

SATTI S.p.A.
TORINESE TRASPORTI INTERCOMUNALI TORINO

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

TRATTA ACAJA-PORTA NUOVA
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 Ing. G. Corbo Dott. G. Ricci Ing. Dipl. A. Brogiato		Ing. G. Kalamaras		Ing. P. Grasso		15/05/2001
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	Caratteri sismici.....	3
3.	STUDIO IDROGEOLOGICO.....	4
3.1	Inquadramento idrogeologico.....	4
3.2	La falda superficiale - Progetto Definitivo (febbraio-maggio 2000)	4
3.2.1	Censimento dei punti di misura.....	4
3.2.2	Elaborazione delle isopiezometriche.....	4
3.2.3	Condizioni di deflusso.....	5
3.2.4	Permeabilità dei terreni	5
3.3	Oscillazione del livello della falda superficiale	5
3.3.1	Livello della falda storica.....	5
3.3.2	Tendenze evolutive degli ultimi 30 anni.....	6
3.3.3	Analisi dei dati pregressi (livello di falda 1985-2000).....	6
3.3.4	Analisi dei dati di precipitazione.....	7
3.4	Presenza di altri fluidi.....	8
4.	QUADRO DI RIFERIMENTO PROGETTUALE	9
4.1	Geologia e Geomorfologia	9
4.2	Idrogeologia.....	10
4.2.1	Il monitoraggio.....	10
4.2.2	Analisi dei nuovi dati	10
4.2.3	Analisi e considerazioni sui parametri di progetto.....	11
4.3	Idrogeochimica.....	12
5.	LE INDAGINI.....	14
5.1	Indagini esistenti.....	14
5.2	Indagini per il progetto definitivo ed esecutivo.....	16
5.3	Prove di laboratorio per la caratterizzazione geotecnica.....	19
5.4	Prove di laboratorio per la scelta del metodo di scavo.....	19
6.	RISULTATI DELLE INDAGINI E INDIVIDUAZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE	21
6.1	Considerazioni preliminari	21
6.2	Analisi dei dati.....	21
6.2.1	Sondaggi.....	21
6.2.2	Diagrafie.....	21
6.2.3	Pozzi geognostici praticabili	23
6.2.4	Prove penetrometriche dinamiche	23
6.2.5	Prove di carico su piastra	24
6.2.6	Indagini tomografiche sismiche	25
6.2.7	Indagini tomografiche elettriche	26
6.2.8	Individuazione di tratte a caratteristiche omogenee (con riferimento alla cementazione)	28

6.2.9	Prove di laboratorio	29
6.3	Individuazione e descrizione delle unità geotecniche	31
6.3.1	Unità 1: terreno superficiale	31
6.3.2	Unità 2: ghiaie con sabbie da sciolte a debolmente cementate	32
6.3.3	Unità 3: ghiaie con sabbie con cementazione da debole a media	32
6.3.4	Unità 4: ghiaie con sabbie con cementazione da media ad elevata.....	33
6.3.5	Unità 5: limo argilloso debolmente sabbioso	33
7.	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA.....	35
7.1	Caratterizzazione geotecnica delle unità individuate nei depositi fluvioglaciali ...	35
7.2	Caratterizzazione geotecnica del complesso del Villafranchiano (unità 5)	36
8.	MODELLO GEOLOGICO-GEOTECNICO.....	41
8.1	Zonazione geotecnica	41
8.2	Affidabilità del modello	42
9.	PROBLEMATICHE DI SCAVO LEGATE ALLA NATURA DEL TERRENO.....	43
9.1	Ciottoli e trovanti.....	43
9.2	Cementazione e/o addensamento	44
9.3	Presenza di lenti di sabbia	44
9.4	Presenza di acqua	44
9.5	Presenza di gas	45
9.6	Zone inquinate (acqua e terreno).....	45
9.7	Zone disturbate, presenza di cavità	45
9.8	Canali storici.....	45
9.9	Danni di guerra.....	46
9.10	Presenza di reperti archeologici	46
10.	NORMATIVA.....	47
11.	BIBLIOGRAFIA	48

ALLEGATO A	IDROGEOLOGIA
ALLEGATO B	ELABORAZIONE DEI RISULTATI DELLE PROVE
ALLEGATO C	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA
ALLEGATO D	CERTIFICATI DELLE PROVE IN SITO
ALLEGATO E	CERTIFICATI DELLE PROVE DI LABORATORIO

SINTESI

Questo documento presenta i risultati dello studio geotecnico realizzato nell'ambito della progettazione esecutiva della Linea 1 della Metropolitana di Torino. La progettazione è stata affidata all'ATI SYSTRA S.A. (Parigi)-GEODATA S.p.A. (Torino) dalla SATTI S.p.A.

L'obiettivo principale di questa relazione e dei relativi documenti grafici è la descrizione ed illustrazione del modello geotecnico dei terreni interessati dal Lotto 5 del tracciato della metropolitana. Il modello prende in considerazione e definisce le problematiche seguenti:

- definizione delle unità geotecniche lungo il profilo longitudinale della linea;
- definizione dei parametri geotecnici caratterizzanti le unità individuate;
- individuazione delle problematiche relative all'interazione tra il contesto geologico-geotecnico-idrogeologico e le strutture.

I terreni investigati sono costituiti da (in ordine stratigrafico):

- depositi fluvioglaciali Rissiani (Quaternario) fino a circa 33m di profondità;
- materiali coerenti del complesso del Villafranchiano (Pliocene Superiore-Pleistocene Inferiore).

Lo studio geologico eseguito ha messo in luce che la principale caratteristica geologica-geotecnica dei terreni di Torino è la presenza di cementazione nei depositi fluvioglaciali (ghiaie, ciottoli, e sabbie in matrice limosa). Il grado e la geometria di tali livelli cementati determinano differenze nel comportamento geotecnico dei materiali, nonché nella loro scavabilità.

Le indagini geognostiche sono state realizzate ponendo particolare attenzione all'aspetto della cementazione. Oltre ai sondaggi a carotaggio continuo, alle prove SPT e alle diagrafie, sono stati scavati pozzi di 2.4m di diametro all'interno dei quali, a profondità diverse, sono state eseguite prove di carico su piastra. In questi pozzi sono stati prelevati campioni di terreno cementato da sottoporre a prove di laboratorio.

Il grado di affidabilità dei differenti tipi di indagine, con riferimento alla cementazione dei terreni investigati, è stato definito attraverso un approccio basato sulla "Fuzzy Arithmetic", considerando come parametro discriminante la capacità di ogni indagine di evidenziare il grado di cementazione dei terreni.

L'elaborazione delle prove in sito ha consentito la definizione della geometria e del grado di cementazione dei livelli in questione con l'individuazione di tre unità geotecniche, all'interno dei depositi fluvioglaciali. Sono stati assunti tre gradi convenzionali di cementazione (valori percentuali riferiti all'energia specifica E_s misurata nelle indagini):

- Assente - in tracce → grado di cementazione: 0%-25% → Unità 2;
- In tracce - diffusa → grado di cementazione: 25%-50% → Unità 3;
- Diffusa - elevata → grado di cementazione: 50%-75% → Unità 4.

All'interno dell'unità 4 sono stati riscontrati livelli di materiale con grado di cementazione compreso tra 75%-100%. Prove di laboratorio su campioni di materiale con grado di cementazione del 100% hanno fatto registrare una resistenza alla compressione monoassiale media pari a 5.6MPa.

Oltre alle tre unità su introdotte, ne sono state riconosciute altre due:

- l'unità 1 corrispondente al terreno di riporto;
- l'unità 5, corrispondente ai limi argillosi del Complesso Villafranchiano al di sotto dei depositi fluvioglaciali.

Per la parametrizzazione delle unità interessate da materiale cementato si è ricorso ad un criterio di resistenza generale che consente di esprimere la variazione del comportamento resistente del terreno in funzione del suo grado di cementazione. Tale criterio ha come limite inferiore l'involuppo lineare di Mohr-Coulomb (corrispondente al grado di cementazione pari a 0%) e come limite superiore quello di Hoek-Brown (corrispondente al grado di cementazione pari a 100%). Gli involuppi di rottura individuati sono stati approssimati ad un criterio lineare in corrispondenza di livelli tensionali rappresentativi.

Anche per le caratteristiche di deformabilità l'elaborazione dei dati ha portato ad una legge non lineare che lega il valore del modulo di deformazione al grado di cementazione.

Per l'unità 5 l'elaborazione dei risultati delle prove geotecniche, supportata da indicazioni di letteratura (Bottino & Civita, 1986) ha consentito la definizione dei parametri di resistenza meccanica, propri dell'involuppo lineare di Mohr-Coulomb, e di deformazione.

Qui di seguito viene riportata la tabella di sintesi dei parametri geotecnici corrispondenti alle diverse unità:

Unità e descrizione	γ_n (kN/m ³)	E' (MPa)	ν' (-)	ϕ' (°)	c' (kPa)	cu (kPa)	σ_n' (MPa)
Unità 1: terreno superficiale (riporto e/o limo sabbioso argilloso)	17-19	10-20	0.35	30-35	0	-	-
Unità 2: ghiaie e sabbie da sciolte a debolmente cementate	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	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	19-22	200-260	0.30	40-47 35-44	25-90 40-120	-	0.15 0.30
Unità 5: Limo argilloso deb. sabbioso	19-20	50-80	0.3	26-30	10-40	150-350	-

Riportando le elaborazioni eseguite lungo il profilo si perviene ad una zonazione geotecnica ottenendo la seguente discretizzazione del tracciato:

- ❑ Stazione Principi D'Acaja-Zona Passante Ferroviario, prevalenza dell'unità 2 passante a 3;
- ❑ Zona Passante Ferroviario – Stazione Vinzaglio: per profondità fino a 25m l'unità predominante è la 4, mentre da circa 25m in poi è presente l'unità 3;
- ❑ Stazione Vinzaglio- Stazione Porta Nuova: predomina l'unità 3;
- ❑ Stazione Porta Nuova-Fine lotto: predomina l'unità 4 con brevi tratti in 3.

L'unità 5 è riscontrabile lungo il tracciato a profondità variabili tra 38m, nella parte iniziale del tracciato, e 33m, nella parte finale; le fondazioni della Stazione Porta Nuova raggiungono questa unità.

Lungo il tracciato, la falda è presente (quota massima raggiunta nel periodo monitorato febbraio 2000-aprile 2001) a quota variabile dai 22m (Stazione Principi D'Acaja) a -15.5 da p.c. (Stazione Porta Nuova). In seguito al monitoraggio effettuato sui piezometri installati (periodo febbraio 2000-aprile 2001), i valori di riferimento della falda per la fase costruttiva e progettuale sono stati definiti rispettivamente a +1m e +3.5m dal livello massimo risultante dal monitoraggio. I criteri di tale scelta sono discussi nel Paragrafo 4.2.3.

Le maggiori problematiche relative allo scavo delle opere possono essere rappresentate da:

- presenza di ciottoli e trovanti di grossa dimensione ed elevata resistenza e durezza;
- cementazione e/o addensamento dei terreni;
- presenza di lenti di materiale fine;
- presenza della falda;
- presenza di gas e di zone inquinate, dovute a sversamenti di inquinanti industriali e di carburante;
- presenza di cavità dovute alla realizzazione dei sottoservizi, alla presenza di canali storici e a danni si guerra.

STRUTTURA DELLA RELAZIONE

Il **capitolo 1** è introduttivo sull'opera e sul tracciato della linea in generale.

L'inquadramento geologico e geomorfologico dell'area su cui è prevista la realizzazione della tratta Collegno Porta Nuova viene presentato nel **capitolo 2**, con particolare attenzione per ciò che concerne gli aspetti relativi alla cementazione dei depositi alluvionali.

Il **capitolo 3** descrive la situazione idrogeologica e idrogeochimica, con particolare riferimento alla falda superficiale del Lotto 5. E' inoltre descritto l'assetto (soggiacenza, direzione di deflusso e gradiente) della falda nel sottosuolo della città di Torino, con considerazioni rispetto alla falda "storica", alle escursioni annuali del livello piezometrico e al trend della falda stessa. E' esposta la problematica relativa alla possibile presenza di altri fluidi (sacche di gas) nel sottosuolo della città di Torino, con possibili effetti di inquinamento nei confronti dei materiali che si andranno a scavare.

Il **capitolo 4** descrive il lotto 5, oggetto della presente relazione, inquadrandone gli aspetti geologici-geomorfologici e idrogeologici.

Nel **capitolo 5** vengono presentate le indagini geognostiche in sito e le prove geotecniche in sito e di laboratorio che sono state eseguite e/o reperite in considerazione per la caratterizzazione geotecnica del lotto (sondaggi a carotaggio continuo, diagrafie, pozzi geognostici praticabili, SPT, prove di carico su piastra, indagini geofisiche, analisi granulometriche, prove di resistenza meccanica).

Il **capitolo 6** espone l'analisi dei dati acquisiti mediante le indagini e le prove in sito e in laboratorio. Sono, infine, descritte le unità geotecniche individuate, distinte in base al differente grado di cementazione.

Nel **capitolo 7** è esposta la caratterizzazione geotecnica, con indicazione della metodologia adottata e attribuzione dei parametri di resistenza e deformabilità a ciascuna unità geotecnica.

Il **capitolo 8**, relativo alla zonazione geotecnica, descrive le unità geotecniche riconosciute nei diversi tratti lungo lo sviluppo del lotto 5. Sono esposti i criteri con i quali si è assegnata l'affidabilità alle indagini e, di conseguenza, indirettamente, al modello geotecnico precedentemente descritto.

Il **capitolo 9** espone le problematiche relative allo scavo in funzione della presenza di elevate percentuali di ciottoli e trovanti, del grado di cementazione, della presenza di lenti di sabbia, della falda, di sacche di gas, di residuati bellici, di reperti archeologici, di zone disturbate e cavità.

Gli elaborati grafici collegati alla relazione sono:

- carta ubicazione indagini geognostiche, scala 1:2000 (codice MTL1T1 EGEOGN3S001);
- profilo geologico, scala 1:2000/200 (codice MTL1T1 EGEOGN3S003);
- planimetria e profilo geotecnico, scala 1:2000/500 (codice MTL1T1 EGEOGN3S004);
- carta delle isopiezometriche della falda superficiale, scala 1:5000 (codice MTL1T1 EGEOGN3S002).

1. INTRODUZIONE

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 -15.5m dal piano campagna.

Tre stazioni e precisamente Paradiso, XVIII Dicembre e Vinzaglio sono poste a profondità maggiore (-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, tranne un breve tratto in naturale (lunghezza circa 73.50m) di collegamento tra la stazione Principi d'Acaja ed il pozzo di calaggio della TBM del Lotto 5, che verrà realizzato con metodi di scavo tradizionale.

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 5 costituisce il tratto compreso fra la Stazione Principi D'Acaja (esclusa) e la Stazione Porta Nuova, fino al Pozzo Terminale di uscita (incluse), da progr.6+717 a progr.9+616.

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 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 (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 Plioceni 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 precipitazione avviene secondo due meccanismi; nel primo i carbonati presenti in soluzione nelle acque della falda superficiale provengono principalmente dalle acque della Dora Riparia (350-400 mg/l CaCO₃ 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.

Il secondo meccanismo è legato alle acque di precipitazione meteorica che infiltrandosi nel suolo, si arricchiscono di CO₂. Questa combinandosi con l'acqua produce acido carbonico (H₂CO₃) e determina, 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 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 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. STUDIO IDROGEOLOGICO

3.1 Inquadramento idrogeologico

Con riferimento all'assetto litostratigrafico per i primi 150-200m di spessore, 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-limoso), 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 20-30 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 fluvio-lacustri; la sua base è rappresentata da uno strato di argille presente, a seconda delle zone, a circa 150-200 m dal piano campagna.

3.2 La falda superficiale - Progetto Definitivo (febbraio-maggio 2000)

3.2.1 Censimento dei punti di misura

Nell'ambito della Progettazione Definitiva della Linea 1 della Metropolitana (tratta Collegno-Porta Nuova) è stato portato a termine un censimento di tutti i punti di misura della falda superficiale pubblici e privati i cui dati sono reperibili presso gli Enti Locali, Provinciali e Regionali. La suddetta campagna (periodo febbraio-marzo 2000) ha compreso, ove possibile (molti piezometri eseguiti nell'ambito della progettazione di opere precedenti sono ora irreperibili o inaccessibili), la misura di piezometri già esistenti e monitorati nel corso della progettazione di altre grandi opere.

In tabella 1 (Allegato A) sono riportati i dati dei pozzi e piezometri censiti, con indicazione dei dati relativi allo stato del pozzo (in uso, abbandonato, quantità dell'acqua emunta, etc...), posizione dei filtri e disponibilità della stratigrafia rilevata al momento dello scavo.

3.2.2 Elaborazione delle isopiezometriche

I dati provenienti dalla campagna di misure febbraio-marzo 2000 sono stati interpolati per produrre una carta delle isopiezometriche della falda superficiale. Il risultato (Tavola A5EGEOGN3S002 alla scala 1:5000) è stato comparato con la carta delle isopiezometriche elaborata nel giugno del 1995, elaborata dal Consorzio R.C.C.F. per lo studio del Nodo Ferroviario di Torino (Lotto 1).

Dal confronto delle due situazioni si evidenzia che:

- l'andamento delle isopiezometriche è paragonabile indicando sostanzialmente una direzione di deflusso invariata;
- i gradienti sono comparabili, così come le zone di drenaggio e alimentazione.

3.2.3 Condizioni di deflusso

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.

3.2.4 Permeabilità dei terreni

Le prove di permeabilità (prove Lefranc) effettuate nei sondaggi eseguiti per la Progettazione Definitiva e per la Progettazione Esecutiva hanno permesso di definire i valori di permeabilità dei depositi fluvio-glaciali interessati dallo sviluppo dell'opera. I valori di permeabilità ottenuti dalle prove collocano la permeabilità di questi depositi principalmente nella classe K3 (AFTES, 1992) per buona parte dello sviluppo del tracciato. Alcune parti del tracciato, relative al Lotto 5, sono caratterizzate dalla classe K4.

Le classi di permeabilità secondo AFTES 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

Per quanto riguarda i depositi del Villafranchiano (alternanza di depositi limoso argillosi e livelli di ghiaia e sabbie), si indica come valore di riferimento per i depositi limosi la classe K2 (limite inferiore) con possibile variazione nella classe K1. Dalle prove edometriche realizzate nei pressi della Stazione Porta Nuova, il valore di permeabilità ottenuto è di 10^{-9} m/s.

3.3 Oscillazione del livello della falda superficiale

3.3.1 Livello della falda storica

La ricostruzione della quota della falda in epoca ottocentesca, nel sottosuolo di Torino, si basa principalmente sull'osservazione della profondità massima delle gallerie di contromina e dei pozzi di epoca storica. I pozzi ritrovati nella zona di Porta Susa consentono di ipotizzare il livello della falda storica posto ad una quota 4-5 metri superiore a quella misurata agli inizi del 2000 (letture di febbraio-marzo 2000 eseguite per il Progetto Definitivo della Metropolitana di Torino).

La differenza di quota è stata calcolata nella zona di Porta Susa, mancando totalmente indicazioni sul resto del territorio urbano; data la totale mancanza di dati a riguardo, si deve ipotizzare che la direzione di deflusso, in linea generale, non sia variata nel corso delle epoche storiche e che dunque il valore differenziale di + 4-5 metri possa applicarsi alla superficie di falda identificata in tempi recenti.

3.3.2 Tendenze evolutive degli ultimi 30 anni

Il progressivo decentramento delle attività produttive dal territorio urbano e la conseguente chiusura dei pozzi usati a scopo industriale fino agli inizi degli anni '80 ha determinato un innalzamento della falda che, in via teorica, avrebbe dovuto riallinearsi ai livelli dell'ottocento. I dati recenti (campagna misure di febbraio-marzo 2000) mostrano che l'effetto di innalzamento indotto dalla dismissione dei pozzi collegati alle attività produttive si è ridotto. Attualmente il livello della falda dipende in maniera più diretta dalle precipitazioni meteoriche che cadono sui bacini idrogeologici della Dora Riparia e della Stura di Lanzo che contribuiscono alla alimentazione della falda superficiale di Torino.

3.3.3 Analisi dei dati pregressi (livello di falda 1985-2000)

Le serie storiche sull'oscillazione della falda superficiale in Torino sono state raccolte nel corso della progettazione di diverse opere (Campagna di Indagini ATM 1987, Linea 1 e 4 della Metropolitana Leggera, Progettazione del Passante Ferroviario) eseguite in tempi diversi. Ad una prima analisi risulta che i dati a disposizione sono incompleti sia per quanto riguarda la copertura areale, sia per quella temporale.

Dovendo esaminare le oscillazioni della falda nel tempo nella zona centrale della città, sono state scartate le misure eseguite sui piezometri posti troppo vicino al fiume Dora Riparia, che in determinate situazioni di livello, contribuisce alla ricarica diretta della falda.

Si è presa dunque in esame una serie di letture mensili quasi continue relative ai piezometri ubicati nella zona centrale di Torino (PZ3, PZ4, PZ5 e PZ6) nel periodo 87-88, parte del 95, 97-98 e febbraio-marzo 2000 (quest'ultima è relativa alla fase di Progetto Definitivo della Linea 1), comparandole con i dati pluviometrici registrati in Torino.

L'ubicazione dei piezometri PZ3, PZ4, PZ5 e PZ6 è la seguente (cfr Tavola A5EGEOGN3S002 alla scala 1:5000):

PZ3 Via T. Rossi Conte di Montelera;

PZ4 Stazione di Porta Nuova (uscita di Via Sacchi);

PZ5 Comprensorio di Porta Nuova all'altezza di Via Governolo;

PZ6 Via Vespucci/Via Chisone.

Tutti i dati sono riassunti nei grafici 1, 2, 3 e 4 (Allegato A).

Dall'analisi dei dati a disposizione si evidenzia quanto segue:

- il periodo di massima altezza della falda coincide solitamente con l'inizio dell'anno, il minimo si ha nel periodo estivo (luglio-agosto);
- l'oscillazione della falda, prendendo in considerazione un periodo di 12 mesi, è mediamente 1-1.5m;
- la falda mostra un trend di crescita di 1.5-2m. Si evidenzia chiaramente che il periodo aprile 87-dicembre 88 ha avuto un livello di falda più basso rispetto agli anni 1995-1996-1997;
- il livello massimo è stato raggiunto nell'inverno 1996-1997;
- i valori di PZ3, PZ4, PZ5 e PZ6 relativi al periodo aprile 87-dicembre 88 sono paragonabili con quelli misurati nel febbraio 2000.

La tabella 3.1 allegata, riassume le differenze di livello di falda riscontrate:

Tabella 3.1: Valori di soggiacenza ricavati dalle serie storiche 87-88, 95, 97-98 e dati rilevati nel febbraio 2000 per quattro piezometri nella zona centrale di Torino

Piezometro	Febbraio 1988	Giugno 1995	Febbraio 1997	Febbraio 2000
Codice	Soggiacenza (m) da p.c.	Soggiacenza (m) da p.c. e differenza rispetto febbraio 1988	Soggiacenza (m) da p.c. e differenza rispetto febbraio 1988	Soggiacenza (m) da p.c. e differenza rispetto febbraio 1988
PZ3	17.14	16.18 (+1.04m)	<i>misura non eseguita</i>	16.81 (+0.33m)
PZ4	17.7	16.88 (+1.18m)	<i>misura non eseguita</i>	17.65 (+0.05m)
PZ5	16.66	15.78 (+1.12m)	15.38 (+1.28m)	16.42 (+0.24m)
PZ6	20.31	19.95 (+0.36m)	18.55 (+1.76m)	19.9 (+0.41m)

3.3.4 Analisi dei dati di precipitazione

I grafici 1, 2, 3 e 4 (Allegato A) riportano i dati di precipitazione mensile registrati in Torino dal 1985 fino a novembre 2000. I dati del periodo 1985-1999 sono relativi alla stazione dell'Ufficio Idrografico posto nei pressi di C.so Bolzano. I dati del 2000 sono i dati della rete di monitoraggio della Regione Piemonte (pluviometro "Torino-Italgas" ubicata in C.so Regina). I dati del 2000 sono stati forniti su richiesta e non sono validati.

Le precipitazioni che cadono sul territorio urbanizzato di Torino sono perlopiù intercettate dalla rete di canali di scolo e non contribuiscono direttamente alla ricarica della falda, tuttavia i dati registrati a Torino sono indicativi del regime pluviometrico regionale ed inoltre sono tra le serie storiche più complete per quanto riguarda il bacino idrogeologico della falda di Torino.

Da una prima analisi si osserva che:

- i valori di picco (mediati) sono ricorrenti e caratterizzati da simile intensità massima;
- i valori medi relativi al periodo 1985-1989 sono inferiori a quelli del periodo 1992-1997.

Dall'analisi dei dati pluviometrici relativi agli ultimi tre anni si osserva che a partire dal 1997 le precipitazioni totali annue hanno registrato un costante incremento. In tabella 3.2 si riportano i valori totali annui delle precipitazioni registrate presso l'Ufficio Idrografico di Torino nel periodo 1997/98/99/2000.

Tabella 3.2: Dati pluviometrici totali registrati presso l'Ufficio Idrografico di Torino (C.so Bolzano) e pluviometro "Torino-Italgas" (C.so Regina) della rete di monitoraggio regionale

Anni	Precipitazioni totali annue (mm/anno)
1997	578,60
1998	687,60
1999	918,20
2000 (*)	1088,00

(*) dati non ancora validati

Mettendo in dunque relazione la serie di dati storici del livello piezometrico con i valori di precipitazione, nell'ipotesi di una relazione diretta tra precipitazione e innalzamento della falda superficiale, si può notare come che un periodo di due o tre anni di precipitazioni medie-abbondanti (valori totali annui uguali o maggiori di 836mm di pioggia, media calcolata sul periodo 1913-1999) possa causare un innalzamento della falda di 1-2m.

3.4 Presenza di altri fluidi

Nei depositi che compongono il sottosuolo di Torino, anche in relazione alla loro genesi e natura, non si prevedono 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.

4. QUADRO DI RIFERIMENTO PROGETTUALE

Il lotto 5 si sviluppa in galleria naturale fra la Stazione Principi D'Acaja, esclusa, (progr. 6+717, quota progetto 232m slm, quota terreno 249m slm) e la Stazione Porta Nuova (progr. 9+616, quota progetto 223m slm, quota terreno 238m slm), fino al Pozzo Terminale (incluso), per complessivi 2899m di tratta.

Il tracciato di tale lotto ha inizio nel tratto terminale di corso Francia, sottopassa il Lotto 2 del Passante Ferroviario, attualmente in fase di realizzazione, raggiungendo piazza XVIII Dicembre per proseguire poi lungo corso Bolzano (sottopassando un parcheggio sotterraneo di recente realizzazione) e lungo il rettilineo di corso Vittorio Emanuele II, fino alla stazione di Porta Nuova.

Nel lotto in esame, è prevista la realizzazione di cinque stazioni (XVII Dicembre, Porta Susa, Vinzaglio, Re Umberto, Porta Nuova) collegate fra loro da una galleria a foro cieco scavata con TBM (tranne un breve tratto di 73.5m di lunghezza, realizzato in naturale con metodi di scavo tradizionali).

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

- n. 6 pozzi di intertratta, (P10, P11, P12, P13, P14 e P15), con sistema di sostegno dello scavo realizzato attraverso cortine di micropali, per le esigenze di ventilazione, sicurezza antincendio (accesso VV.F.) e passaggio tubazioni di servizio. Sono costituiti da un pozzo che collega la superficie (p.c.) alla galleria e da una camera più superficiale di alloggiamento degli impianti e delle prese d'aria per la ventilazione.

4.1 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 indagini eseguite nelle fasi progettuali precedenti e da indagini condotte per altri progetti.

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.

Nella zona della Stazione di Porta Nuova è stata evidenziata la presenza alla profondità di -33 da p.c. di limi argillosi riferibili alla parte superiore dei depositi lacustri e fluvio lacustri del Villafranchiano (Pleistocene Inferiore-Pliocene Superiore).

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, 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, avvalorata l'interpretazione che vede la cementazione legata al fenomeno della percolazione delle acque di infiltrazione (zona non satura).

4.2 Idrogeologia

La situazione idrogeologica relativa al Lotto 5 mostra la profondità della falda superficiale variabile da 22m (Stazione Acaja) a 15.5m (Stazione Porta Nuova) dal piano campagna (situazione relativa al livello massimo registrato nel periodo di monitoraggio febbraio 2000-aprile 2001). La direzione di deflusso sotterraneo, come evidenziato dalla carta delle isopiezometriche relativa alla campagna di misure febbraio-marzo 2000, è orientata da NO a SE (N100E) e mostra un gradiente (calcolato lungo lo sviluppo del tracciato) variabile tra 0.15% 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 (K4) ai terreni interessati dallo sviluppo del lotto.

Per quanto riguarda i depositi del Villafranchiano (alternanza di depositi limoso argillosi e livelli di ghiaia e sabbie), si indica come valore di riferimento per i depositi limosi la classe K2 (limite inferiore) con possibile variazione nella classe K1. Dalle prove edometriche realizzate nei pressi della Stazione Porta Nuova, il valore di permeabilità ottenuto è di 10^{-9} m/s.

Data la profondità dell'opera e la quota della falda superficiale, si evidenziano problemi di interferenza tra lo scavo del lotto in esame e il deflusso sotterraneo della falda per tutto lo sviluppo del lotto.

La quota di progetto, in particolare nel tratto tra la Stazione Acaja e la Stazione Vinzaglio (tra le progressive 6+880 e 7+610 e tra le progressive 7+845 e 8+135) si mantiene generalmente al di sotto della quota della falda piezometrica rilevata; nel tratto compreso tra Stazione Vinzaglio e Stazione Porta Nuova il livello della falda di riferimento si mantiene alla quota del piano rotabile.

I criteri adottati per la valutazione del livello di falda, da prendere come riferimento per la fase costruttiva e di esercizio dell'opera, sono illustrati nel seguito.

4.2.1 Il monitoraggio

Dalla fine della fase di Progettazione Definitiva è stato attivato un monitoraggio del livello di falda nei piezometri installati nella campagna di indagini dicembre 99-dicembre 2000. I risultati sono riassunti in tabelle (Allegato A).

4.2.2 Analisi dei nuovi dati

Dall'analisi dei dati del monitoraggio emerge che la superficie di falda ha registrato un innalzamento in seguito al contributo delle precipitazioni particolarmente intense della fine del 2000. A partire dai primi mesi del 2001 il livello di falda ha cominciato ad abbassarsi seguendo la naturale evoluzione stagionale del livello, già evidenziato dai dati storici.

In merito all'innalzamento del livello di falda si registra che:

- i piezometri installati nel tratto Porta Susa, C.so Bolzano/C.so Vittorio (D16, D20, S23) registrano un sollevamento del livello di falda a partire da luglio 2000;
- i piezometri in prossimità della zona di P.ta Nuova (D30 e D31) evidenziano un innalzamento più marcato rispetto sia ai nuovi punti di misura, sia rispetto a quanto finora registrato nelle serie storiche.

In conclusione, si osserva che la superficie della falda comincia a risentire dell'aumento delle precipitazioni totali. Il dato di massimo livello, riportato nelle schede del monitoraggio, ha

risentito delle precipitazioni eccezionali che hanno interessato tutto il bacino idrogeologico che alimenta la falda di Torino agli inizi di ottobre 2000. La scelta del livello di falda di riferimento per la progettazione e per la fase costruttiva, deve necessariamente tenere conto dei dati finora raccolti.

La direzione di deflusso dell'acquifero superficiale relativamente alla zona del Lotto 5 è ortogonale al tracciato della linea nel tratto compreso tra Piazza Statuto e l'incrocio Corso Bolzano/Corso Vittorio Emanuele. Lungo C.so Vittorio fino alla Stazione di Porta Nuova, la direzione di flusso è circa parallela allo sviluppo della Linea 1.

Si può quindi affermare che l'impatto maggiore, dal punto di vista idrogeologico (fenomeni di locale innalzamento del livello piezometrico sulle strutture a monte flusso) si verificherà nel tratto compreso tra Piazza Statuto e l'incrocio C.so Bolzano/C.so Vittorio Emanuele. Gli effetti di tale innalzamento saranno localizzati in corrispondenza delle opere più profonde. Questi fenomeni sono stati considerati nella definizione del livello progettuale da assumere per la falda superficiale.

4.2.3 Analisi e considerazioni sui parametri di progetto

4.2.3.1 Livello della falda di riferimento (fase costruttiva)

Nella valutazione del livello di falda da assumere per la fase di esecuzione dell'opera si devono prendere in considerazione i seguenti fattori:

- periodo di costruzione del Lotto;
- evoluzione della falda come evidenziato dal monitoraggio;
- dati pluviometrici a medio termine;
- serie storiche di piezometri ubicati in zone limitrofe (livello di falda “alta” evidenziato nel periodo 1995-1998, con particolare riferimento al livello dell'inverno 1996-1997).

Per le ragioni espresse si indica come livello di falda di riferimento, per la fase di costruzione del Lotto 5, il livello massimo registrato nel periodo di monitoraggio febbraio 2000-aprile 2001 (novembre-dicembre 2000) incrementato di +1m.

4.2.3.2 Livello della falda di riferimento progettuale

Data la mancanza di serie storiche sufficientemente complete per definire il livello della falda superficiale a lungo termine, la scelta del livello di riferimento per la fase progettuale è basata sul livello della falda storica. Tale livello risulta dunque quello della fase costruttiva incrementato di 3.5m.

Questo incremento, se da un lato prende in considerazione uno scenario non totalmente riproducibile nei tempi attuali (estesa impermeabilizzazione del territorio urbano e presenza di rete di canalizzazione delle acque di scorrimento superficiale), tiene conto dei locali fenomeni di innalzamento che l'opera può causare nel tratto compreso tra Piazza Statuto e l'incrocio C.so Bolzano/C.so Vittorio Emanuele.

Le considerazioni sui livelli della falda di riferimento sono state fatte basandosi sui dati pregressi e sui dati raccolti durante la fase di monitoraggio (febbraio 2000-aprile 2001). Eventuali variazioni delle condizioni di ricarica a monte dell'opera (diminuzione dei prelievi di acqua dalla falda superficiale) possono condizionare i margini di sicurezza assunti per la definizione dei livelli di riferimento sopra espressi.

4.3 Idrogeochimica

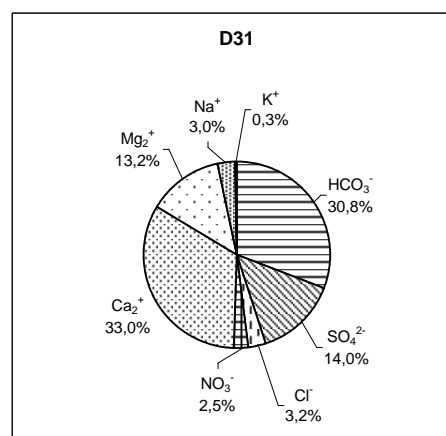
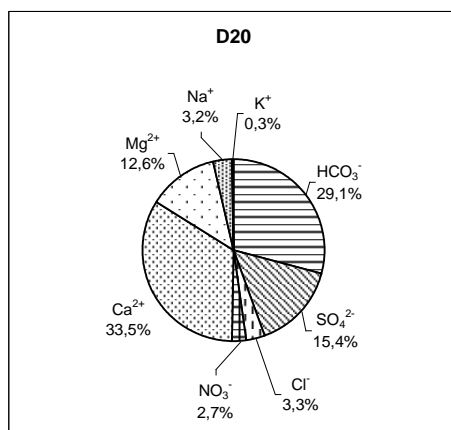
Per quanto riguarda le caratteristiche chimiche dell'acqua della falda, le analisi di laboratorio condotte su due campioni d'acqua prelevati dai piezometri D20 (Piazza XVIII dicembre) e D31 (C.so Vittorio, nei pressi della Stazione Porta Nuova), hanno permesso di determinarne la facies idrogeochimica. L'acqua in esame è un'acqua prevalentemente bicarbonato-calcica. Il valore di durezza determinato è 30°F (acqua mediamente dura) mentre il pH assume valori di 7.6.

La conducibilità elettrica misurata nei due campioni porta a classificare l'acqua come medio-minerale (valori di conducibilità rispettivamente di 732 e 695 $\mu\text{S}/\text{cm}$ per i prelievi effettuati nel piezometro D20 e D31.).

I grafici sotto riportati mostrano la ripartizione delle specie ioniche maggiori.

Grafico 4.1: Ripartizione degli anioni e cationi misurati (percentuale di meq)

D20						D31					
anioni	meq	%	cationi	meq	%	anioni	meq	%	cationi	meq	%
HCO ₃ ⁻	4,16	29,0584	Ca ²⁺	4,8	33,52892	HCO ₃ ⁻	4,59	30,82606	Ca ²⁺	4,92	33,04231
SO ₄ ²⁻	2,2	15,36742	Mg ²⁺	1,8	12,57334	SO ₄ ²⁻	2,09	14,03627	Mg ²⁺	1,969	13,22364
Cl ⁻	0,477	3,331936	Na ⁺	0,459	3,206203	Cl ⁻	0,471	3,163197	Na ⁺	0,44	2,955003
NO ₃ ⁻	0,38	2,654373	K ⁺	0,04	0,279408	NO ₃ ⁻	0,372	2,498321	K ⁺	0,038	0,255205
totale	7,217	50,41213	totale	7,099	49,58787	totale	7,523	50,52384	totale	7,367	49,47616
totale 14,316 100						totale 14,89 100					
err % 0,824253						err % 1,047683					



Dall'analisi del valore della concentrazione idrogenionica (pH), ione magnesio, solfati e azoto ammoniacale è stato valutato il grado di aggressività delle acque sul calcestruzzo, che complessivamente è inferiore alla soglia minima (definita come "debole grado di aggressività"). La tabella seguente sintetizza i valori misurati nei prelievi con i valori di riferimento (secondo le diverse norme) utilizzati.

Tabella 4.1: Specie ioniche rilevanti nella determinazione del grado di aggressività del calcestruzzo con Norme di riferimento adottate

Caratteristiche chimiche	pH	SO ₄ ²⁻ (mg/l)	NH ₄ ⁺ (mg/l)	Mg ²⁺ (mg/l)
Norme di riferimento	DIN 4030-2	EN 196-2	ISO 7150-1/2	ISO 7980
Valori soglia *	da 6,5 a 5,5	da 200 a 600	da 15 a 30	da 300 a 1000
Piezometro D20	7,61	105,7	< 0,05	22,6
Piezometro D31	7,67	100,6	< 0,05	23,9

* il limite inferiore indicato è riferito al “grado debole di aggressività” delle acque nei confronti del calcestruzzo.

Il tenore in cloruri di circa 17 mg/l indica un lungo tempo di residenza delle acque nel sottosuolo e porta a classificare le acque come “dolci”. Il valore di cloruri misurato, unitamente al chimismo delle acque di tipo non aggressivo, tende ad escludere l’azione aggressiva dei cloruri sui ferri di armamento del calcestruzzo.

Per quanto riguarda la classificazione chimica del corpo idrico sotterraneo, secondo le indicazioni presenti nel D.Lgs. 11/05/99 n.152., data la presenza rispettivamente di 13,5 µg/l (D20) e 41 µg/l (D31) di composti organo-alogenati totali (valore soglia fissato dalla normativa a 10 µg/l), la classe chimica di appartenenza è la classe 4 (impatto antropico rilevante con caratteristiche idrochimiche scadenti).

5. LE INDAGINI

5.1 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 Sogetec 1995 (F.S.),
- Campagna indagini Borio 1995 (F.S.),
- Campagne indagini Sicos 1992 (M.M.), 1981 (Comune di Torino), 1978 (Fiat Engineering),
- Campagna indagini 1987 (ATM),
- Campagna indagini Radaelli-Castellotti 1985 (R.C.C.F.),
- Indagini varie 1960-1994.

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 5 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 5.1 viene riportato l'elenco delle indagini pregresse, delle quali si è tenuto conto nella ricostruzione del modello geologico-geotecnico del lotto in esame.

Tabella 5.1: Indagini pregresse disponibili in prossimità del tracciato

Codice	Tipologia Indagine	Esecutore Indagine	Periodo Esecuz.	Profondità (m)	Qualità dell'informazione
S1	Sondaggio	Sicos	Gen-92	30,0	Bassa
S5	Sondaggio	Sicos	Feb-92	24,2	Bassa
153/1	Sondaggio	Sicos	1978-1981	20,5	Bassa
154/2	Sondaggio	Sicos	1978-1981	30,0	Bassa
177/1	Sondaggio	Sicos	1978-1981	25,8	Bassa
177/2	Sondaggio	Sicos	1978-1981	21,0	Bassa
177/3	Sondaggio	Sicos	1978-1981	25,1	Bassa
178/1	Sondaggio	Aris – Chiappa	Gen-64	52,0	Bassa
201/2	Sondaggio	Sicos	1978-1981	30,1	Bassa

Codice	Tipologia Indagine	Esecutore Indagine	Periodo Esecuz.	Profondità (m)	Qualità dell'informazione
202/5	Sondaggio	Sicos	1978-1981	20,1	Bassa
202/6	Sondaggio	Sicos	1978-1981	10,2	Bassa
202/7	Sondaggio	n.d.	Mag-64	30,0	Bassa
202/9	Sondaggio	n.d.	-	47,0	Bassa
202/3	Sondaggio	n.d.	n.d.	30,0	Bassa
202/4	Sondaggio	Sicos	1978-1981	20,2	Bassa
203/9	Sondaggio	n.d.	n.d.	41,2	Bassa
203/1	Sondaggio	Pavesio	1960	39,0	Bassa
203/2	Sondaggio	Aris – Chiappa	Mag-59	50,0	Bassa
203/6	Sondaggio	Sicos	1978-1981	15,0	Bassa
RCR24	Sondaggio	Radaelli-Castellotti	Feb-85	20,0	Alta
RCR25	Sondaggio	Radaelli Castellotti	Feb-85	20,0	Alta
S3ML	Sondaggio	n.d.	1987	22,9	Alta
S4ML	Sondaggio	n.d.	1987	26,2	Alta
SC2	Sondaggio	Abrate	1994	20,0	Alta
SN1	Sondaggio	Sogetec	1995	40,0	Media
SN2	Sondaggio	Sogetec	1995	40,0	Media
SN3	Sondaggio	Sogetec	1995	40,0	Media
SN4	Sondaggio	Sogetec	1995	40,0	Media
DAC1	Diagrafia	Sogetec	1995	40,0	Alta
DAC2	Diagrafia	Sogetec	1995	40,0	Alta
DAC3	Diagrafia	Sogetec	1995	40,0	Alta
DAC4	Diagrafia	Sogetec	1995	40,0	Alta
DAC5	Diagrafia	Sogetec	1995	40,0	Alta
E3ML	Diagrafia	n.d.	1987	30,0	Alta
E4ML	Diagrafia	n.d.	1987	28,0	Alta
I2	Diagrafia	n.d.	1987-1988	27,0	Media
I3	Diagrafia	n.d.	1987-1988	30,0	Media
T17	Diagrafia	n.d.	1987-1988	26,0	Media
T18	Diagrafia	n.d.	1987-1988	26,0	Media
T30	Diagrafia	n.d.	1987-1988	25,0	Media

Codice	Tipologia Indagine	Esecutore Indagine	Periodo Esecuz.	Profondità (m)	Qualità dell'informazione
PO1	Pozzo geognostico	Borio	1995	16,8	Alta
PO6	Pozzo geognostico	Borio	1995	16,5	Alta
PO2	Pozzo geognostico	Borio	1995	20	Alta
5196/2	Pozzo	n.d.	1967	45	Media
I2426/1	Pozzo	s.d.	1959	50	Media

5.2 Indagini per il progetto definitivo ed esecutivo

Le nuove indagini eseguite nel periodo dicembre 1999-dicembre 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 5.2; in tabella sono evidenziate le indagini ricadenti nel lotto in esame.

Tabella 5.2: Indagini in sito eseguite nel periodo dicembre 1999 - aprile 2000

Codice Sondaggio	Prof.	N_{SPR}	Profondità Falda	Campioni Rimaneg.	Strument. in foro	Prova Lefranc	Indagine Relativa a lotto 5
	(m)	(n° prove)	(m)	(n°)	(-)	(profondità)	(-)
D1	15	-	Assente	-	p.t.a.	-	-
D3	15	-	-	-	p.t.a.	-	-
D4	25	-	-	-	Tube ABS	-	-
D4bis	20	-	-	-	Tube ABS	-	-
D4ter	20	-	-	-	-	-	-
D6	20	-	-	-	p.t.a.	-	-

Codice Sondaggio	Prof.	N_{SPT}	Profondità Falda	Campioni Rimaneg.	Strument. in foro	Prova Lefranc	Indagine Relativa a lotto 5
D8	25	-	-	-	-	-	-
D11	25	-	Assente	-	p.t.a.	-	-
D12	22	-	-	-	p.t.a.	-	-
D15	25	-	-	-	-	-	-
D16	25	-	-	-	p.t.a.	-	Sì
D18	30	-	-	-	Tube ABS	-	Sì
D19	30	-	-	-	Tube ABS	-	Sì
D20	25	-	19.6	-	p.t.a.	-	Sì
D22	25	-	-	-	Tube ABS	-	Sì
D23	25	-	-	-	Tube ABS	-	Sì
D27	25	-	-	-	Tube ABS	-	Sì
D28	25	-	-	-	Tube ABS	-	Sì
D30	20	-	17.7	-	p.t.a.	-	Sì
D31	25	-	18.3	-	p.t.a.	-	Sì
D32	20	-	-	-	Tube ABS	-	Sì
D33	20	-	-	-	Tube ABS	-	Sì
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	-
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	-
S13	20	6	Assente	-	p.t.a.	19.0m-19.5m	-
S15	20	6	Assente	6	p.t.a.	17.5m-18.0m	-
S16	25	8	Assente	8	p.t.a.	19.5m-21.0m	-
S18	22	7	21.2	6	p.t.a.	21.0m-22.0m	-
S23	40	8	20.7	13	p.t.a.	20.0m-20.5m	Sì
S25	25	8	18	8	Tube ABS	20.5m-21.0m	Sì
S26	20	6	Assente	5	Tube ABS	19.5m-20.0m	Sì
S27	20	6	19.5	6	p.t.a.	19.5m-20.0m	Sì

Codice Sondaggio	Prof.	N _{SPT}	Profondità Falda	Campioni Rimaneg.	Strument. in foro	Prova Lefranc	Indagine Relativa a lotto 5
PZ1	1.20	-	-	1	-	-	-
PZ2	1.15	-	-	1	-	-	-
PZ3	0.60	-	-	1	-	-	-
PZ4	1.90	-	-	1	-	-	-
PZ5	1.95 (m)	- (n° prove)	- (m)	1 (n°)	- (-)	- (n°)	- (-)
P5	21.70	-	21.7	3 ⁽¹⁾ + 16 ⁽²⁾	-	-	Sì
P7	17.3	-	17.4	3 ⁽¹⁾	-	-	Sì
CR.H. 3: D18-D19	-	-	-	-	-	-	Sì
CR.H. 4: D22-D23	-	-	-	-	-	-	Sì
CR.H. 5: D27-D28-S25	-	-	-	-	-	-	Sì
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 m³ 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 5 sono state eseguite le indagini riportate in Tabella 5.3., in cui sono mostrati i dati sintetici delle indagini eseguite.

Tabella 5.3: Indagini in sito eseguite sul lotto 5 nel periodo giugno 2000 – dicembre 2000

Codice Sondaggio	Prof. (m)	N _{SPT} (n° prove)	Profondità Falda (m)	Campioni Rimaneg. (n°)	Strument. in foro (-)	Prova Lefranc (n°)
D41	25	-	-	-	-	-
S28	45	13	16.9	-	p.t.a.	-

D: diagrafia; S: sondaggio; p.t.a.: piezometro a tubo aperto

In sintesi le indagini in sito, eseguite nel periodo dicembre 1999-dicembre 2000 relativamente al lotto 5, sono le seguenti:

- 5 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, aventi diametro di 101 mm e profondità comprese tra 20 e 45m, con esecuzione di prove penetrometriche in foro (Standard Penetration Test) ogni 3m, esecuzione di 4 prove Lefranc ed installazione di 3 piezometri a tubo aperto;
- 13 sondaggi geognostici a distruzione di nucleo con registrazione in continuo dei parametri di perforazione (diagrafia), aventi profondità variabile tra 20 e 25m, con installazione di 4 piezometri del tipo a tubo aperto per il monitoraggio della eventuale falda;
- 2 pozzi geognostici praticabili aventi diametro di scavo di 2.4m e profondità di 21.7m e 17.3m, finalizzati 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 prove di carico su piastra in direzione verticale e orizzontale.

Per quanto riguarda l'ubicazione planimetrica dei punti d'indagine si rimanda alla tavola "Ubicazione delle indagini geognostiche" alla scala 1:2000 (MTL1T1A5EGEOGN3S001).

5.3 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 8 analisi granulometriche, eseguite su campioni prelevati durante i carotaggi e 6 analisi granulometriche, eseguite su macrocampioni prelevati nei pozzi P5 e P7; sono state, inoltre, realizzate 7 prove di compressione uniassiale su campioni di ghiaia con sabbia e ciottoli con grado di cementazione elevato, prelevati nei pozzi P5 e P7. Per la caratterizzazione geotecnica dei terreni, sono stati utilizzati i risultati derivanti, oltre che dal lotto in esame, dagli altri lotti.

5.4 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. 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 5.4 viene fornita una sintesi delle tipologie e dello scopo delle prove di laboratorio eseguite.

Tabella 5.4: 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
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

6. RISULTATI DELLE INDAGINI E INDIVIDUAZIONE DELLE UNITÀ GEOTECNICHE

6.1 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 nei pozzi geognostici praticabili P5 e P7, 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.

6.2 Analisi dei dati

6.2.1 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:

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

6.2.2 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 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;

s 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 gli indici 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 particolar modo della $C\%$, si è quantificata l'influenza della cementazione sulle caratteristiche geotecniche dei terreni.

In considerazione dell'importanza che assume la presenza degli orizzonti cementati ai fini della caratterizzazione dei terreni, in Allegato B (Figure 1-18) 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 crescenti; 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.

Analogamente a quanto è stato fatto per la cementazione, in Allegato B (Figure 19-36) sono presentati i diagrammi di frequenza percentuale dei valori di E_s che superano il limite di scavabilità con benna dato dalla equazione (2) per ogni singola diagrafia, suddivisa in intervalli di 0.5m-2m-4m-8m lunghezza totale diagrafia. 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).

Confrontando, infine, il livello di cementazione descritto nelle stratigrafie dei sondaggi a carotaggio continuo con i dati di energia specifica, E_s , di diagrafie vicine, sono stati ricavati intervalli di E_s corrispondenti ai livelli di cementazione descritti. Tali correlazioni sono riportate in Tabella 6.1.

Tabella 6.1: Correlazione tra E_s e livelli di cementazione

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

6.2.3 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 5 sono stati realizzati i pozzi geognostici P5 e P7, spinti alle profondità di 21.7m e 17.3m.

Nell'Allegato B (Foto 1-4) sono visibili alcuni esempi del materiale incontrato in tali pozzi.

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.

Nei pozzi è stato possibile avere un riscontro diretto della dimensione dei ciottoli, altrimenti solo stimabile dall'esame delle carote estratte durante i sondaggi.

Nei pozzi P5 e P7 sono state eseguite sei prove di carico su piastra (2 in direzione verticale e 5 in direzione orizzontale) tra la profondità di 14 e 21m nel pozzo P5 e tra 15 e 17m nel pozzo P7, 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.

6.2.4 Prove penetrometriche dinamiche

Le analisi statistiche eseguite sui valori di N_{spt} rilevati nel lotto in esame relativamente ai depositi fluvio-glaciali sono sintetizzate nelle Figure 49-50 (Allegato B). Da esse 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 e/o per l'elevato addensamento; le misure non sono dipendenti dalla

profondità ma presentano valori caratteristici a seconda del grado di cementazione/addensamento.

Sono state condotte prove SPT anche nei depositi lacustri e fluvio-lacustri che hanno registrato per la maggior parte delle misure “rifiuto”. Una sola prova, eseguita al tetto dello strato, al passaggio con le ghiaie, ha fornito un valore di N_{spt} pari a 43.

6.2.5 Prove di carico su piastra

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 nel pozzo P7.

I moduli di deformabilità secanti E_{sec} , calcolati nei vari cicli di carico, sono riportati nelle Tabelle 1-9 (Allegato B); 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 6.2, mentre il loro andamento con il variare della profondità e della cementazione è riportato nella Figura 6.1.

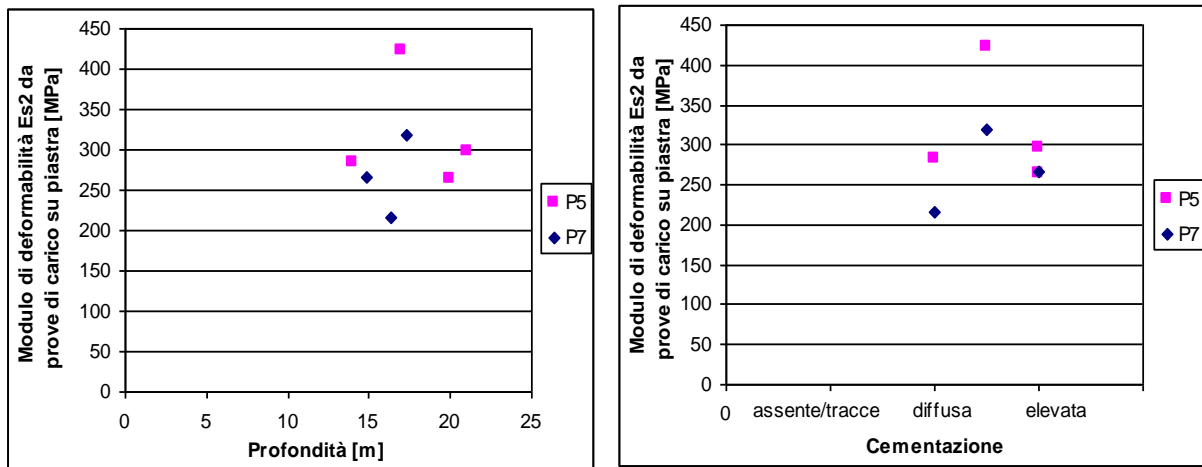
Tabella 6.2: Valori del modulo di deformabilità secante da prove di carico su piastra, calcolati dalla seconda fase di carico e di scarico.

Pozzo	Profondità (m)	2° carico	2° scarico	Modalità di prova
		E_{sec2c}	E_{sec2s}	
		(MPa)	(MPa)	
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	Orizzontale
	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 6.1: 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 e mostrano una tendenza ad aumentare passando da un grado di cementazione diffusa ad elevata.

6.2.6 Indagini tomografiche sismiche

Le indagini sismiche sono state condotte con metodologia tomografica *cross-hole* su C.so Francia (tra i fori D18 e D19). I risultati sono stati utilizzati principalmente per la ricostruzione stratigrafica-geotecnica della zona della sezione tomografica .

Le lunghezze dei fori utilizzati per l'indagine tomografica sono di 25m e la distanza compresa tra la coppia di fori è di 13m. L'indagine è stata quindi estesa nella sezione di terreno compresa tra la coppia di fori.

I fori di sondaggio sono stati rivestiti e riempiti d'acqua e un foro è stato utilizzato per indurre le perturbazioni sismiche mediante l'utilizzo di un fucile sismico da foro, funzionante con cartucce calibro 8 di tipo industriale, mentre nell'altro foro sono stati calati i sensori di ricezione.

Le indagini sono state condotte utilizzando una configurazione con punti di energizzazione in foro e di misura sia in foro e sia in superficie, interpretando i dati con tecnica tomografica al fine di produrre immagini bidimensionali della distribuzione di velocità sismiche nel volume indagato. Per ogni perturbazione sismica generata nel primo foro viene calcolato il tempo impiegato per raggiungere ogni sensore di ricezione, avendo così una rete di raggi sismici che attraversano lo spazio compreso fra le due verticali di indagine.

Questo spazio, attraverso un apposito programma di elaborazione, è stato suddiviso per passi successivi in celle quadrate di dimensioni minime del lato di 0.25m e per ciascuna di esse è stato calcolato il tempo necessario all'impulso sismico per attraversarla. Questa procedura ha reso possibile ricostruire la velocità sismica del mezzo attraversato. Poiché quest'ultima è proporzionale a diversi fattori tra i quali la densità, lo stato tensionale della formazione, l'eventuale grado di fratturazione, è possibile dedurre una distribuzione dei vari materiali presenti. Tale indagine è stata, quindi, utilizzata principalmente per la ricostruzione stratigrafica-geotecnica delle zone delle sezioni tomografiche.

In questa indagine nel foro utilizzato come sorgente sono stati effettuati “tiri” ogni metro tra le quote di -25m e di -8m. Nel foro adiacente sono stati posti 12 sensori (idrofonici), equispaziati di 1m; dopo una serie di tiri i sensori sono stati traslati di +1m, al fine di avere un ricoprimento con una spaziatura di 1m.

In superficie, lungo la congiungente i fori, al fine di migliorare la definizione delle velocità dello strato più superficiale, sono stati posizionati 12 geofoni equamente interspaziati.

Il sismografo utilizzato per l’acquisizione dati è uno Strataview a 24 canali della Geometrics (USA); il campionamento è avvenuto ogni 0.01 millisecondi.

Attraverso l’interpretazione dei valori di energia specifica provenienti dalle diagrafie di perforazione sono state individuate delle classi di materiale contraddistinte da diversi gradi di cementazione. Si è cercato quindi di stabilire delle analogie tra i campi di velocità di propagazione sismica ottenuti e il grado di cementazione dei materiali caratterizzati dalle velocità in oggetto. Si individuano cinque campi di velocità associati ad altrettante classi di cementazione:

330-600 m/s	possibili vuoti;
600-1400 m/s	materiale da sciolto a debolmente cementato o addensato;
1400-2000 m/s	materiale da debolmente a mediamente cementato;
2000-2500 m/s	materiale con cementazione da media ad elevata;
>2500 m/s	materiale con cementazione elevata.

L’analisi dei campi di velocità incontrati nella parte centrale della sezione (tra le ascisse +2m e +10m) per tutta la profondità indagata, delinea valori compresi tra 900 m/s e 2000 m/s, che sono riferibili al terreno naturale in posto. In generale si hanno valori medi compresi tra 900 e 1500 m/s fino ai -15m, e valori di velocità che aumentano (velocità medie comprese tra 1600 e 2800 m/s) tra i -15m e -25m. La distribuzione dei valori (zone di minimo intorno a 650 m/s e di massimo intorno ai 3500 m/s) rivela talvolta marcati gradienti di velocità, probabilmente dovuti ad interventi di tipo antropico che hanno variato le condizioni di addensamento del materiale indagato (ad esempio le fondazioni del palazzo adiacente il foro D18) oppure, nel caso di anomalie a bassa velocità, a lenti di materiale a minore consistenza.

6.2.7 Indagini tomografiche elettriche

Le indagini elettriche sono state condotte con metodologia tomografica *cross-hole* su due siti, sul piano stradale di C.so Vittorio Emanuele, rispettivamente all’incrocio con C.so Re Umberto (due sezioni tra i fori D27 e D28 e tra i fori D27 e S25) e all’incrocio con C.so Vinzaglio (tra i fori D22 e D23). Le indagini condotte forniscono delle sezioni tomografiche nelle quali la grandezza visualizzata è la resistività elettrica reale, in particolare la sua distribuzione nei materiali compresi tra i fori di indagine. Poiché quest’ultima è proporzionale a diversi fattori tra i quali la densità, la granulometria, lo stato di addensamento (specie in terreni alluvionali) della formazione, la presenza di acqua e quindi il grado di saturazione, è possibile dedurre una distribuzione dei vari materiali presenti.

Le profondità dei fori utilizzati per le indagini tomografiche sono di 25m per tutte e tre le coppie di fori. La distanza compresa tra le tre coppie di fori è di 26m e 36m (per corso Re Umberto) e di 27m (corso Vinzaglio). Ciascuna indagine è stata quindi estesa nella sezione di terreno compresa tra le coppie di fori.

I fori di sondaggio sono stati rivestiti e per ciascuno dei tubi sono stati installati e resi solidali, esternamente, al tubo, degli elettrodi tali da permettere l'indagine tomografica elettrica. Gli elettrodi, interspaziati 1 m, sono stati opportunamente collegati con cavi multipolari che giungono alla superficie.

In superficie sono stati utilizzati due elettrodi di riferimento, equidistanti tra di loro e tra i due fori, al fine di utilizzare una tecnica di indagine polo-polo modificata. Tale tipo di metodologia di acquisizione ha permesso di avere dipoli di energizzazione i più ampi possibili (ottimizzando il rapporto segnale/rumore e la risoluzione ottenibile), utilizzando tutti gli elettrodi in foro in combinazione sia come trasmettitori, sia come ricevitori. Al fine di verificare le resistenze di contatto agli elettrodi e il rumore locale, per ciascuna stringa di elettrodi in ciascun foro, sono state eseguite anche misure Wenner. Per ciascuna sezione sono stati utilizzati circa 580 combinazioni di misura nello spazio compreso fra i due fori.

Questo spazio, attraverso un apposito programma di elaborazione ad elementi finiti capace di produrre un'inversione completa, è stato suddiviso per passi successivi in celle trapezoidali a sub-elementi triangolari. L'inversione è stata condotta col metodo di Occam con doppio parametro di stabilizzazione.

Lo strumento utilizzato per l'acquisizione dati è un SISCAL R2 della IRIS Instruments (Francia) a 64 canali con commutazione distribuita su due scatole di derivazione a 16 elettrodi ciascuna per ogni foro.

Sono state quindi ricercate analogie tra i campi di resistività elettrica incontrati e il grado di cementazione dei materiali, ottenuto attraverso l'interpretazione dei valori di energia specifica provenienti dalle diagrafie. Occorre sottolineare che la variazione di resistività elettrica, anche in situazioni temporali diverse, dipende strettamente dall'umidità presente e dal grado di saturazione in acqua dei materiali; perciò valutazioni sul grado di cementazione e sul fattore di formazione derivante dalla formula di Archie sono da analizzare con cura, specie in formazioni al limite tra alluvionale e litoide come nel caso in esame. È comunque possibile individuare quattro campi di resistività elettrica associati ad altrettante classi di cementazione:

≤80-100 Ohm.m	materiale da sciolto a debolmente cementato o addensato e zone di falda;
80-200 Ohm.m	materiale da debolmente a mediamente cementato;
200-500 Ohm.m	materiale con cementazione da media ad elevata;
>500 Ohm.m	materiale con cementazione elevata.

6.2.7.1 Sezione di corso Vittorio incrocio con corso Re Umberto

L'analisi dei valori di resistività elettrica incontrati nelle sezioni indagate delinea valori compresi tra 30 Ohm.m e 600 Ohm.m, riferibili al terreno naturale in posto. Nelle due tomografie prodotte si rilevano 4 zone associabili a variazioni del materiale e della matrice lungo le sezioni indagate: una zona superficiale che depurata dei disturbi dovuti alla sede tramviaria (rotaie e rilevato) ed alle fondazioni di edifici contigui rivela un materiale ghiaioso in matrice sabbioso limosa, non cementato (primi 8m di materiale); una zona (tra gli -8m e i -18m) di materiale molto addensato; una zona di falda con valori compresi tra i 60 Ohm.m e 100 Ohm.m; una zona al fondo della sezione indagata con aumento del gradiente di resistività che prelude ad un passaggio ad una zona maggiormente cementata oltre i -21m. Tuttavia la

consistenza dei valori di resistività elettrica nelle zone di falda può trarre in inganno sul grado di consistenza del materiale stesso: a parità di consistenza il grado di saturazione incide sulla diminuzione dei valori di resistività elettrica.

6.2.7.2 Sezione di corso Vittorio incrocio con corso Vinzaglio

L'analisi dei valori di resistività elettrica incontrati nella sezione indagata delinea valori comunque compresi tra 50 Ohm.m e 650 Ohm.m, riferibili al terreno naturale in posto. Nelle due tomografie prodotte si rilevano 4 zone associabili a variazioni del materiale e della matrice associata lungo le sezioni indagate: una zona superficiale che depurata dei disturbi dovuti alla sede tramviaria (rotaie e rilevato) e ad un probabile sottoservizio presente entro i primi 5m di profondità rivela un materiale ghiaioso in matrice sabbioso limosa fino a -8-9m, debolmente cementato; una zona (tra gli -8m e i -20m) di materiale molto addensato (valori di resistività tra 200 Ohm.m, nella parte adiacente il foro D22, e 650 Ohm.m verso il foro D23); una zona a maggior umidità e/o saturazione con caratteristiche simili alla zona di falda nelle sezioni precedenti con valori compresi tra i 60 Ohm.m e 100 Ohm.m; una zona al fondo della sezione indagata con aumento del gradiente di resistività che prelude ad un passaggio ad una zona mediamente addensata oltre i -21m. Può anche in questo caso sussistere la condizione per cui a parità di consistenza, il grado di saturazione possa incidere sulla diminuzione dei valori di resistività elettrica.

6.2.8 Individuazione di tratte a caratteristiche omogenee (con riferimento alla cementazione)

Sulla base dell'elaborazione dei risultati delle prove in sito, e in particolar modo delle diagrafie e delle prove SPT, indagini condotte in maniera uniformemente distribuita lungo il tracciato del lotto, sono state individuate quattro tratte a comportamento uniforme.

La suddivisione in tratte e i valori caratteristici, per ciascuna tratta, di Es e Nspt sono riportati in Tabella 6.3 (per l'elaborazione statistica si rimanda alle Figure da 37 a 48 per i dati di energia specifica e alle figure da 49 a 50 per i dati di Nspt, in Allegato B).

Tabella 6.3: Individuazione delle tratte a comportamento uniforme lungo il tracciato

Tratta	Profondità [m]	Es [MJ/m ³]			Nspt
		min	med	max	intervallo rappresentativo
Stazione P. D' Acaja (inclusa)- Zona Passante Ferroviario	5 – 30	50	142	252	65-75
Zona Passante Ferroviario- Stazione Vinzaglio (inclusa)	5-25	113	260	356	80-90
	25-40	49	154	254	-
Stazione Vinzaglio (esclusa) - Stazione Porta Nuova (esclusa)	5-25	61	164	276	70-80
Stazione Porta Nuova (inclusa)- fine lotto	5-20	76	331	548	80-90

In riferimento ai valori riportati in Tabella 6.3 si può associare a ciascuna tratta un livello di cementazione:

- Stazione P. D'Acaja (inclusa) - Zona Passante Ferroviario: il livello di cementazione medio è definibile tra assente e in tracce, con punte di cementazione diffusa;
- Zona Passante Ferroviario - Stazione Vinzaglio (inclusa): per profondità fino a 25m il livello di cementazione medio è definibile tra diffuso ed elevato; da circa 25m in poi il livello di cementazione medio è definibile da in tracce a diffuso, con livelli minimi di cementazione assente; il tratto di 300m prima della Stazione Vinzaglio (inclusa) è caratterizzato da cementazione diffusa ed elevata per uno spessore totale superiore a 30m. La diagrafia D22 ha fatto registrare valori elevati di energia specifica e pertanto non è stata considerata nelle elaborazioni statistiche, ma il dato più elevato di indice di cementazione è stato segnalato sul profilo geotecnico;
- Stazione Vinzaglio (esclusa) - Stazione Porta Nuova (esclusa): il livello di cementazione medio è definibile tra in tracce e diffuso;
- Stazione Porta Nuova (inclusa) - Fine lotto: il livello di cementazione medio è definibile tra diffuso ed elevato con livelli minimi di cementazione di in tracce-assente.

Il sondaggio S28 eseguito in prossimità di P.Nuova ha evidenziato la presenza dei depositi lacustri e fluvio-lacustri (Villafranchiano) a 33.5m di profondità.

6.2.9 Prove di laboratorio

6.2.9.1 Analisi di caratterizzazione fisica dei terreni

I dati riportati in Tabella 10 (Allegato B) 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, per i terreni presenti fino a 33m di profondità, si è osservato che:

- nell'insieme (trascurando 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 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, IP, della frazione fine è minore di 11.2 (materiale da non plastico a poco plastico); tale valore, insieme alle percentuali massime del limite liquido, w_L , e del limite plastico, w_p , è relativo a campioni prelevati in prossimità della superficie (terreno rimaneggiato) ed è quindi da considerare significativo sono della porzione di terreno più superficiale.

In Tabella 6.4 sono riassunti i valori ricavati dalle analisi granulometriche eseguite su campioni prelevati, esclusivamente nei sondaggi (Figura 51 dell'Allegato B), lungo l'intero tracciato mentre nella Tabella 6.5 sono relativi alle analisi eseguite su macrocampioni prelevati nei pozzi P1, P2, P5 e P7 (Figura 52 dell'Allegato B).

Tabella 6.4: 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
w _l	8.9	32.5
w _p	11.8	22.5
IP	0.0	11.2

Tabella 6.5: 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

Le caratteristiche fisiche dei terreni coerenti campionati nel sondaggio S28, appartenente al lotto in esame, sono sintetizzate nella Tabella 6.6. Da esse si ricava che il materiale è definibile come un limo argilloso deb. sabbioso, secondo la classificazione A.G.I., 1977 (CL secondo la USCS e A7-6, secondo la AASHTO), da poco plastico a plastico e consistenza da semisolido a plastico.

Tabella 6.6: Sintesi caratteristiche fisiche dei terreni coerenti campionati dal sondaggio S28

Ciottoli [%]	Ghiaia [%]	Sabbia [%]	Limo [%]	Argilla [%]	γ_n [kN/m ³]	γ_d [kN/m ³]	w _n [%]	w _l [%]	w _p [%]	IP [%]
0.0	0.0	7.9	75.6	16.5	20.16	16.28	23.81	40.18	22.89	17.29

6.2.9.2 Prove di resistenza meccanica

Dallo scavo del pozzo P5 sono stati estratti blocchi di materiale cementato, da cui sono stati ricavati campioni per prove di compressione uniassiale.

I risultati delle 7 prove di compressione monoassiale su campioni ricavati dal pozzo P5 rilevano che il terreno cementato è dotato di un valore massimo di C_o pari a 10.7MPa. I valori medi di resistenza e deformabilità tangente e secante calcolati sui campioni provenienti da tutti i pozzi lungo il tracciato, sono riportati in Tabella 6.7.

Tabella 6.7: Valori statistici dei risultati delle prove di compressione monoassiale su materiale cementato

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

Le prove meccaniche condotte sul materiale coerente campionato dal sondaggio S28 consistono in una prova triassiale non drenata, UU, che ha fornito un valore della coesione non drenata, c_u , pari a 331.5kPa, una prova a compressione semplice, ELL, che ha fornito un valore della coesione non drenata, c_u , pari a 82.4kPa. Poiché le condizioni di saturazione della prova ELL non sono ben definite, il risultato di c_u fornito è considerato solo come valore indicativo. E' stata inoltre condotta una prova edometrica che ha fornito un valore di modulo edometrico, M , variabile a seconda dell'intervallo di carico tra 16MPa e 96MPa, con una misura del grado di sovraconsolidazione, OCR, di 2.1, corrispondente ad una pressione di preconsolidazione σ_p' di 1260kPa.

La Tabella 10 (Allegato B) riporta i risultati a sintesi di tutte le prove eseguite.

6.3 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 cinque unità geotecniche tipo in corrispondenza del lotto 5; le unità vengono descritte e caratterizzate nel seguito.

6.3.1 Unità 1: terreno superficiale

Rappresenta l'orizzonte superiore del profilo stratigrafico e si presenta con potenza variabile da un minimo di 1m ad un massimo di circa 5m. 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 (cfr. Figura 53, Allegato B):

Caratteristiche	Min.	Max.	Media
Ciottoli [%]	0.0	18.6	6.2
Ghiaia [%]	5.6	60.6	44.3
Sabbia [%]	20.8	42.7	30.3
Fine [%]	4.4	70.0	19.2
w_l	23.8	32.5	29.8
w_p	18.3	22.5	20.8
IP	5.4	11.2	9.0

Secondo la classificazione AASHTO 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.

6.3.2 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 da sciolte a debolmente cementate con presenza di ciottoli di dimensione pluridecimetrica, questa unità si ritrova nel tratto iniziale in corrispondenza della stazione Principi D'Acaja, per poi posizionarsi immediatamente al di sotto dell'unità 3 fino a circa la stazione Vinzaglio. Oltrepassata quest'ultima stazione si reincontra al di sotto dell'unità 1 fino alla fine del lotto.

L'unità è caratterizzata da una densità medio elevata e/o da una cementazione che nei sondaggi 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 nella zona compresa tra Stazione Vinzaglio (esclusa) e Stazione Porta Nuova (esclusa).

I campioni rimaneggiati prelevati in corrispondenza di tale unità dai fori di sondaggio indicano le seguenti caratteristiche fisiche (cfr. Figura 53, Allegato B):

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
w _l	12.9	29.0	19.3
w _p	13.5	19.9	16.3
IP	0.2	9.1	3.2

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

Questa unità è presente nella parte iniziale del lotto subito dopo la stazione D'Acaja, inferiormente all'unità 2 e con spessore massimo determinato di 30m circa, e sotto l'unità 4 fino a 200m dopo la stazione Porta Susa. Dalla stazione Vinzaglio fino a Porta Nuova si incontra al di sotto dell'unità 2.

L'unità è caratterizzata da una densità elevata e/o da una cementazione definibile da debole a media. Evidenze della cementazione si sono avute come 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 a 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 dai sondaggi di tale unità indicano le seguenti caratteristiche fisiche (cfr. Figura 53, Allegato B):

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
w _l	8.9	21.7	17.6
w _p	-	-	11.8
IP	-	-	6.9

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

Questa unità si presenta in modo praticamente continuo da poco prima della Stazione XVIII Dicembre fino a stazione Vinzaglio, al di sotto dell'unità 1 raggiungendo uno spessore di 34m. Il materiale è caratterizzato da valori di E_s generalmente compresi tra 210 e 280MJ/m³, con punte superiori. Questi valori di E_s sono dovuti alla densità elevata e/o ad una percentuale di cementazione $C_{\%}$ compresa generalmente tra 50 e 75% descritta come cementazione da diffusa ad elevata con locali superamenti di tale soglia.

I campioni rimaneggiati prelevati dai sondaggi in corrispondenza a tale unità indicano le seguenti caratteristiche fisiche (cfr. Figura 53, Allegato B):

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
w_l	14.9	26.7	19.3
w_p	13.6	20.1	16.5
IP	0.0	7.4	3.0

6.3.5 Unità 5: limo argilloso debolmente sabbioso

Questa unità è stata incontrata nelle indagini eseguite in prossimità della stazione XVIII Dicembre (sondaggio 5196/2) a 38m di profondità, ed in prossimità della stazione Porta Nuova ad una profondità variabile tra 30.5m ed 33.4m (sondaggi I2426/1 e S28, rispettivamente).

Tale unità, che si ritrova inferiormente ai depositi fluvioglaciali, si presenta con una tipica colorazione grigio azzurra (il passaggio con le ghiaie, per un metro circa, è di colore nocciola passante al grigio) ed un'elevata consistenza. E' caratterizzata da 92% di fine (con il 76% di limo e il 16% di argilla). Le prove in sito tipo SPT hanno fatto registrare un "rifiuto", ed una misura di N_{spt} pari a 43, eseguita al passaggio tra il deposito superficiale e il substrato.

Il materiale risulta sovraconsolidato con un grado di sovraconsolidazione di $OCR=2.1$, secondo quanto ottenuto da prova edometrica eseguita.

Uno studio realizzato specificamente per la caratterizzazione dei terreni di Torino (Bottino & Civita, 1986) fornisce intervalli dei valori delle caratteristiche geotecniche del substrato ricavati dall'elaborazione di prove in sito e in laboratorio e riportati in Tabella 6.8.

Il materiale campionato dal sondaggio S28 e sottoposto a prove di laboratorio ha fornito dei parametri che non si discostano da quelli indicati in letteratura.

Tabella 6.8: Confronto delle caratteristiche geotecniche ricavate da letteratura e misurate con prove eseguite per il progetto in esame

Caratteristiche geotecniche	Bottino & Civita, 1986				Da prove di laboratorio su campioni S28
	Min	Media	Dev.st.	Max	
γ_d [kN/m ³]	13.8	15.5	0.1	22.6	16.28
γ_n [kN/m ³]	18.5	19.4	19.4	20.0	20.16
w_n [%]	23.0	25.8	2.4	34.0	23.81

n [%]	40.4	42.4	1.4	45.0	-
IP [%]	4.0	12.3	4.9	18.2	17.29
w _l [%]	28.9	41.8	5.4	49.2	40.18
w _p [%]	21.0	29.5	3.5	37.6	22.89
φ' [°]	14.0	26.0	6.2	34.0	-
c' [kPa]	4.0	20.7	8.0	37.0	-
N _{SPT}	30.0	43.0	13.0	70.0	(43)

dove:

- γ_n : peso di volume naturale;
 γ_d : peso di volume del secco;
 w_n : contenuto d'acqua naturale;
 w_l : limite liquido;
 w_p : limite plastico;
IP : indice plastico;
 ϕ' : angolo di attrito efficace;
 c' : coesione efficace;
 (): unico valore misurato.

7. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

7.1 Caratterizzazione geotecnica delle unità individuate nei depositi fluvioglaciali

Le caratteristiche principali dei terreni incontrati lungo il tracciato nei depositi fluvioglaciali 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 per i materiali granulari l'individuazione delle unità geotecniche i cui parametri caratteristici di resistenza e di deformabilità sono riassunti in Tabella 7.1.

Per quanto relativo alle caratteristiche dell'unità 5, incontrata solo in corrispondenza al lotto in oggetto, le risultanze della caratterizzazione geotecnica vengono illustrate nei capitoli seguenti.

Tabella 7.1: Parametri di resistenza e deformabilità per le unità geotecniche riconosciute nei depositi fluvioglaciali

Unità e descrizione	C _% (%)	Dr (%)	γ _n (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_n : peso di volume naturale;
 E : modulo di deformabilità;
 ν' : coefficiente di Poisson;
 φ' : angolo di attrito efficace;
 c' : coesione efficace;
 σ_n' : tensione normale sul piano di rottura.

N.B: 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 7.1 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.

Per il coefficiente di spinta a riposo k₀ è stata considerata l'espressione seguente, valida per terreni normal-consolidati (Jacky, 1944, in Lancellotta, 1987):

$$k_0 \approx 1 - \sin \phi'$$

7.2 Caratterizzazione geotecnica del complesso del Villafranchiano (unità 5)

La parametrizzazione geotecnica dell'unità 5 (limo argilloso debolmente sabbioso) è stata condotta sulla base dell'elaborazione dei risultati delle prove (in sito e di laboratorio) eseguite per il progetto in esame e delle indicazioni provenienti dalla letteratura per materiali analoghi, in contesti simili.

- Caratterizzazione fisica

Dall'analisi dei risultati delle prove di caratterizzazione fisica, confermati dai dati presenti in letteratura (si rimanda alla Tabella 6.8), si ricavano i valori dei parametri fisici validi per i calcoli progettuali e qui di seguito elencati:

- peso di volume del secco, γ_d [kN/m³]: 15-16
- peso di volume naturale, γ_n [kN/m³] : 19-20

- Resistenza a taglio a lungo termine

Considerando valido per il materiale in questione un involucro di rottura lineare alla Mohr-Coulomb, che ha espressione:

$$\tau = c' + \sigma_n' \cdot \tan \phi'$$

i parametri da determinare per definire la resistenza a taglio sono l'angolo di attrito efficace ϕ' e la coesione efficace c' .

In mancanza di prove dirette, la valutazione dell'angolo di attrito può essere effettuata sulla base dell'indice IP, sia per i valori di picco, secondo l'esperienza di Jamiolkowski et al., 1979, (Figura 1, Allegato C), sia per i valori residui, secondo Lupini & al. 1981 (Figura 2, Allegato C).

Dalle relazioni, considerando un IP pari a 17%, si ottengono i seguenti angoli di attrito:

$$\phi'_{\text{picco}}: 28^\circ - 34^\circ;$$

$$\phi'_{\text{residuo}}: 20^\circ - 33^\circ.$$

La relazione utilizzata per la definizione di ϕ'_{picco} è stata ricavata dagli autori sulla base di esperienze avute su terreni normalmente consolidati (NC). Per il fatto che l'angolo di attrito dei materiali NC risulta essere minore/uguale a quello di materiali sovraconsolidati (SC) (Lancellotta, 1987), tale relazione è considerata valida per i terreni in esame, che hanno un OCR calcolato di 2.1.

Il confronto tra i valori così determinati e quelli derivanti dalla letteratura, ha portato alla scelta dell'angolo di attrito da utilizzare per il calcolo delle strutture, secondo quanto riportato in Tabella 7.2.

Tabella 7.2: Confronto tra i valori dell'angolo di attrito efficace derivanti da letteratura, indice IP e quelli utilizzati in progetto

Angolo di attrito efficace	Da letteratura Bottino & Civita, 1986 (*)				Da IP	Scelta progettuale
	min	media	dev.st.	max		
ϕ'_{picco} [°]	14.0	26.0	6.2	34.0	28-34	26-30
ϕ'_{residuo} [°]	-	-	-	-	20-33	18-22

(*): in letteratura non viene specificato se trattasi di valori di picco o residui

La valutazione della coesione efficace può essere effettuata sulla base della pressione di preconsolidazione, σ_p' , secondo la relazione di Mesri & Ghaffar, 1991 (Figura 3, Allegato C):

$$c' = (0.024 \div 0.10) \sigma_p';$$

Da prova edometrica si ricava una σ_p' di circa 1200kPa, e quindi una coesione effettiva compresa nell'intervallo 29kPa÷120kPa.

Il confronto di tali indicazioni con quelli di letteratura, ha portato alla scelta dei valori riportati in Tabella 7.3 per il calcolo delle strutture.

Tabella 7.3: Confronto tra i valori della coesione efficace derivanti da letteratura, σ_p' e quelli utilizzati in progetto

Coesione efficace	Da letteratura Bottino & Civita, 1986 (*)				Da σ_p'	Scelta progettuale
	min	media	dev.st.	max		
c'_{picco} [kPa]	4.0	20.7	8.0	37.0	29-120	10-40
c'_{residuo} [kPa]	-	-	-	-	-	0

(*): in letteratura non viene specificato se trattasi di valori di picco o residui

Considerando il peso che ha la coesione nei problemi di scarico tensionale e la tendenza alla degradazione dei materiali coerenti alla diminuzione delle tensioni, verrà utilizzato il valore minimo di coesione per la progettazione di opere che inducono scarico tensionale nei terreni.

Ai valori di angolo di attrito ricadenti nella parte alta dell'intervallo indicato per la progettazione verranno associati valori di coesione ricadenti nella parte bassa.

- Resistenza a taglio a breve termine

Per la definizione della resistenza a taglio non drenata, c_u , si fa riferimento a:

- prova triassiale tipo UU che ha fornito un valore c_u pari a 331.5kPa;
- relazione di Koutsoftas e Ladd, 1985 (in Lancellotta 1987), secondo la quale

$$c_{uSC} = c_{uNC} * OCR^{0.8}.$$

dove:

c_{uSC} : resistenza non drenata del terreno sovraconsolidato;

$OCR=2.1$ (da prova edometrica)

c_{uNC} : resistenza non drenata del terreno normalconsolidato = $0.22 * \sigma_{vo}'$ (σ_{vo}' tensione efficace verticale calcolata alla profondità di prelievo del campione, 42m)

La relazione fornisce un valore di c_{uSC} pari a circa 162kPa.

- prove in sito: il valore non “a rifiuto” di N_{spt} (pari a 43) è correlato alla c_u dalla formulazione riportata da NAVFAC Design Manual, 1982 (in Cestari, 1990), valida per i limi argillosi ed argille a bassa plasticità, espressa come:

$$N_{spt} = 0.25 * c_u \text{ [kPa]}$$

da cui si ricava un valore di c_u pari a 172kPa. Tale valore è da considerare come limite inferiore in quanto derivante dal valore minimo di N_{spt} (la maggior parte delle misure ha fornito rifiuto).

Confrontando i valori di c_u derivanti dalle varie indicazioni si ottengono quelli da considerare per i calcoli della struttura e riportati in Tabella 7.4.

Tabella 7.4: Confronto tra i valori della coesione non drenata derivanti da diverse fonti e quelli adottati in progetto

Coesione non drenata	Da OCR	Da Nspt	Da laboratorio	Scelta progettuale
cu [kPa]	162	172	331.5	150-350

- Modulo di deformabilità a **lungo termine**

Per la determinazione del modulo di deformabilità a lungo termine si fa riferimento a:

- Prove di laboratorio

Dalla prova edometrica si ha che il modulo confinato, M, nell'intervallo di carico di interesse, è compreso tra 28MPa e 71MPa. I carichi previsti da progetto ricadono nel tratto di ricomprensione della curva edometrica, dove il comportamento deformativo del materiale può essere assunto di tipo "elastico". Il modulo M secante compreso tra il carico iniziale e quello della tensione verticale in sito, alla profondità di estrazione del campione, risulta di 43MPa.

Ricorrendo alla teoria dell'elasticità ed assumendo un coefficiente di Poisson v' drenato pari a 0.3, il modulo di deformazione drenato E' è compreso tra 21MPa e 52MPa, con un modulo secante pari a 32MPa.

Tenendo conto del disturbo che è comunque insito nelle operazioni di campionamento e confezionamento del provino, tali valori sono da considerarsi come gli estremi inferiori del modulo reale.

- Coesione non drenata cu

Un'indicazione del modulo E' può essere fornito dal legame con il modulo non drenato E_u , secondo la teoria dell'elasticità:

$$E' = E_u \cdot (1 + v') / (1 + v_u),$$

dove:

v' : modulo di Poisson a lungo termine, è assunto di 0.3;

v_u : modulo di Poisson non drenato pari a 0.5;

E_u : funzione di cu secondo la relazione (Figura 4, Allegato C):

$$E_u \approx 600cu,$$

si ottiene E' compreso nell'intervallo 78 MPa e 182MPa.

Il confronto delle varie fonti a disposizione, confortato dall'esperienza in terreni simili, ha portato all'individuazione dei valori per i calcoli progettuali mostrati in Tabella 7.5.

Tabella 7.5: Confronto tra i valori del modulo di deformazione drenato derivanti da diverse fonti e quelli adottati in progetto

Modulo di deformazione drenato [MPa]	Da prova edometrica [MPa]	Da cu [MPa]	Scelta progettuale [MPa]
E' [MPa]	21-52	78-182	50-80

- Stato tensionale

Per il coefficiente di spinta a riposo k_o si fa riferimento alla relazione di indicazioni di Jacky 1944, e di Schimidt 1966 e Alpan 1967 (in Lancellotta, 1987):

$$k_{oSC} = k_{oNC} * OCR^{0.5} = (1 - \sin \phi') * OCR^{0.5}.$$

Essendo il valore di ϕ' compreso tra 26° e 30° e un OCR di 2.1, si ha un k_{oSC} compreso nell'intervallo 0.7-0.8.

- Sintesi della caratterizzazione geotecnica dell'unità 5

I parametri geotecnici da considerare nei calcoli per l'unità 5 sono sintetizzati nella Tabella 7.6.

Tabella 7.6: Sintesi della caratterizzazione geotecnica dell'unità 5

Descrizione dell'unità 5	γ_n [kN/m ³]	IP [%]	n	E' [MPa]	ν' [-]	ϕ' picco [°]	c' picco [kPa]	ϕ' residuo [°]	c' residuo [kPa]	cu [kPa]
Limo argilloso deb. sabbioso	19-20	12-17	0.42	50-80	0.3	26-30	10-40	18-22	0	150-350

Tali valori sono propri dei terreni indisturbati e non alterati.

8. MODELLO GEOLOGICO-GEOTECNICO

8.1 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 5.

Inizialmente, nel tratto compreso tra la progr. 6+717 e la progr.6+750 è presente l'unità 2, caratterizzata da una cementazione da assente a in tracce.

Il tratto tra la progr. 6+750 e 7+100 è invece caratterizzata dall'unità 3 (cementazione in tracce-diffusa); al di sotto dell'unità 3 è ancora presente l'unità 2. La galleria, per circa 100m, incontrerà, sul fronte di scavo, l'unità 3 superiormente e l'unità 2 al piede. In questa tratta sarà realizzato il pozzo di ventilazione n.10, da scavare nell'unità 3 e nell'unità 1 per i primi 5m circa.

Da progr. 7+100 a progr. 8+250, l'opera si sviluppa attraverso l'unità 4; solo le opere di fondazione della Stazione Porta Susa si approfondiscono fino a raggiungere l'unità 3 sottostante.

Da progr. 8+250 a progr. 9+150 la galleria si sviluppa interamente nell'unità 3. La Stazione Re Umberto ed i pozzi di ventilazione 13 e 14 superiormente nell'unità 2 e inferiormente nell'unità 3.

Da progr. 9+150 a 9+400 sul fronte di scavo della galleria è presente l'unità 3 superiormente e 4 nella parte inferiore. Da progr. 9+400 a fine lotto riprende l'unità 4 con una lente di circa 60m in unità 3 (9+250m).

Il pozzo di uscita sarà scavato per circa 8m in unità 1 e 2; al di sotto dei primi 8m di profondità nell'unità 4.

Nelle tratte dove è presente l'unità 4 sono state individuate lungo le colonne di indagine livelli di materiale che supera il 75% di cementazione. Lungo tutto il tracciato sono stati riscontrati presenza di ciottoli fino al 36% in peso sull'unità di campione, con diametri che possono raggiungere i 30÷40cm.

Relativamente alla scavabilità dell'unità 3 e 4 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 tra 0% e 25%.

La falda superficiale si ritrova ad una quota variabile compresa tra 227m di inizio lotto e 222m di fine lotto; questi valori corrispondono ad una profondità della falda superficiale variabile dai 22m (Stazione P. Acaja) a 15.5m (Stazione Porta Nuova) dal piano campagna (situazione relativa al livello massimo registrato nel periodo di monitoraggio febbraio 2000-aprile 2001). 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 0.15% e 0.35%.

Si evidenzia dunque che la superficie di falda interferisce con l'opera per tutto lo sviluppo del lotto. In particolare da progr. 6+875 fino a fine lotto, il piano di rotolamento è sotto il livello di falda (livello massimo registrato dal monitoraggio feb. 2000-aprile 2001).

8.2 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 (cfr. Relazione Geotecnica del Progetto Definitivo MTL1T1A0DGE0GENR002).

Il concetto di Fuzzy Arithmetic 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 Arithmetic 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" (elaborato MTL1T1 EGEOGN3S004).

9. PROBLEMATICHE DI SCAVO LEGATE ALLA NATURA DEL TERRENO

Nel Lotto 5 è prevista la realizzazione di un tratto di galleria naturale di 2.5km circa, di sei stazioni, di cinque pozzi intertratta più il pozzo di uscita a fine lotto e di una serie di opere accessorie (spostamenti di sottoservizi).

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.

9.1 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 5) 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 e di prove di laboratorio, 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 C_o 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 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 11 riportata in Allegato B.

Nella Tabella 9.1 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 9.1: Variazione della composizione granulometrica nelle unità, ricavata dalle prove granulometriche eseguite lungo tutto il tracciato

	Diametro	Unità 1		Unità 2		Unità 3	
	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 51, 52 e 53 (Allegato B) si osserva la distribuzione granulometrica ottenuta da campioni prelevati nei sondaggi (Figura 51) e nei pozzi (Figura 52).

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).

9.2 Cementazione e/o addensamento

Il lotto in esame si sviluppa prevalentemente attraverso le unità 3 e 4 ed in minima parte interessa l'unità 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%.
- unità 4, cementazione compresa tra 50% e 75%.

Il materiale che verrà interessato dalla realizzazione dell'opera si presenta dunque da sciolto a cementato. Localmente all'interno dell'unità 4 sono stati individuati livelli di materiale la cui cementazione percentuale risulta maggiore del 75%.

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

9.3 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 30% circa sul volume di scavo, con punte localmente più elevate (vedi sezione 6.3.1).

9.4 Presenza di acqua

La falda superficiale si ritrova ad una quota variabile compresa tra 227m di inizio lotto e 222m di fine lotto. Data la profondità dell'opera e la quota della falda superficiale si avrà

interferenza tra lo scavo dell'opera e il deflusso sotterraneo dell'acqua di falda per tutto lo sviluppo del lotto.

9.5 Presenza di gas

Il terreno attraversato dallo scavo, allo stato naturale, non è sede di gas. Tuttavia, 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 legati a impianti di distribuzione carburanti, per lo più dismessi.

9.6 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 dismessi e insediamenti industriali.

9.7 Zone disturbate, presenza di cavità

Allo stato naturale il terreno del Lotto 5 risulta ben addensato. 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.

Lungo l'intero tracciato del Lotto, ed in particolare lungo l'asse di Corso Bolzano, sono state individuate cavità dovute alle gallerie della Cittadella di Torino e delle fortificazioni urbane, fondazioni delle fortificazioni della cinta muraria bastionata e scavi sotterranei realizzati per i rifugi antiaerei.

Queste interferenze, secondo le ricostruzioni tridimensionali, non riguarderebbero direttamente lo scavo della galleria di linea, sufficientemente profonda per sottopassare la stratificazione archeologica, ma potrebbero interferire con la realizzazione degli scavi per le stazioni e per i pozzi di ventilazione. Per maggiori approfondimenti si veda la relazione MTL1T1A0DVARGENR001 "Ricerche storico-archivistiche – Relazione tecnica" e tavole allegate nonché il paragrafo 8.4.1 del Piano di Sicurezza e Coordinamento SICGENR001.

9.8 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:

- Canale del corso Francia: da piazza Massaua percorre corso Francia fino a piazza Bernini; imbocca Via Duchessa Jolanda, via Beumont, Via Avigliana, si inserisce in C.so Inghilterra, poi in C.so V. Emanuele II, raggiungendo il Po.
- Canale del Valentino: parte dal canale di Torino in Via Carena ang. Via Vagnone, giunge Via Cibrario percorrendola fino in P.zza Statuto, svolta in C.so Inghilterra fino in C.so Vittorio, lo percorre fino in Via Morosini dove gira in C.so Stati Uniti, C.so Galileo, Via Lugnano, sino a Via Massena dove ha inizio il Canale San Salvario.

Inoltre vi sono dei canali che, anche se non hanno il tracciato coincidente con la linea, hanno principio in P.zza Statuto, nelle prossimità dell'inizio del lotto 5. Per maggiori approfondimenti si veda la relazione MTL1T1A0DVARGENR001 "Ricerche storico-archivistiche – Relazione tecnica" e tavole allegate.

9.9 Danni di guerra

Il tracciato del lotto 5 si sviluppa in corrispondenza di zone che furono oggetto, durante la Seconda Guerra Mondiale, di intensi bombardamenti.

Sono quindi possibili interferenze 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 l'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.

9.10 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.

10. 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.

11. BIBLIOGRAFIA

AASHTO: American Association of State Highway and Transportation Officials, secondo quanto riportato dal C.N.R.-U.N.I. 10006.

AFTES: Association Française Travaux en Souterrain, 1992, Working Group n°1.

AGI: Associazione Geotecnica Italiana, 1977 *“Raccomandazioni per l'esecuzione e la interpretazione delle indagini geotecniche”*.

BARLA G., MACCHI A., CAVALLERO G., PEDEMONTE 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

CESTARI, 1990. *“Prove geotecniche in sito”*. 1^a edizione, Geo-graph s.n.c. Segrate 1990.

DUCAN E BUCHIGANI, 1976 in Atti della conferenza di geotecnica di Torino XIII ciclo - redattore R. Lancellotta- *“Progettazione geotecnica: metodo di calcolo e parametri”*. Associazione geotecnica Italiana (AGI), 1987.

FRANCERI E., BORTOLAMI G., RICCI B.: *“Lineamenti geoidrologici della provincia di Torino con riferimento allo stato idrogeochimico delle falde del sottosuolo dell'area ecologica torinese”*. Provincia di Torino – Assessorato Ecologia. Marzo 1980.

JAMIOLKOWSKI ET AL., 1979 in Atti della conferenza di geotecnica di Torino XIII ciclo - redattore R. Lancellotta- *“Progettazione geotecnica: metodo di calcolo e parametri”*. Associazione geotecnica Italiana (AGI), 1987.

LANCELLOTTA R. (1987): *“Geotecnica”* - Zanichelli.

LUPINI ET AL., 1981 in Atti della conferenza di geotecnica di Torino XIII ciclo -redattore R. Lancellotta- *“Progettazione geotecnica: metodo di calcolo e parametri”*. Associazione geotecnica Italiana (AGI), 1987.

**ALLEGATO A:
IDROGEOLOGIA**

ALLEGATO B:
ELABORAZIONE DEI RISULTATI DELLE PROVE



Foto 1 - Pozzo P5: Ciottoli e ghiaia rinvenuti a 14,5 m



Foto 2 - Pozzo P5: Ghiaia con cementazione elevata rinvenuta a 20 m



Foto 3 - Pozzo P7: Ciottoli e ghiaia rinvenuti tra 10 e 11 m



Foto 4 - Pozzo P7: Blocco quarzítico rinvenuto tra 11 e 11,6 m

**ALLEGATO C:
CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA**

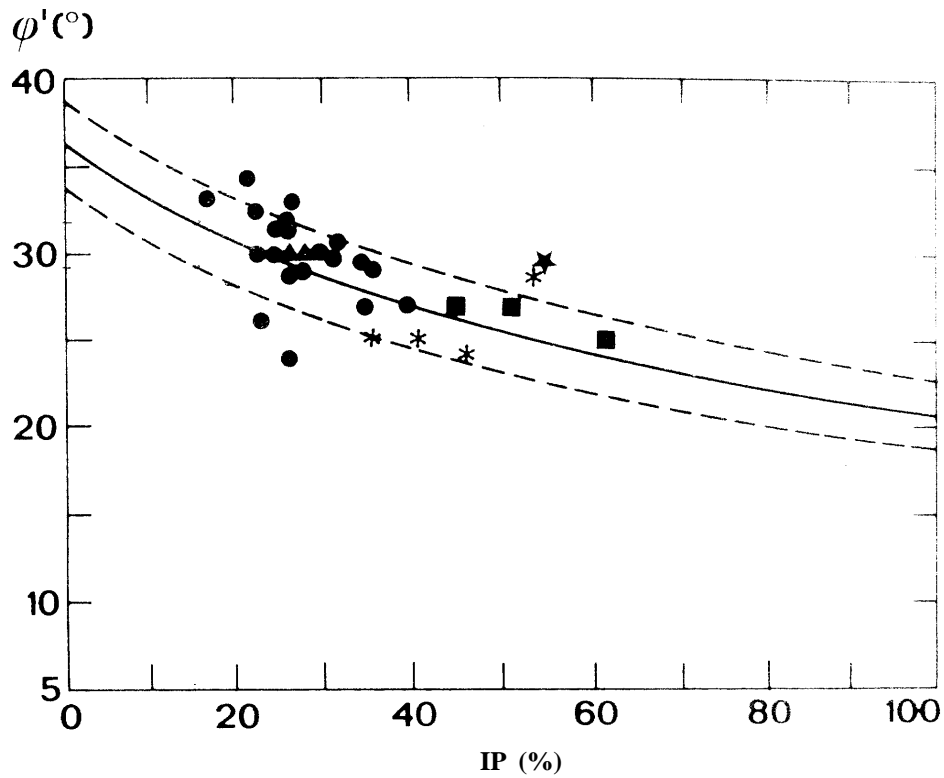


Figura 1 – Correlazione tra angolo di attrito efficace e l'indice di plasticità per argille NC (Jamiolkowski et al., 1979)

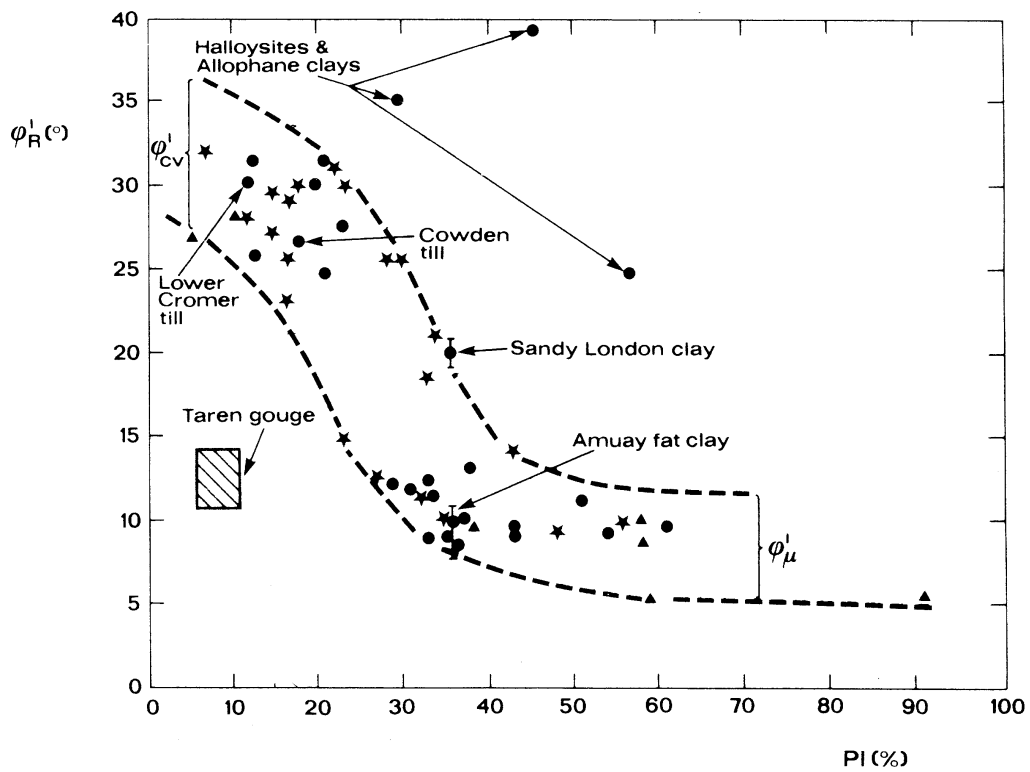
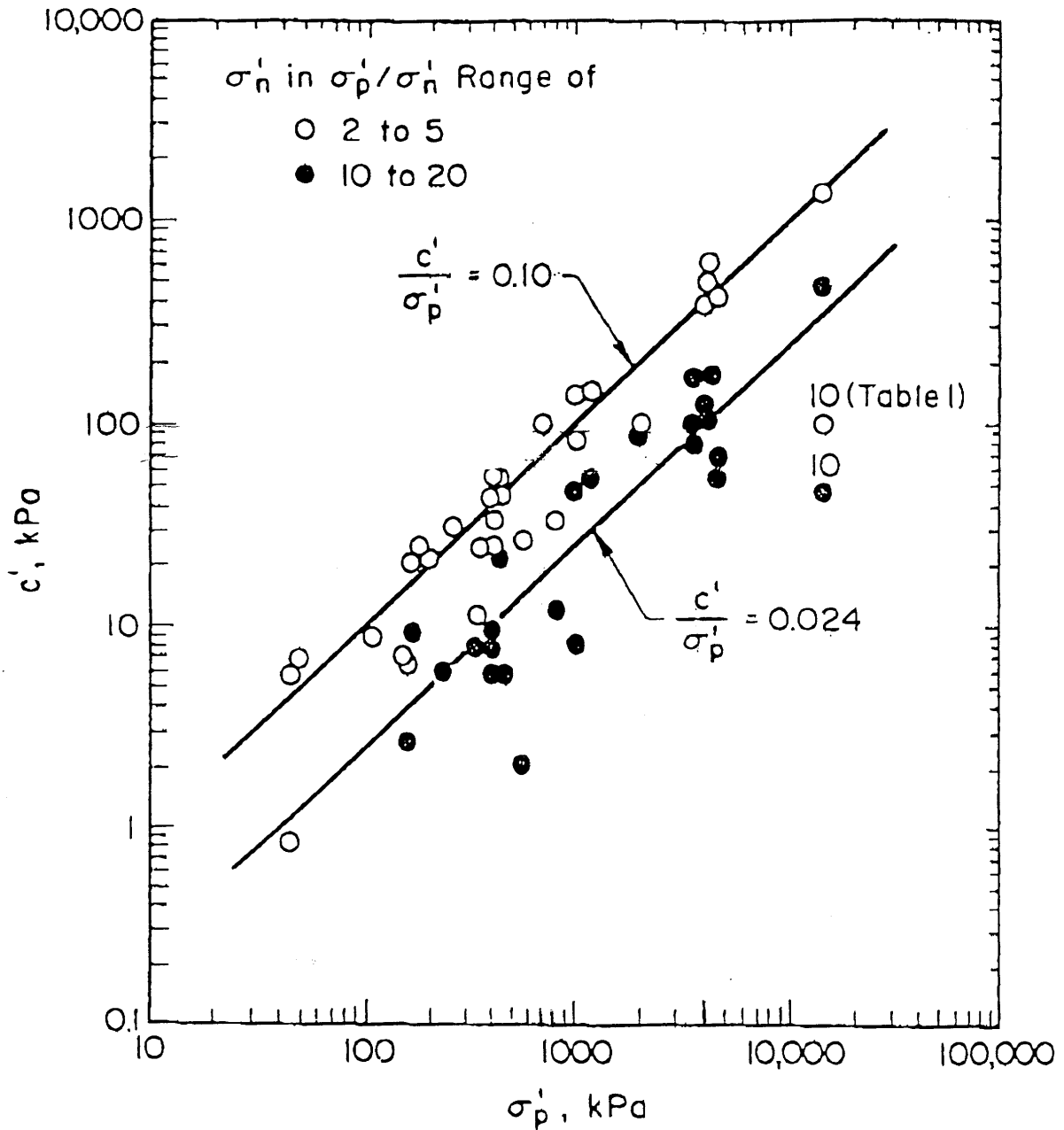


Figura 2 – Variazione dell'angolo di attrito efficace residuo con l'indice di plasticità (Lupini et al., 1981)



(σ'_n = pressione normale al piano di rottura all'istante del collasso)

Figura 3 – Correlazione tra intercetta di coesione efficace e pressione di preconsolidazione per argille compatte (Mesri and Ghaffar, 1991)

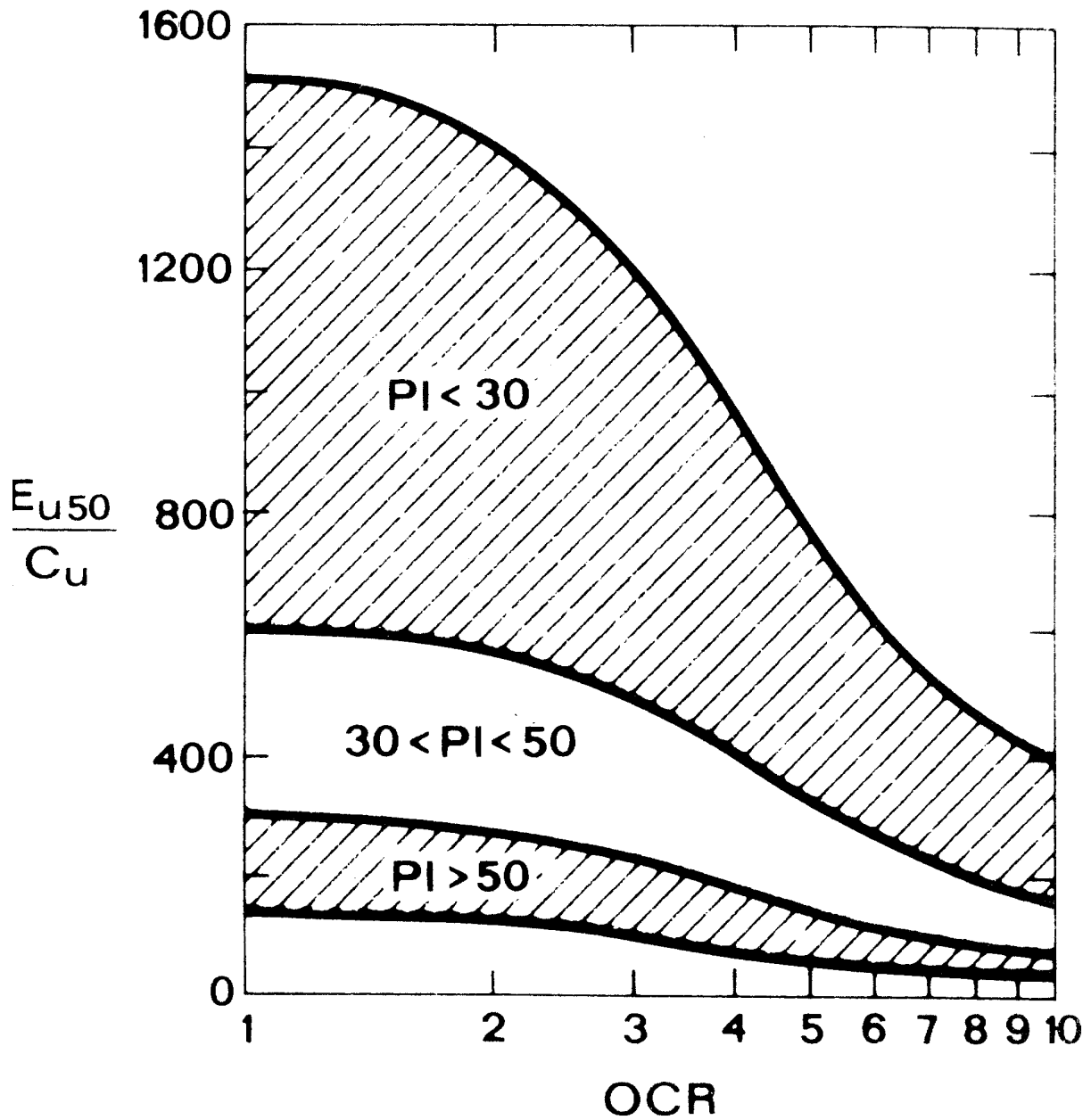


Figura 4 – Variazione del rapporto E_{u50}/C_u al variare del grado di sovraconsolidazione OCR (Duncan e Buchigani, 1976)

ALLEGATO D:
CERTIFICATI DELLE PROVE IN SITO

ALLEGATO E:
CERTIFICATI DELLE PROVE DI LABORATORIO