratie; per tale ragione si considera che le caratteristiche della falda non verranno variate.

8.7 Zone disturbate, presenza di cavità

Allo stato naturale il terreno del lotto 4 risulta ben addensato e non sono state individuate cavità di alcun tipo. Possibili zone in cui le caratteristiche di addensamento sono state mutate sono da prevedere, essenzialmente in corrispondenza di:

- sottoservizi (quali principalmente condotte fognarie o acquedotti, serbatoi di impianti di distribuzione carburanti);
- canali storici;
- danni di guerra: zone colpite da bombardamenti.

8.8 Canali storici

Strettamente connessa alle zone disturbate ed alla presenza di cavità, è la interferenza fra il tracciato ed i canali storici che, con il passare degli anni, sono stati coperti da assi stradali, oppure deviati:

- Bealera di Collegno (Putea): da Collegno si immette su corso Francia all'altezza di via Chanoux, lo percorre fino a piazza Massaua, quindi si divide in due rami dando origine ai canali di corso Francia e corso Tassoni;
- Canale del corso Francia: da piazza Massaua percorre corso Francia fino a piazza Bernini;

– Canale del corso Tassoni: da piazza Massaua percorre corso Francia sino a piazza Bernini.
Per maggiori approfondimenti si veda la relazione MTL1T1A0DVARGENR001 “Ricerche storico-archivistiche – Relazione tecnica” e tavole allegate.

8.9 Danni di guerra

Il tracciato del lotto 4 si sviluppa in corrispondenza di zone che furono oggetto, durante la Seconda Guerra Mondiale, di intensi bombardamenti.

Sono quindi possibili interferenza con:

- zone in cui le caratteristiche del terreno risultano variate;
- zone in cui si hanno riempimenti con resti di demolizioni, delle cavità generatesi per l’esplosione degli ordigni.

E’ infine da segnalare la possibile eventuale presenza di ordigni bellici inesplosi; per questa eventualità è necessaria la bonifica bellica prima di procedere con ogni opera di scavo.

Per maggiori dettagli occorre fare riferimento alla relazione MTL1T1A0DVARGENR001 “Ricerche storico-archivistiche – Relazione tecnica” e tavole allegate.

8.10 Presenza di reperti archeologici

Sulla base delle indagini esperite, non sono risultati resti di rilevanza archeologica. E’ necessario tuttavia, come concordato con la Soprintendenza Archeologica del Piemonte, che l’esecuzione degli scavi superficiali a cielo aperto dello strato di riporto avvenga sotto il controllo di operatori archeologi. Nel caso di paratie in diaframmi, il controllo sarà preventivamente esteso allo scavo delle corree di guida dei diaframmi per uno spessore di indagine del terreno di riporto pari a circa 0.80cm. Nel caso in cui nel corso degli scavi delle corree si riscontrassero indizi o reperti di interesse archeologico, lo scavo sarà localmente esteso e approfondito in modo tale da consentire il completamento dell’indagine. Dopo l’esecuzione delle corree e delle paratie in diaframmi, è previsto lo scavo tra diaframmi fino al piano di posa del solettone di copertura. Anche tale scavo, che incide per una profondità media di 2.0m dal piano stradale, sarà realizzato sotto il controllo di operatori archeologi. Nel caso in cui nel corso delle operazioni di scavo si riscontrasse la presenza di reperti archeologici, lo scavo dovrà essere completato da una Ditta specializzata in scavi archeologici.

9. NORMATIVA

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, l'esecuzione e il collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione" e successive istruzioni;

Circolare ANAS, relativa al D.M. 11/3/1988;

Legge Quadro sui Lavori Pubblici n. 109 (Legge Merloni);

D.L. 25/11/1962 n. 1684, e successive modifiche ed integrazioni

10. BIBLIOGRAFIA

- BARLA G., MACCHI A., CAVALLERO G., PEDEMONTI S.: *“Il Nodo di Torino. Geologia e geotecnica: misure in corso d’opera”*. Ass.Geot.It. Atti XVIII Conv. Naz. Rimini 1993
- BARLA G., MACCHI A., MATTALIA C., RABAGLIATI U.: *“Mathematical modelling and performance monitoring for the Corso Vittorio Emanuele II underpass in Turin”*. FMGM 95 4th Int. Symp, Bergamo, 1995.
- BARLA G., VAI L.: *“Indagini geotecniche per la caratterizzazione del sottosuolo di Torino lungo il tracciato del Passante Ferroviario”*. XX Convegno Nazionale di Geotecnica, Parma 1999.
- BONSIGNORE G., BORTOLAMI G., ELTER G., MONTRASIO A., PETRUCCI F., RAGNI U., SACCHI R., STURANI C. E ZANELLA E.: *“Note illustrative della Carta Geologica d’Italia”* fogli 56 e 57 (TorinoVercelli). Servizio Geologico d’Italia, Roma, 1969.
- BORTOLAMI G., DE LUCA D., FILIPPINI G.: *“Le acque sotterranee della pianura di Torino. Aspetti e problemi”*. Provincia di Torino, Assessorato Ecologia, 1990.
- BOTTINO G., CIVITA M.: *“A computer semi-quantitative model for microzonation of hazard from interconnection of engineering-geological features and urban sub-service network”* 5th International IAEG Congress, Buenos Aires, 1986, pp. 1731-1740
- BOTTINO G., CIVITA M.: *“Engineering geological features and mapping of subsurface in the metropolitan area of Turin, North Italy”*. 5th International IAEG Congress, Buenos Aires, 1986, pp. 1741-1753
- FRANCERI E., BORTOLAMI G., RICCI B.: *“Lineamenti geoidrologici della provincia di Torino con riferimento allo stato idrogeochimico delle falde del sottosuolo dell’area ecologico torinese”*. Provincia di Torino – Assessorato Ecologia. Marzo 1980.

**ALLEGATO ALLA RELAZIONE GEOTECNICA
DOCUMENTAZIONE RELATIVA ALLE INDAGINI**

**ALLEGATO ALLA RELAZIONE GEOTECNICA
DOCUMENTAZIONE RELATIVA ALLE INDAGINI**

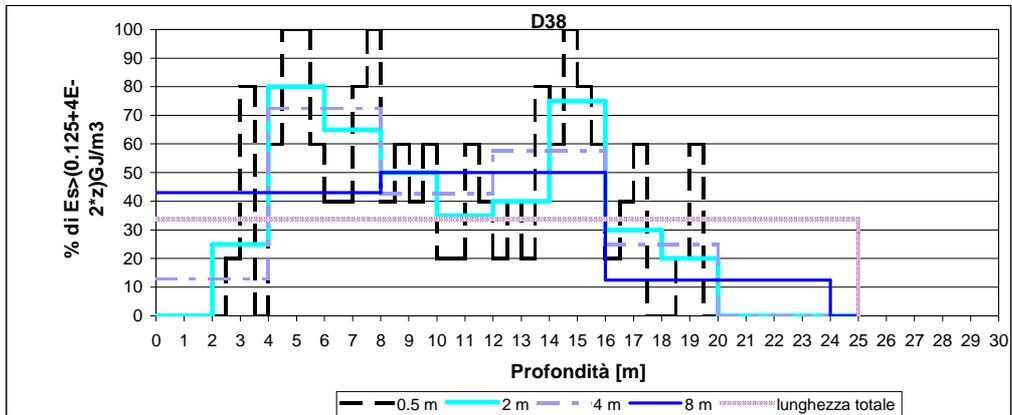


Figura 1 - Diagrafia D38, % di Es dei probabili livelli cementati con scansione: lungo tutto il sondaggio, ogni 8m, 4m, 2m, 0.5m

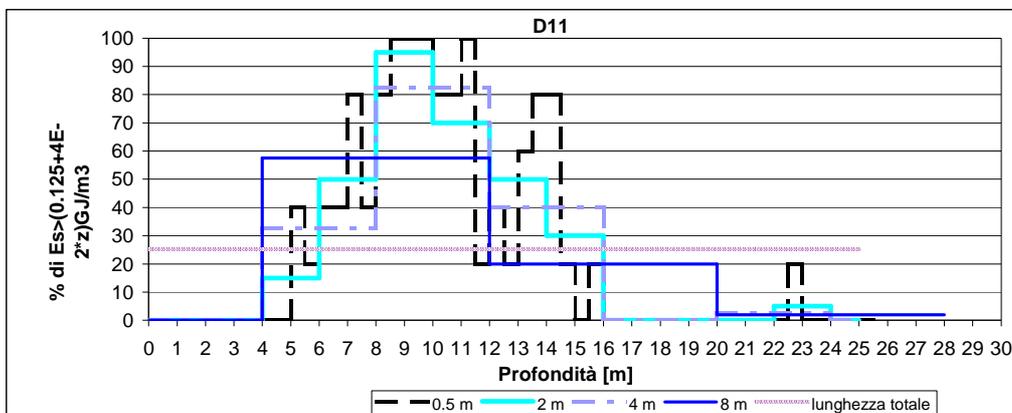


Figura 2 - Diagrafia D11, % di Es dei probabili livelli cementati con scansione: lungo tutto il sondaggio, ogni 8m, 4m, 2m, 0.5m

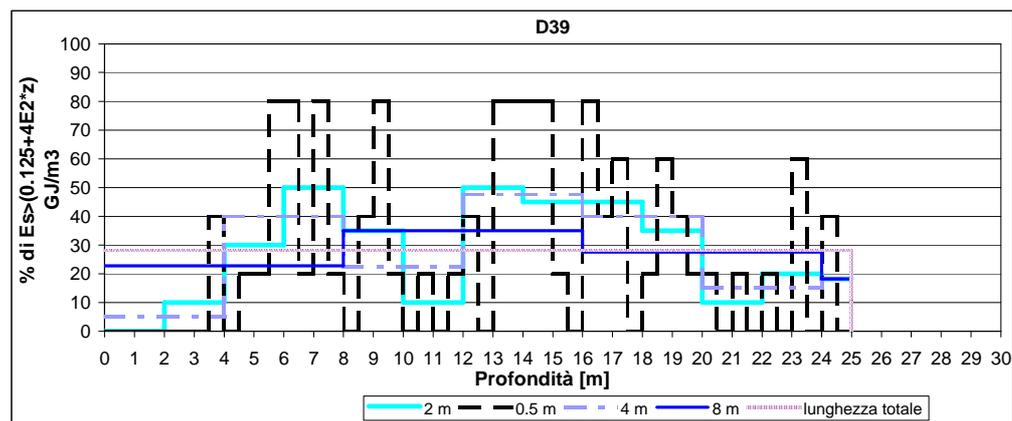


Figura 3- Diagrafia D39, % di Es dei probabili livelli cementati con scansione: lungo tutto il sondaggio, ogni 8m, 4m, 2m, 0.5m

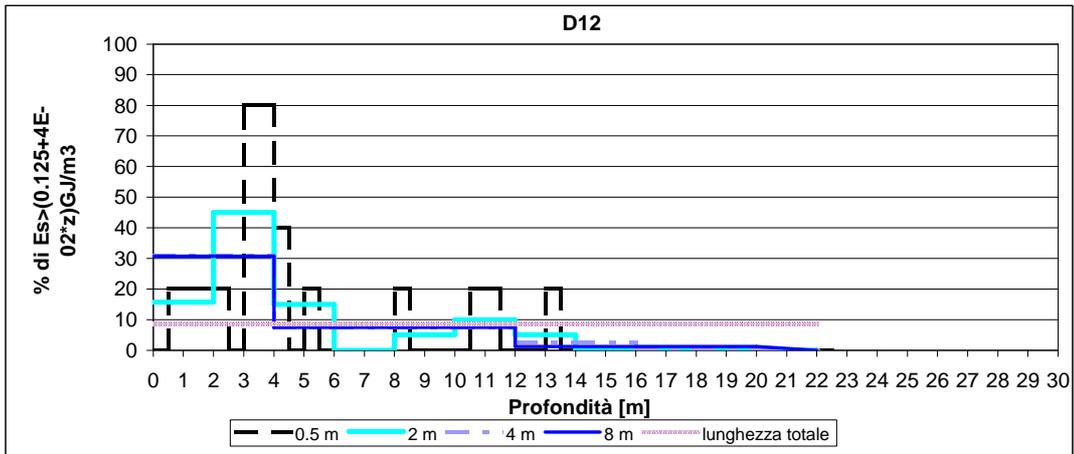


Figura 4- Diagrafia D12, % di Es dei probabili livelli cementati con scansione: lungo tutto il sondaggio, ogni 8m, 4m, 2m, 0.5m

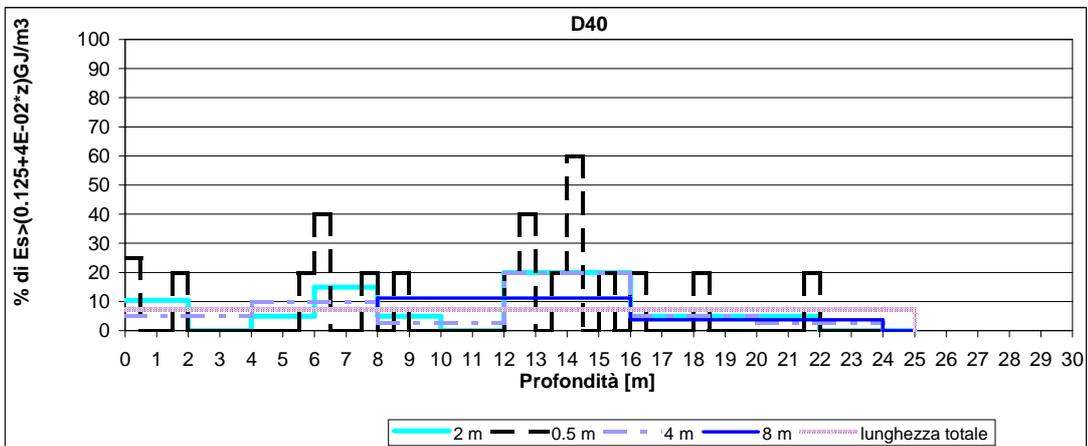


Figura 5- Diagrafia D40, % di Es dei probabili livelli cementati con scansione: lungo tutto il sondaggio, ogni 8m, 4m, 2m, 0.5m

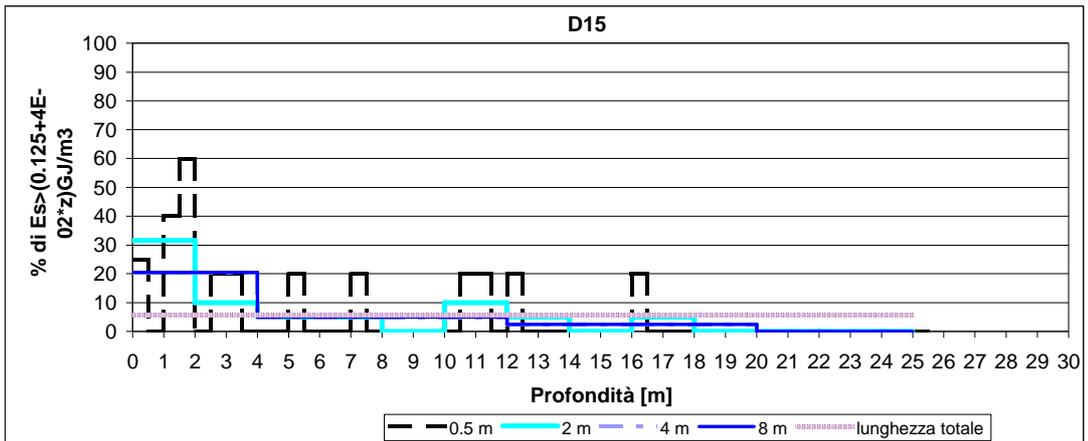


Figura 6 - Diagrafia D15, % di Es dei probabili livelli cementati con scansione: lungo tutto il sondaggio, ogni 8m, 4m, 2m, 0.5m

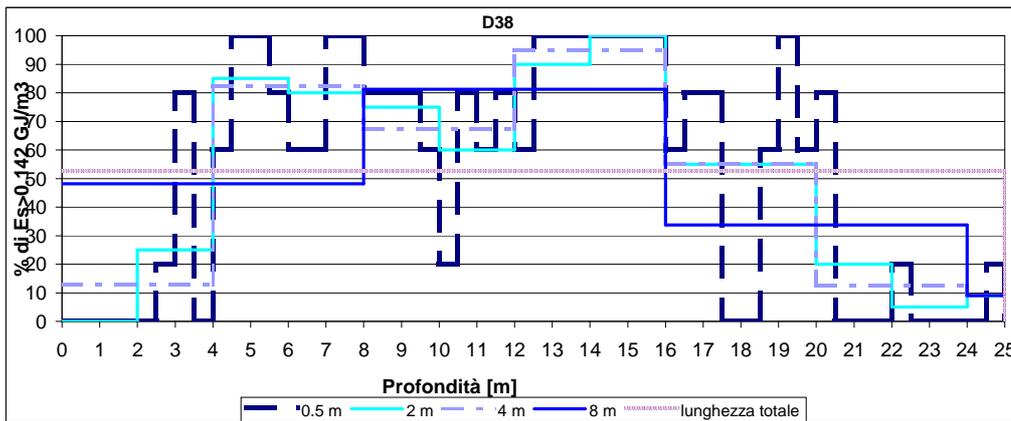


Figura 7 - Diagrafia D38, [%] di Es > 0,142 GJ/m3 con scansione: lungo tutto il sondaggio, ogni 8m, 4m, 2m, 0.5m

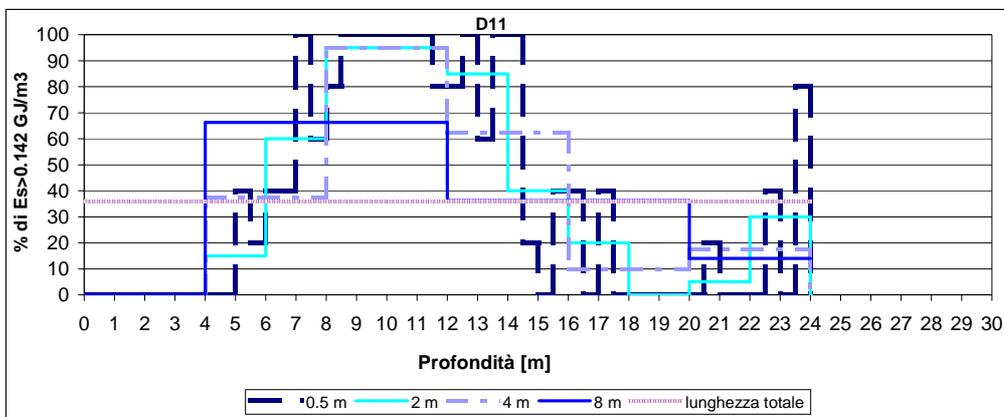


Figura 8 - Diagrafia D11, [%] di Es > 0,142 GJ/m3 con scansione: lungo tutto il sondaggio, ogni 8m, 4m, 2m, 0.5m

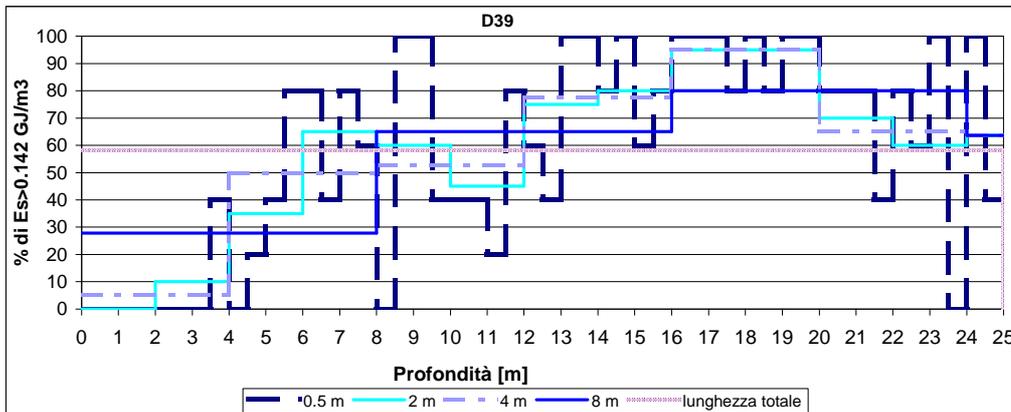


Figura 9 - Diagrafia D39, [%] di Es > 0,142 GJ/m3 con scansione: lungo tutto il sondaggio, ogni 8m, 4m, 2m, 0.5m

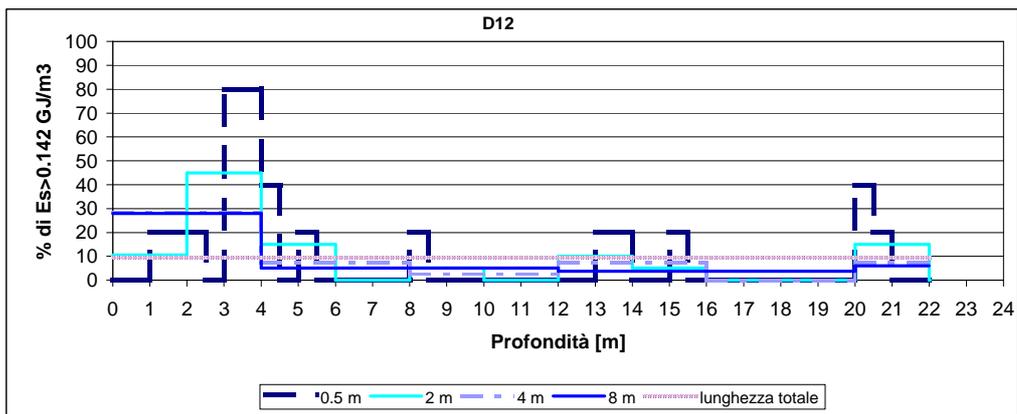


Figura 10 - Diagrafia D12, [%] di Es > 0,142 GJ/m³ con scansione: lungo tutto il sondaggio, ogni 8m, 4m, 2m, 0.5m

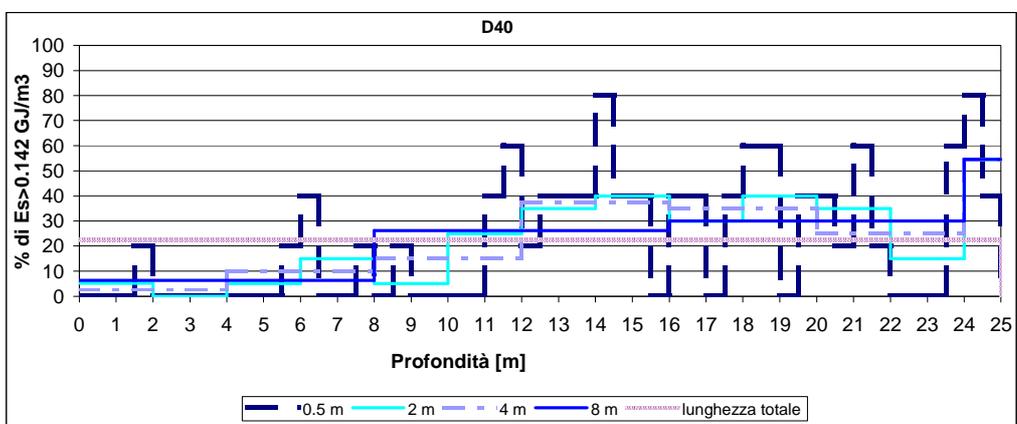


Figura 11 - Diagrafia D40, [%] di Es > 0,142 GJ/m³ con scansione: lungo tutto il sondaggio, ogni 8m, 4m, 2m, 0.5m

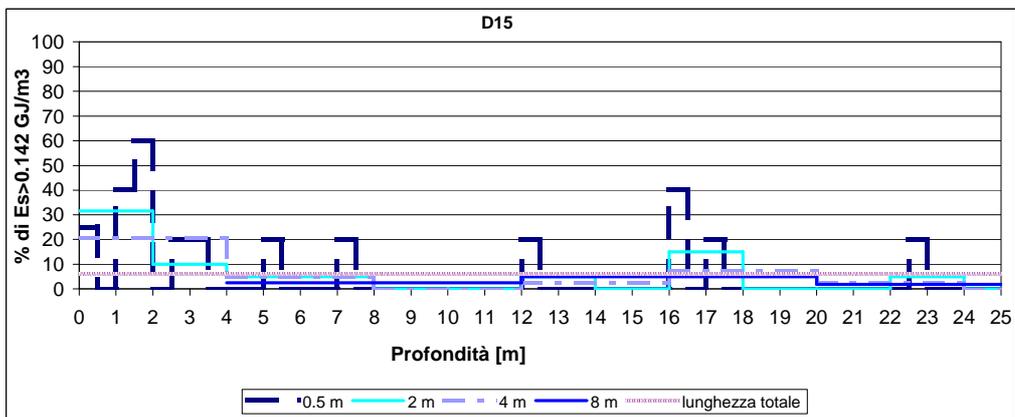


Figura 12 - Diagrafia D15, [%] di Es > 0,142 GJ/m³ con scansione: lungo tutto il sondaggio, ogni 8m, 4m, 2m, 0.5m

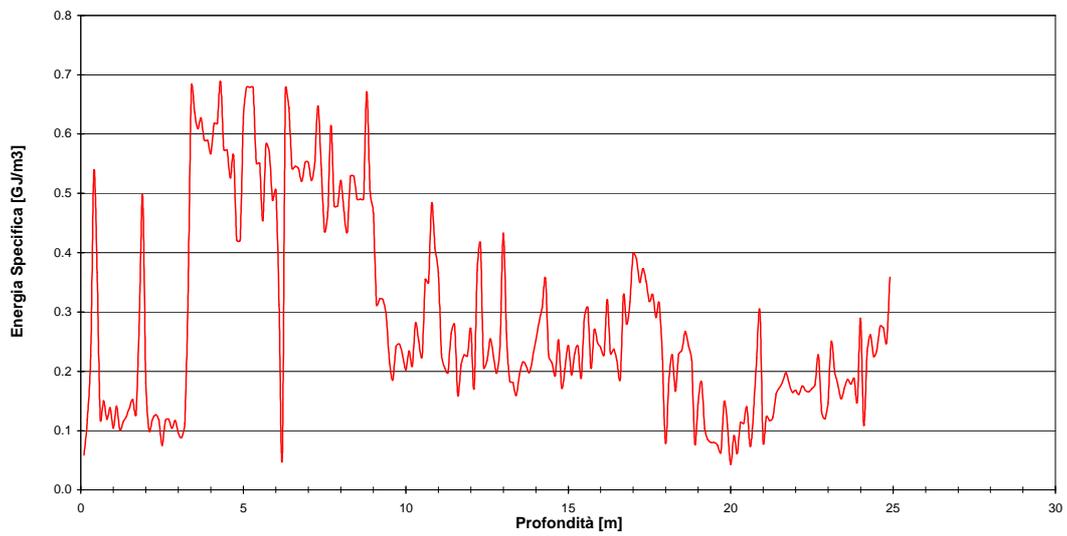


Figura 13 - Andamento dei valori dell'energia specifica della diagrafia D8

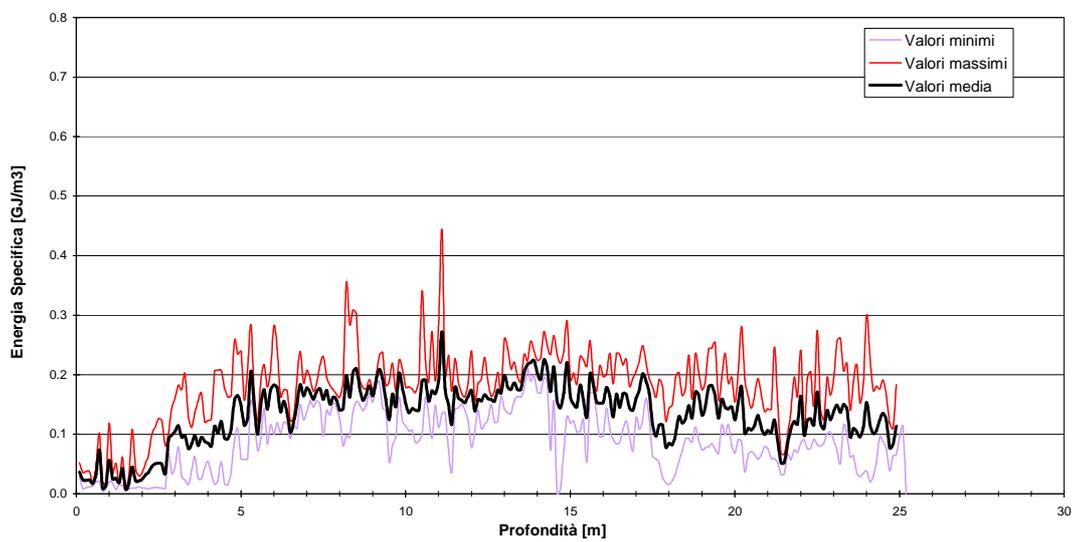


Figura 14 - Andamento dei valori minimi, medi e massimi dell'energia specifica delle diagrafie D38, D11, D39

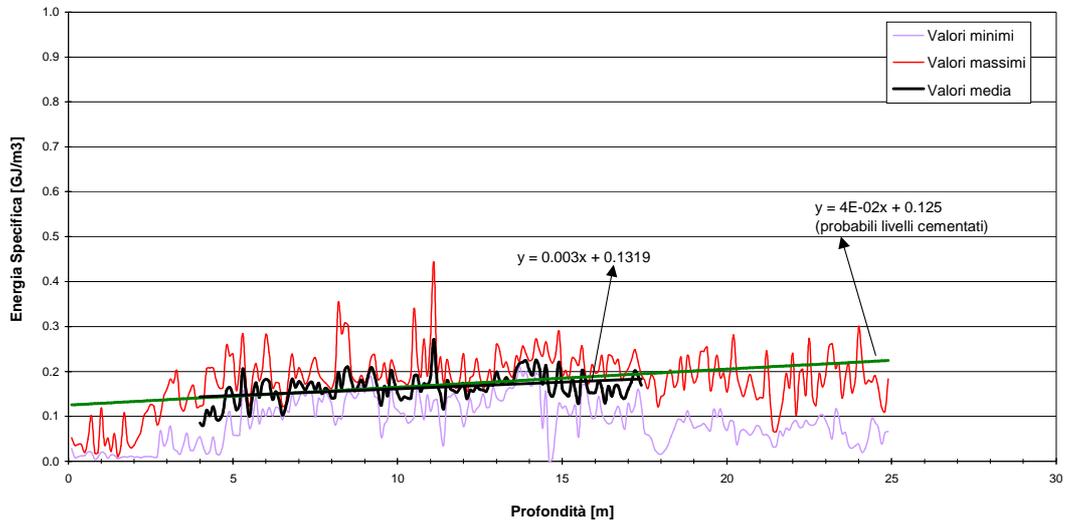


Figura 15 - Andamento dei valori minimi, medi e massimi (tra 0m e 17m circa) dell'energia specifica con relativa retta interpolante delle diagrafie D38, D11, D39

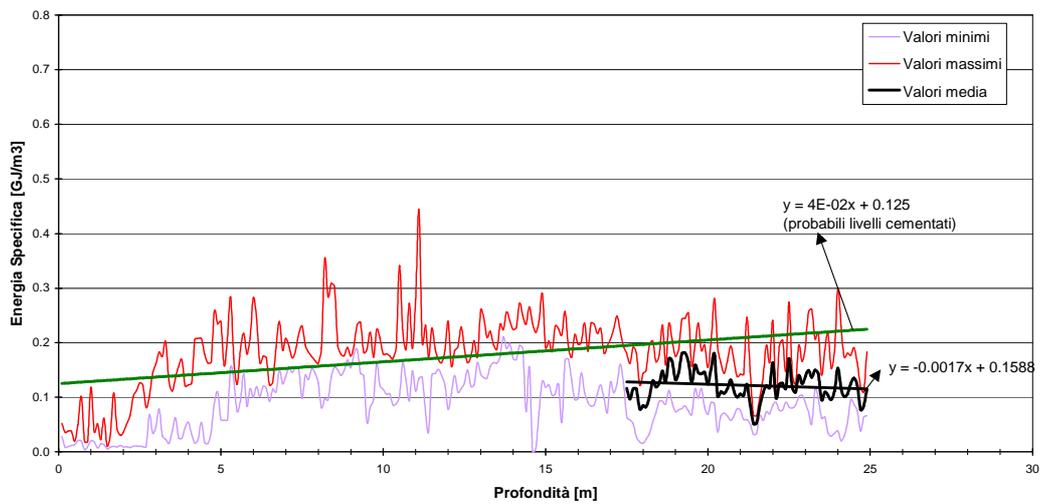


Figura 16 - Andamento dei valori minimi, medi e massimi (tra 17m circa e 25m) dell'energia specifica con relativa retta interpolante delle diagrafie D38, D11, D39

Grandezze statistiche

Media	0.163
Errore standard	0.003
Mediana	0.162
Deviazione standard	0.031
Varianza campionaria	0.001
Curtosi	1.040
Asimmetria	-0.002
Intervallo	0.191
Minimo	0.080
Massimo	0.272
Somma	21.358
Conteggio	131
Più grande(95)	0.150
Più piccolo(25)	0.141

Classe (valore medio)	Frequenza	% cumulativa
0.025	0	0%
0.075	4	3.1%
0.125	32	27.5%
0.175	79	87.8%
0.225	15	99.2%
0.275	1	100.0%
0.325	0	100.0%
0.375	0	100.0%
0.425	0	100.0%
0.475	0	100.0%

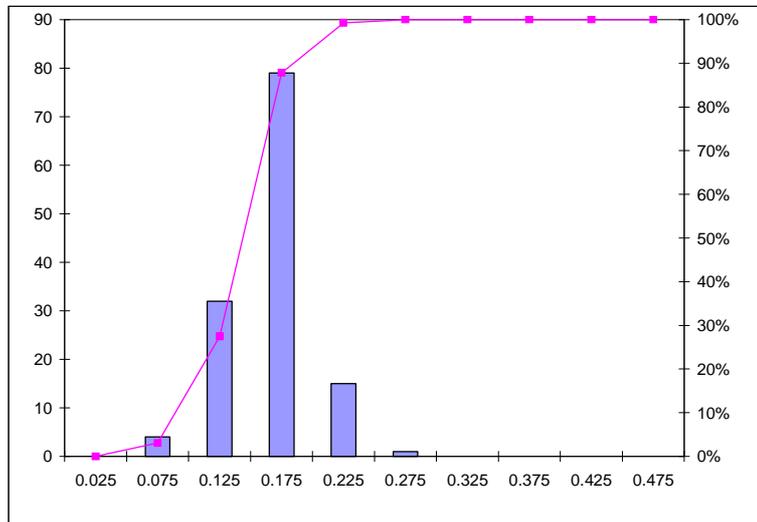


Figura 17 - Analisi statistica damento dei valori dell'energia specifica (tra 0m e 17m) delle diagrafie D38, D11, D39

Grandezze statistiche

Media	0.125
Errore standard	0.003
Mediana	0.122
Deviazione standard	0.030
Varianza campionaria	0.001
Curtosi	-0.057
Asimmetria	0.201
Intervallo	0.149
Minimo	0.052
Massimo	0.201
Somma	10.138
Conteggio	81

Classe (valore medio)	Frequenza	% cumulativa
0.025	0	0%
0.075	15	18.5%
0.125	49	79.0%
0.175	16	98.8%
0.225	1	100.0%
0.275	0	100.0%
0.325	0	100.0%
0.375	0	100.0%
0.425	0	100.0%
0.475	0	100.0%

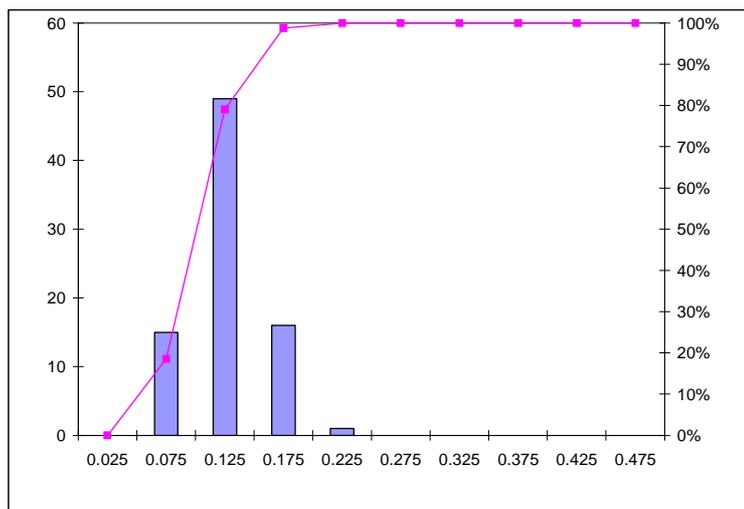


Figura 18 - Analisi statistica damento dei valori dell'energia specifica (tra 17m e 25m) delle diagrafie D38, D11, D39

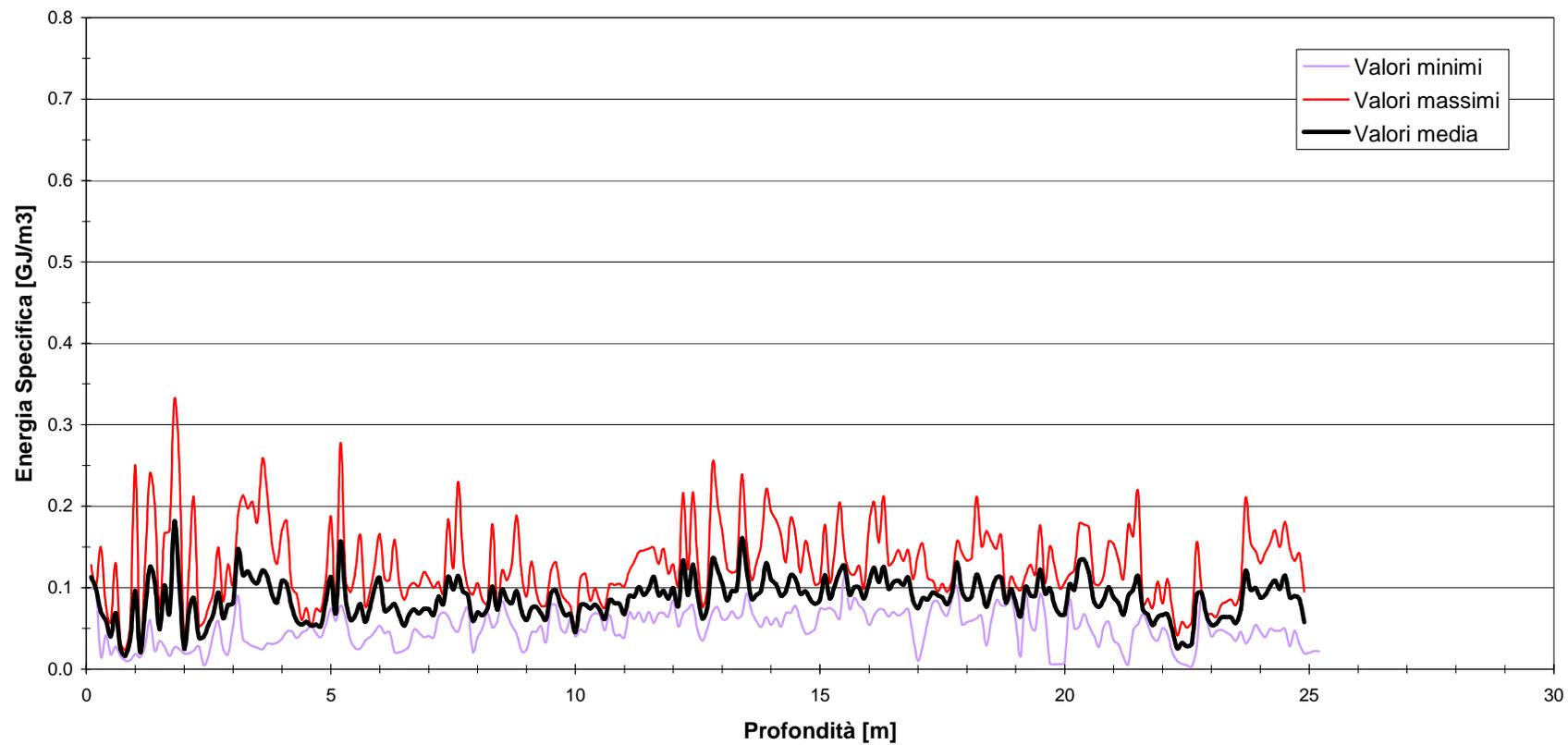


Figura 19 - Andamento dei valori minimi, medi e massimi dell'energia specifica delle diagrafie D12, D40, D15

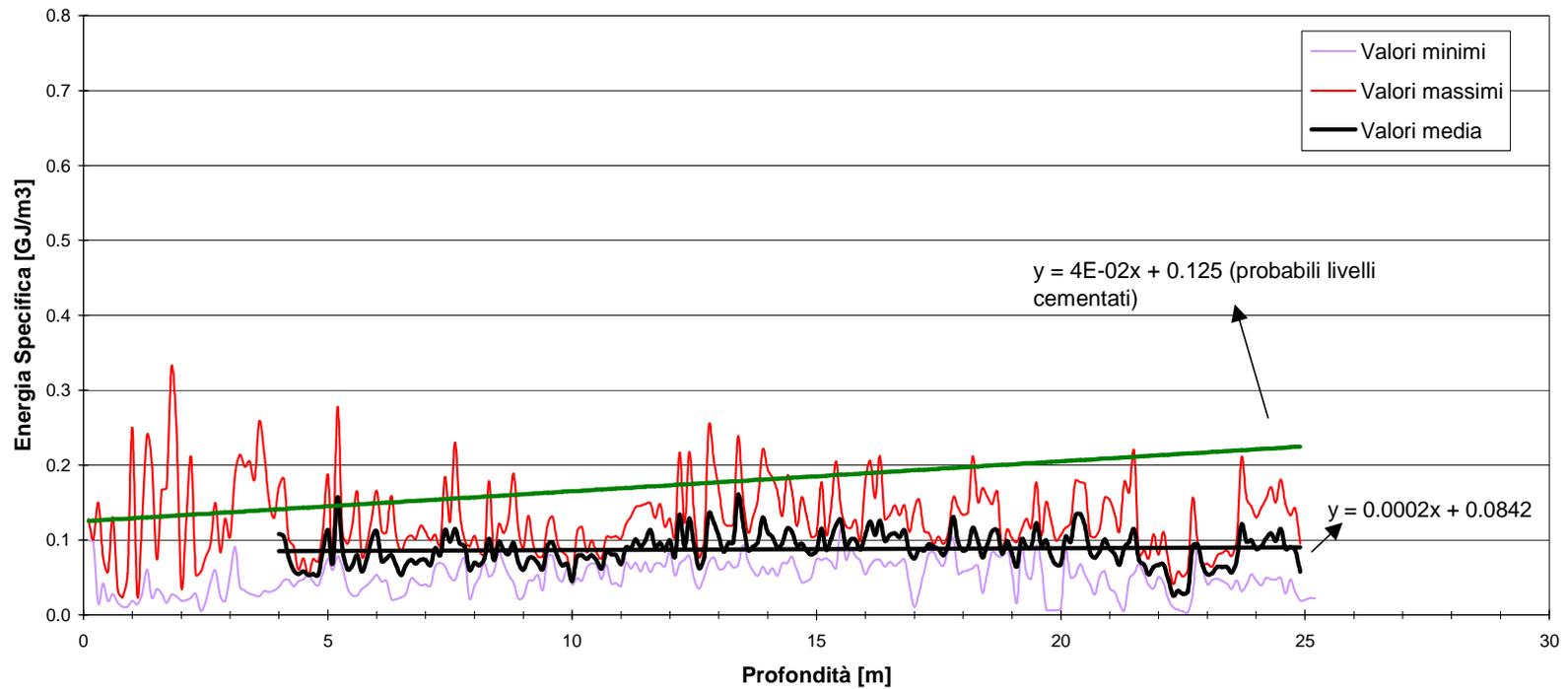


Figura 20 - Andamento dei valori minimi, medi e massimi con relativa retta interpolante dell'energia specifica delle diagrafie D12, D40, D15

Grandezze statistiche	
Media	0.087
Errore standard	0.002
Mediana	0.088
Deviazione standard	0.023
Varianza campionaria	0.001
Curtosi	0.548
Asimmetria	0.090
Intervallo	0.139
Minimo	0.020
Massimo	0.178
Somma	18.532
Conteggio	213
Più grande(95)	0.091
Più piccolo(25)	0.061

Classe (valore medio)	Frequenza	% cumulativa
0.025	8	3.8%
0.075	153	75.6%
0.125	50	99.1%
0.175	2	100.0%
0.225	0	100.0%
0.275	0	100.0%
0.325	0	100.0%
0.375	0	100.0%
0.425	0	100.0%
0.475	0	100.0%

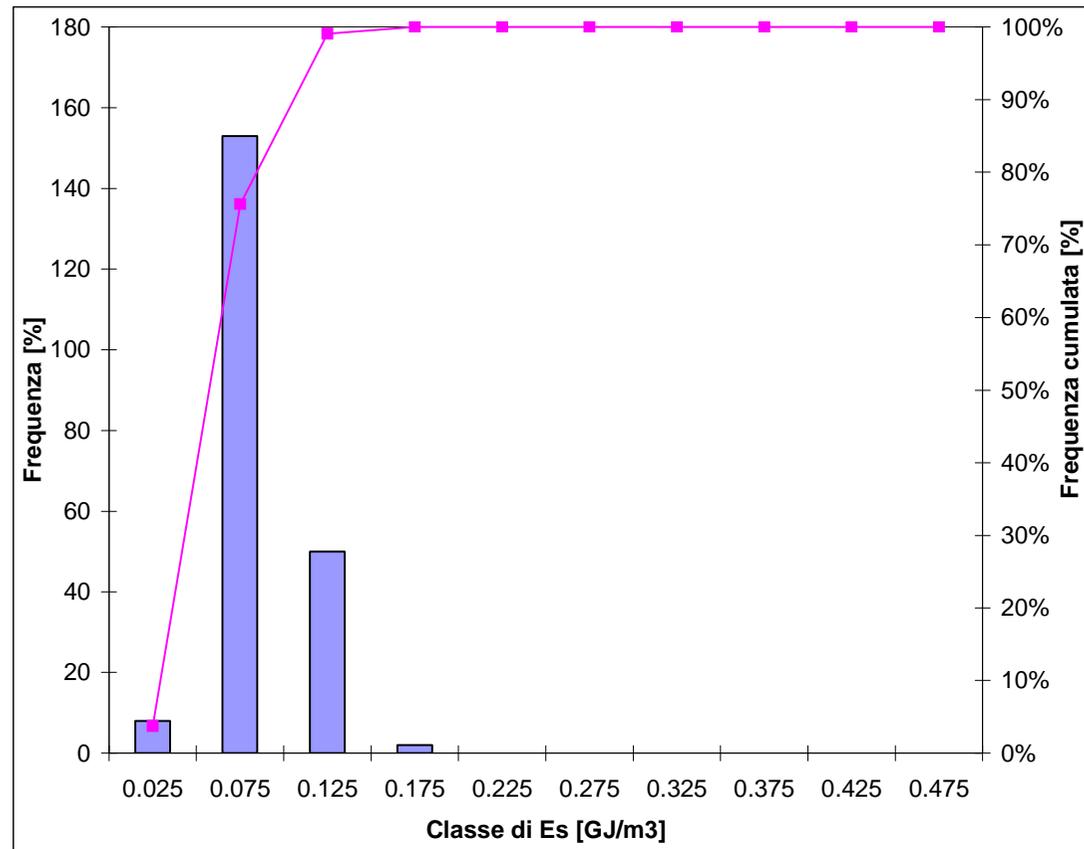


Figura 21 - Analisi statistica damento dei valori dell'energia specifica delle diagrafie D12, D40, D15

Zona Deposito-Racconigi

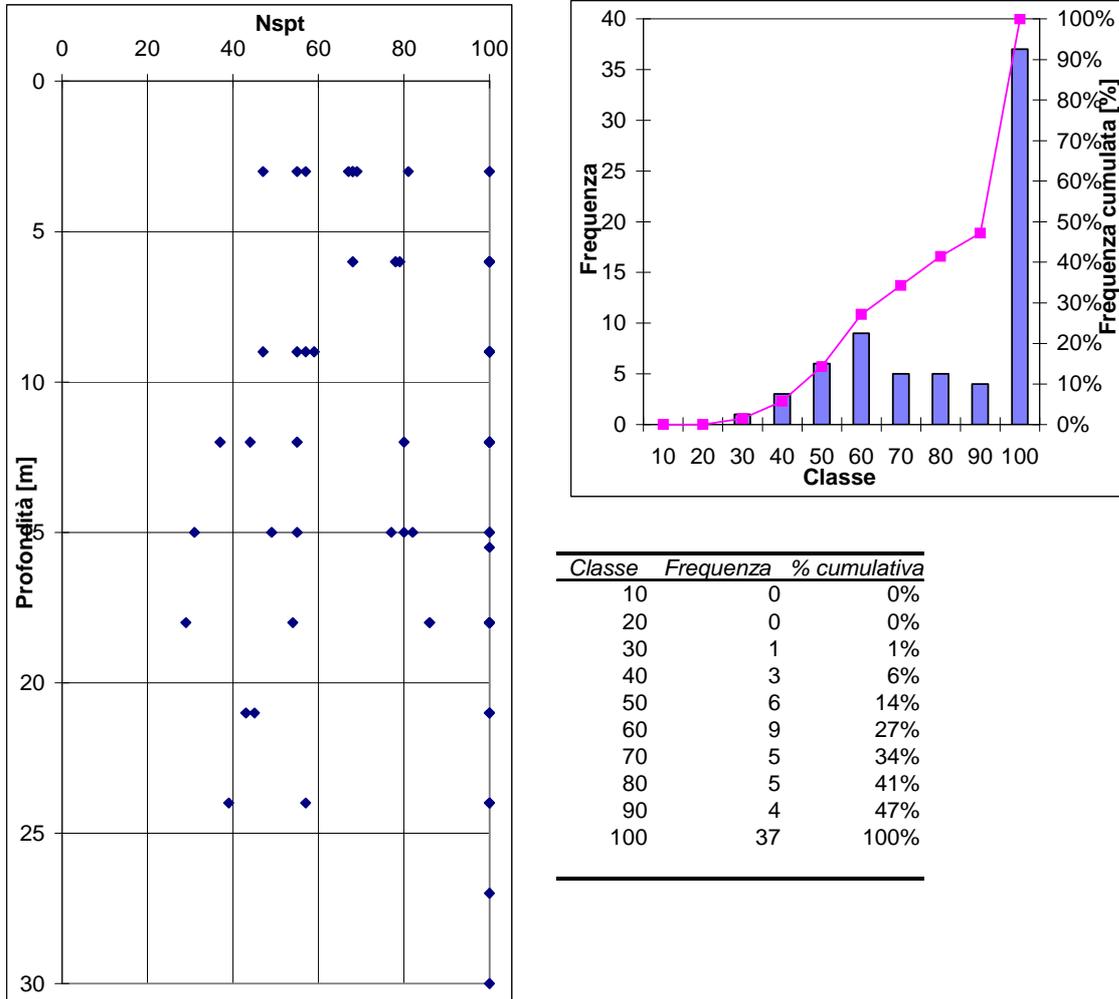
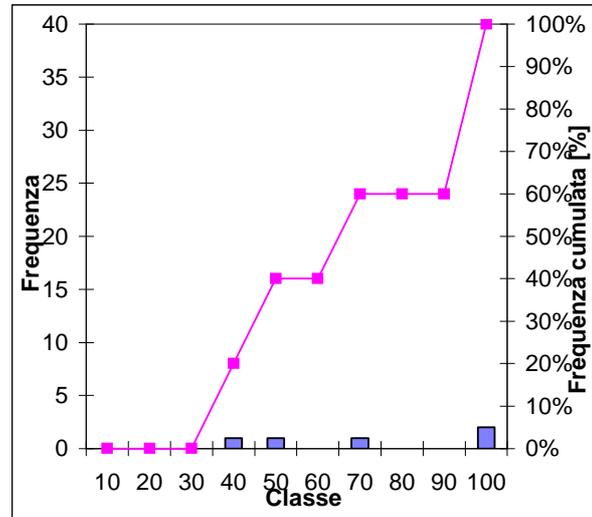
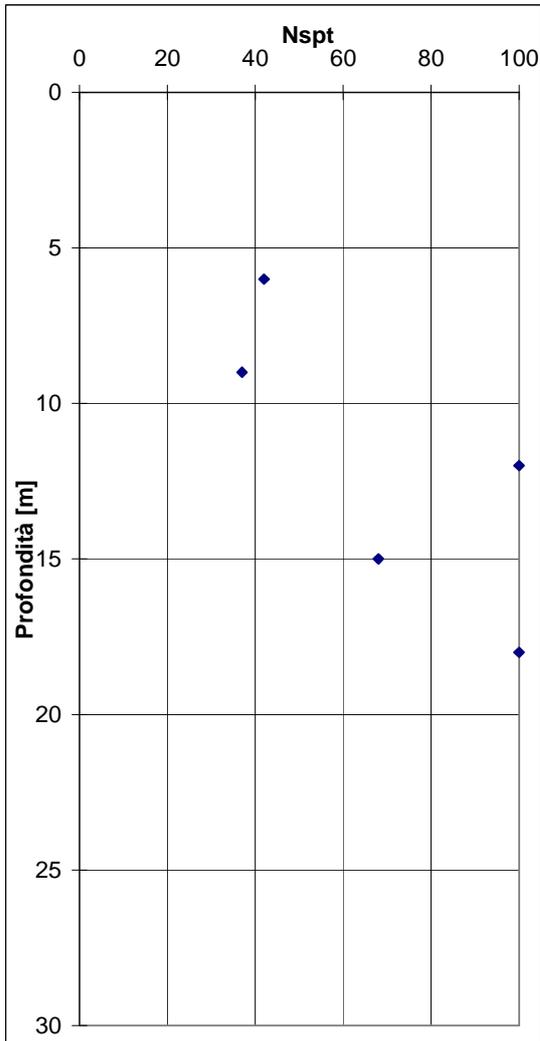


Figura 22 - Interpretazione dei dati di SPT: zona Deposito-Racconigi

Zona Racconigi-Acaja



Classe	Frequenza	% cumulativa
10	0	0%
20	0	0%
30	0	0%
40	1	20%
50	1	40%
60	0	40%
70	1	60%
80	0	60%
90	0	60%
100	2	100%

Figura 23 - Interpretazione dei dati di SPT: zona Racconigi-Acaja

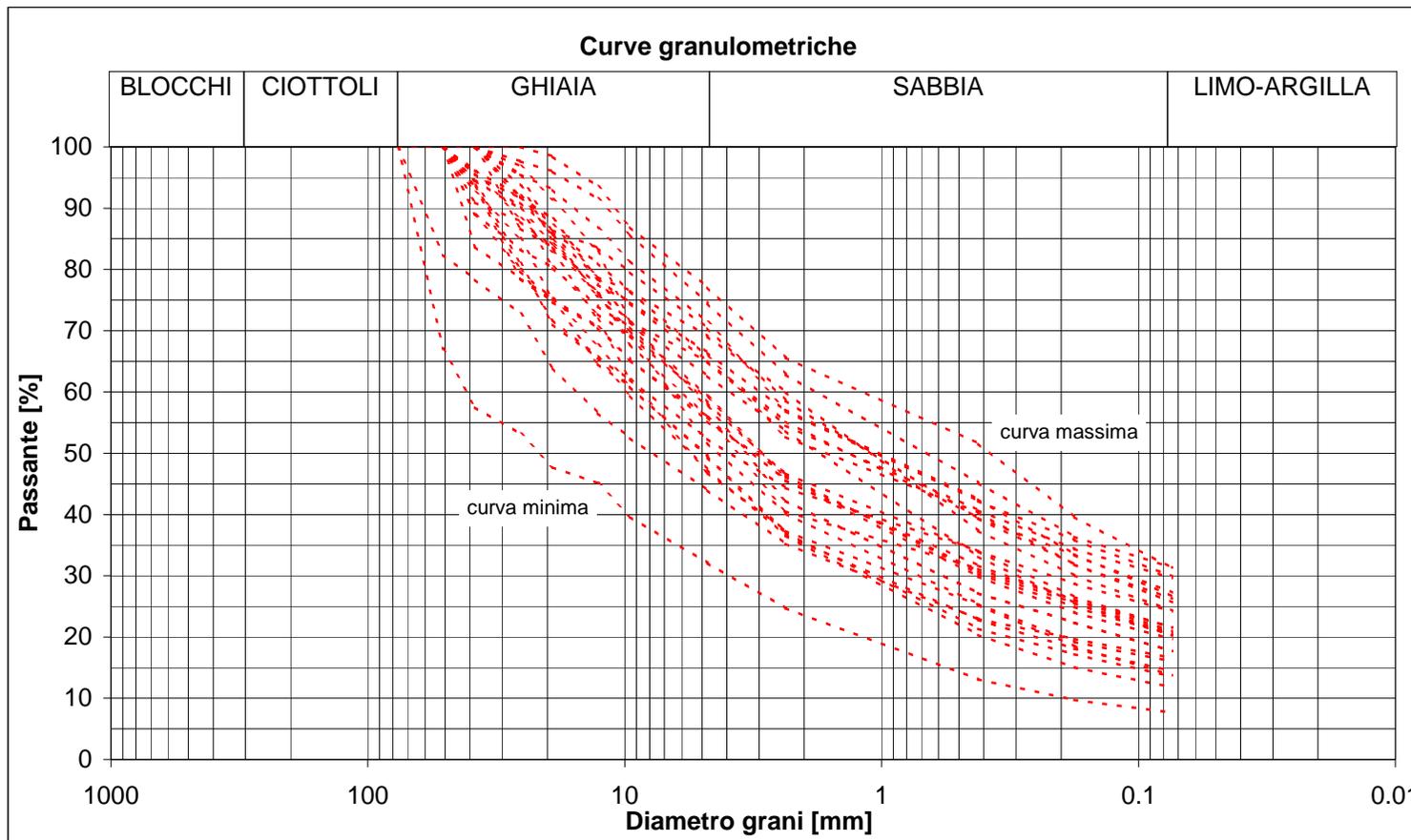


Figura 24 - Curve granulometriche dei campioni provenienti dai sondaggi (non è considerata la percentuale di ciottoli $\geq 100\text{mm}$)

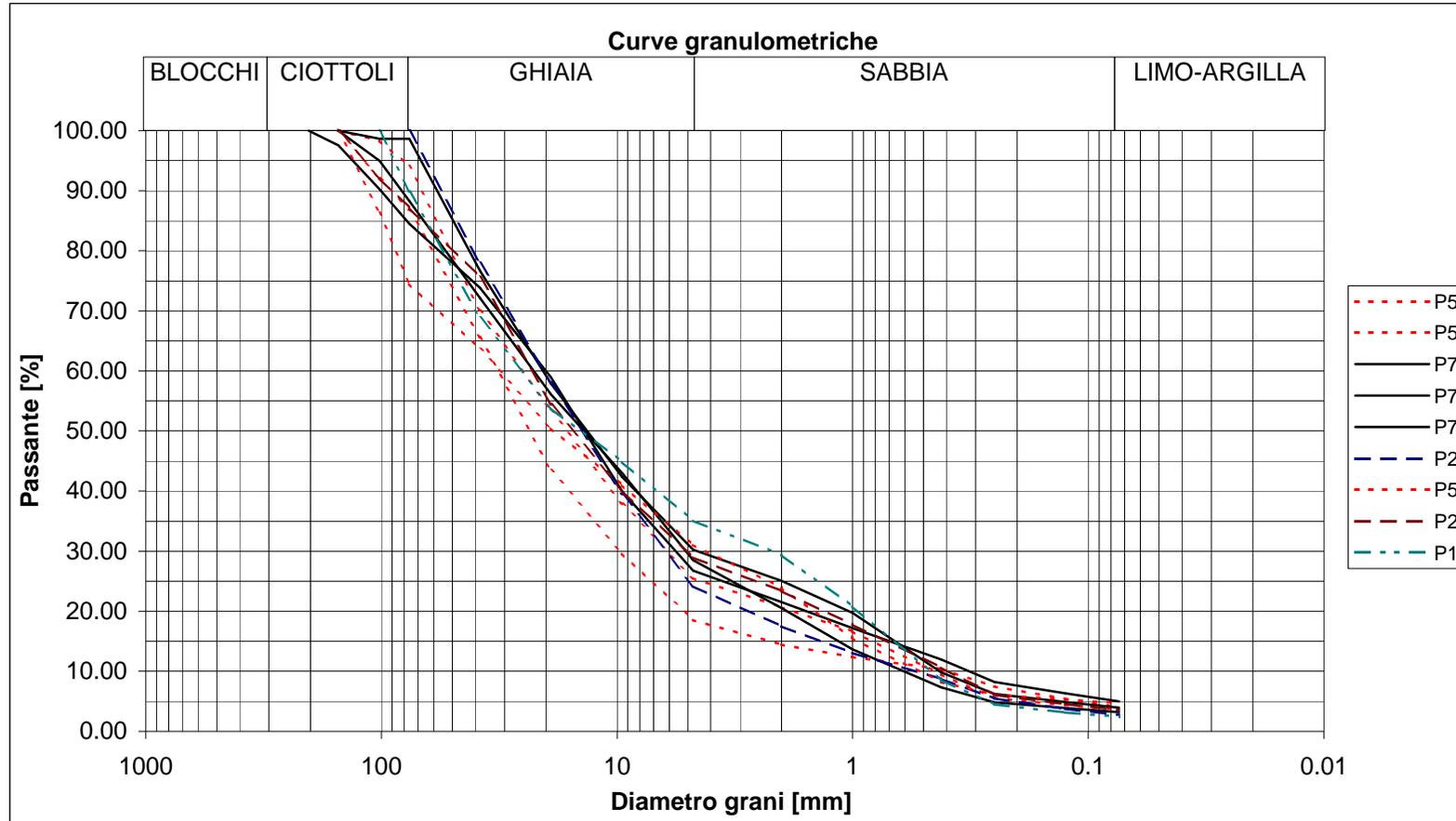


Figura 25 - Curve granulometriche integrali dei campioni provenienti dai pozzi P1, P2, P5 e P7 (è considerata la percentuale di ciottoli $\geq 100\text{mm}$)

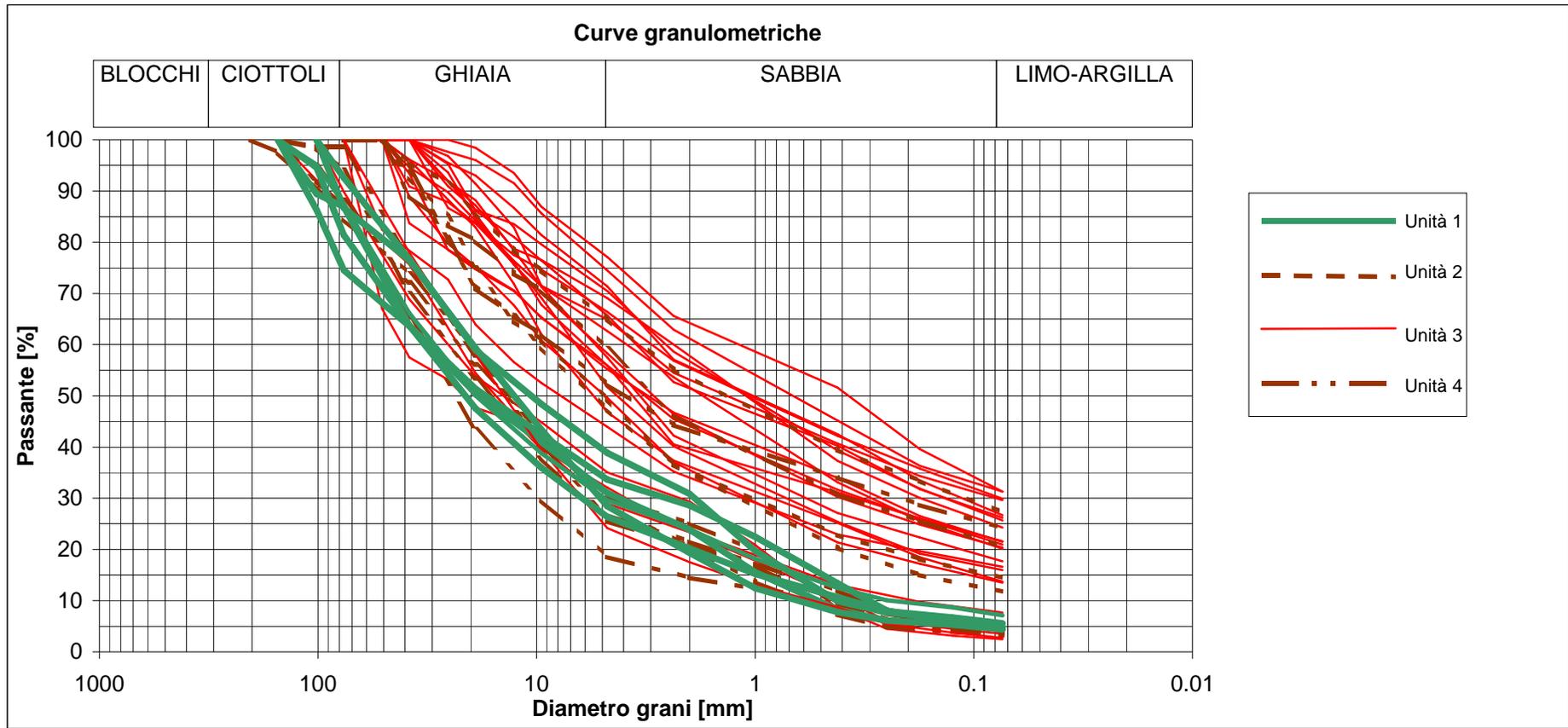
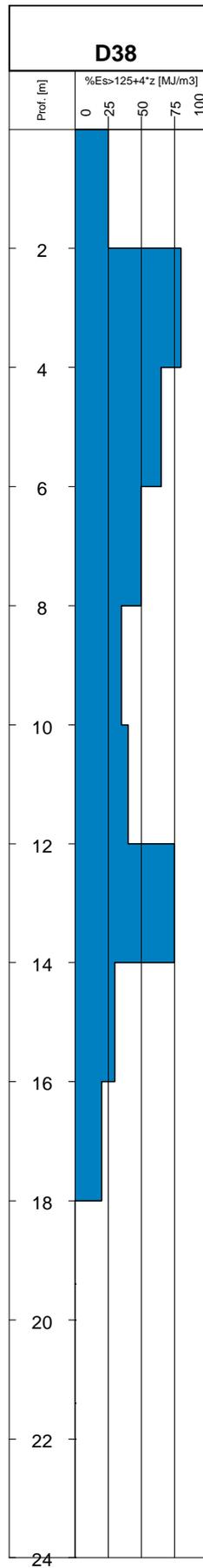
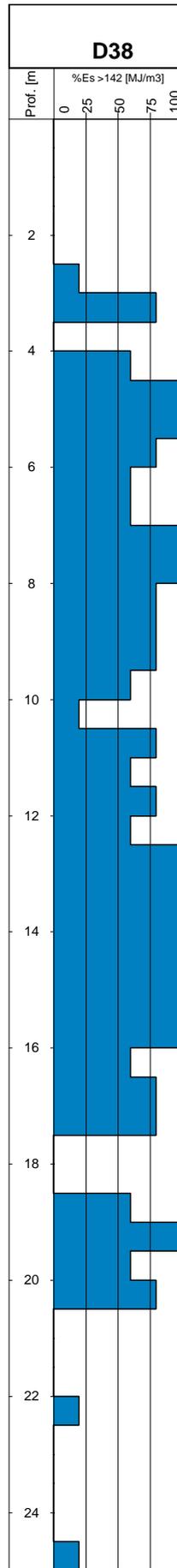


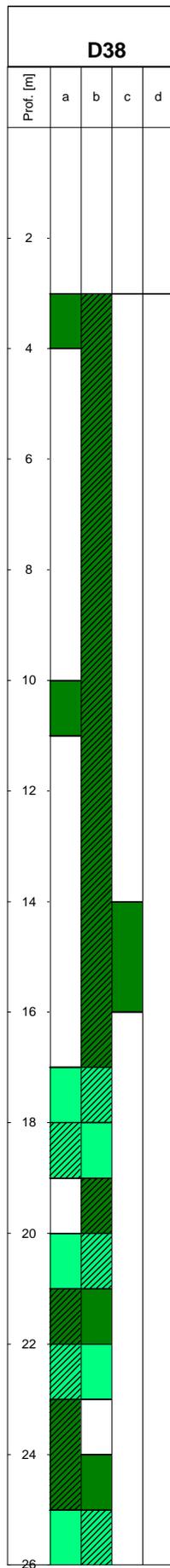
Figura 26 - Curve granulometriche dei campioni provenienti dai sondaggi e dai pozzi, suddivisi per unità geotecniche



Diagrafia D38 - Andamento della cementazione con la profondità



Diagrafia D38 – Andamento della scavabilità con la profondità



Diagrafia D38 – Andamento dell'affidabilità con la profondità



