

ALLEGATO 11

**FERROVIE DELLO STATO S.p.A.
DIREZIONE COMPARTIMENTALE INFRASTRUTTURA
S.O. TECNICO - ARMAMENTO E OPERE CIVILI
GEOLOGIA**

**SEPARAZIONE DEI TRAFFICI
FERROVIARI**

STAZIONE DI PISA C.LE.

RELAZIONE DI FATTIBILITA' GEOLOGICA



IL DIRIGENTE
Arch. GABRIELE BERTI

IL FUNZIONARIO
(ROBERTO C. ALBERTO)

1. PREMESSA

La presente relazione, ai sensi del D.M.11.3.1988 della deliberazione n. 94 del 12 febbraio 1985 (L.R. 17 aprile 1984, n. 21) e della L.R. 16.01.1995 n. 5, illustra la natura geologica dei terreni interessati dal progetto di scavalco ferroviario nell'area ad ovest della stazione di Pisa Centrale per consentire la separazione dei traffici della relazione Roma-Genova della relazione Pisa-Firenze. L'area di interesse è situata nel triangolo delimitato a nord dai binari della linea Firenze-Pisa C.le e a sud da quelli della linea Pisa.Cle-Livorno (Collo d'oca), in prossimità delle platee di lavaggio e in prossimità del ponte di S. Ermete Ovest.

Per la stesura della relazione sono stati consultati studi e lavori di vari autori che hanno contribuito alla conoscenza della geologia della pianura pisana. In particolare si è fatto riferimento ai più recenti studi geomorfologici della pianura di Pisa⁽¹⁾ e a quelli geologici pubblicati nel volume «la pianura di Pisa e i rilievi contermini»⁽²⁾.

Per la caratterizzazione geotecnica dei terreni sono stati inoltre utilizzati dati di campagna e di laboratorio raccolti, in passato, nel corso di indagini geognostiche effettuate in zone limitrofe ed in particolare nell'area del fabbricato viaggiatori di Pisa C.le e nell'area del cavalcaferrovia di S. Ermete Ovest, e più di recente alla campagna di sondaggi realizzati per la definizione della stratigrafia e delle caratteristiche geomeccaniche dei terreni direttamente interessati dal progetto di scavalco effettuati nell'autunno 2001, ai quali si rimanda per gli aspetti di dettaglio.

2. CENNI GEOLOGICI

L'area in studio, ubicata all'estremità sud-ovest del centro urbano, a quota altimetrica media di circa 3.9 m s.l.m. fa parte della più vasta pianura pisana. Essa si presenta generalmente molto piatta, a tratti depressa, interrotta soprattutto verso sud e in vicinanza della costa da debolissimi rilievi costituiti da dune eoliche di sabbia.

Dal punto di vista geologico, nello studio della pianura di Pisa, i vari autori hanno trovato utile suddividere il substrato in tre parti:

- *il substrato profondo*, che è costituito dalle formazioni litostratigrafiche che stanno al di sotto dei primi sedimenti del complesso neoautoctono, il cui inizio varia da zona a zona, ma non è anteriore al Miocene sup.;
- *il substrato intermedio*, comprensivo dei sedimenti neoautoctoni fino a tutto il Pleistocene inf., caratterizzati da una deposizione prevalentemente controllata dalla subsidenza di origine tettonica;
- *il substrato superiore*, che è rappresentato dai terreni di nostro interesse, formato dai sedimenti posteriori al Pleistocene inf. e legati a una deposizione controllata principalmente dalle variazioni eustatiche del livello del mare e da quelle degli apporti fluviali conseguenti alle prime e alle modificazioni climatiche.

La superficie, dal basso verso l'alto è rappresentata dalle:

¹ Della Rocca B., Mazzanti R. & Pranzini E. (1987) - *Studio geomorfologico della pianura di Pisa*. Geogr. Fis. Dinam. Quat. 10, 56-84.

² Mazzanti R., Rau A. (1994) - *La pianura di Pisa e i rilievi contermini. L'ambiente naturale: La Geologia*. Memorie della Soc. Geogr. It., Vol. L, 31-102

- *Calcareniti e Sabbie*, attribuibili al Pleistocene sup. per la giacitura al di sopra dei conglomerati e delle calcareniti del livello a *Strombus bubonius* e ricca fauna malacologica del Tirreniano del Bacino di Carenaggio della Torre del Fanale, immediatamente a sud del porto di Livorno e rappresentate, in particolare dalle Sabbie e limi di Vicarello che affiorano a Coltano, Castagnolo, Palazzetto e lungo il bordo meridionale della Pianura di Pisa da Mortaiolo al fianco destro della Valdera.
- *Depositi alluvionali*: questi depositi, in prevalenza sabbiosi e limosi (25 di Tav. 1) o argillosi e limosi (26 di Tav. 1) sono distribuiti nella maggior parte della Pianura di Pisa e nelle valli che vi confluiscono. Risalgono verosimilmente all'Olocene essendo più o meno tutti collegati al sovralluvionamento che si è sviluppato in questa pianura man mano che il livello del mare è risalito durante la deglaciazione postwürmiana ed è aumentato lo sbarramento a mare ad opera del sistema dei lidi del delta dell'Arno. In questi sedimenti prevalgono le sabbie nelle zone più prossime al corso attuale (e a quelli antichi) dell'Arno, del Serchio e dell'Era-Cascina, sabbie accumulate durante le frequenti esondazioni del passato; sono più diffuse le argille e le torbe nelle zone più lontane dai corsi d'acqua, zone che sono rimaste per questo leggermente più basse e quindi soggette a impaludamenti mentre le esondazioni vi trasportavano solo i materiali più fini.
- *Depositi sabbiosi dei lidi e dune litoranee* (27 di Tav. 1): che rappresentano l'alternarsi di sedimenti sabbiosi e limo-argillosi originati da un sistema olocenico di lidi e di dune e dalle lagune e paduli retrodunali che separano la pianura di Pisa, dal litorale. I lidi, indicati parzialmente nella parte occidentale di fig. 1, sono ben riconoscibili perché allineati secondo gli antichi andamenti del litorale, e sono stati individuati sulla base della cartografia antica e delle analisi delle fotografie aeree e delle immagini da satellite. Detti localmente «cotoni», sono poco elevati e corrispondono a barre emerse per sovraccumulo di sedimenti trasportati dalla deriva litoranea e scaricati sulle spiagge dal getto di riva, sono stati successivamente stabilizzati dalla vegetazione. Le dune, localmente dette «tomboli», sono assai più elevate (fino a 6-8 m) e del tutto irregolari rispetto ai lidi per la loro origine eolica. Le aree lagunari e palustri, localmente dette «lame» presentano allineamenti paralleli ai lidi e si identificano con antichi tratti di mare leggermente più profondi perché corrispondenti ai solchi tra barra e barra.

I terreni che costituiscono il sottosuolo pisano più superficiale sono dunque piuttosto recenti e si sono depositi nell'arco di tempo che separa l'ultima grande espansione glaciale dai nostri giorni che è caratterizzata dalle successive fasi di avanzamento e ritiro dei ghiacci. Queste oscillazioni climatiche hanno determinato nel tempo, a causa delle frequenti variazioni del livello marino, il maggiore o minore apporto di sedimenti fluviali che sono costituiti in massima parte da sedimenti fini.

Il sovrapporsi di questi fattori ha portato, di volta in volta, a variazioni dell'estensione areale della pianura che, in più fasi, a causa delle variazioni del livello marino, si è ridotta per le ingressioni marine ed in altre si è invece notevolmente ampliata sino a raggiungere le dimensioni attuali. Lungo la costa le frequenti variazioni del livello del mare hanno contribuito in misura notevole alla formazione dei cordoni dunali (tomboli) e dei retrostanti bacini palustri racchiusi e depressi (lame) già citati.

Ai sedimenti lagunari, palustri e salmastri si sono poi sovrapposti materiali fluviali e di colmata artificiale. I terreni superficiali sono geologicamente recenti: si calcola che i primi metri di terreno si siano depositi negli ultimi 7000 - 5000 anni fa.

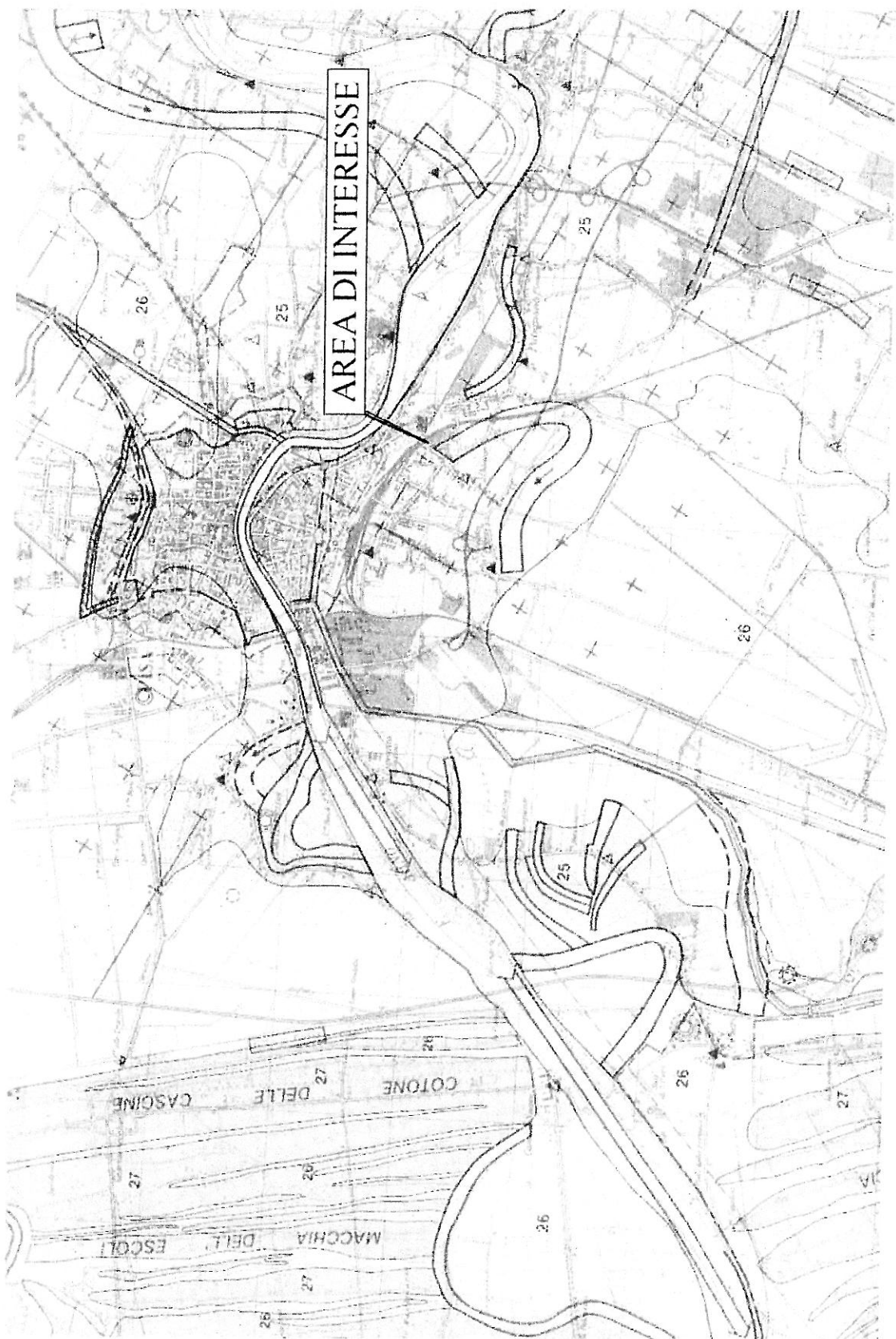


Fig. 1 - Carta Geomorfologica della pianura di Pisa

Misure geo-cronologiche compiute su resti vegetali raccolti a -4 m dal p.c. hanno fornito età assolute di circa 2500 anni.

3. QUADRO STRATIGRAFICO

Numerosi studi, tra i quali quelli legati ai progetti di consolidamento delle fondazioni della Torre Pendente, hanno permesso di schematizzare il sottosuolo pisano in tre complessi principali di terreno:

- a) Il complesso più superficiale (dal p.c. a qualche metro di profondità) è costituito da materiali eterogenei di riporto recente. Prosegue poi con limi ed argille e subordinatamente sabbie con strutture di deposizione in ambiente lagunare e acque salmastre a salinità variabile;
- b) Questo complesso è costituito in prevalenza da terreni argillasi, ad eccezione di un livello di sabbia. All'interno di questo complesso sono stati differenziati quattro termini:
 1. argille omogenee senza indizi di stratificazione note col nome di "pancone" (~11 ÷ -21 m)
 2. argille intermedie con plasticità mediamente inferiore alle precedenti (-21 ÷ -25 m);
 3. sabbie fini limose (-25 ÷ -28 m);
 4. argille che riachiamano in modo discontinuo ora il termine una, ora il termine due (-40 m).
- c) E' un complesso costituito da sabbie di origine eolica (> 40 m di profondità).

Il livello freatico superficiale è impostato a ca. -1.5 m dal piano di campagna, salvo le oscillazioni dovute all'andamento stagionale della falda.

Questo quadro stratigrafico viene sostanzialmente confermato dalle indagini geognostiche effettuate nell'area del cavalcavia di S. Ermete ovest e del fabbricato viaggiatori di Pisa C.le.

3.1. Cavalcaferrovia di S. Ermete Ovest

In quest'area la campagna geognostica ha messo in evidenza la seguente stratigrafia:

1. dal p.c. fino a 9.0÷14.5 m di profondità: sotto una coltre di materiale di riporto di spessore variabile è presente un livello di depositi prevalentemente limoso-sabbiosi con intercalazioni argillose, da poco a moderatamente addensati;
2. da 9.0÷14.5 m a 21.0÷22.0 m: si rinviene un potente pacco di argille grigio-azzurre poco consistenti con resti vegetali che presenta localmente una intercalazione di sabbia conghiaia di spessore di ca. 5.5 m.
3. da 21.0÷22.0 m a 23.0÷24.0 m: argilla verdastra consistente;
4. a profondità maggiore di 23.0÷24.0 m: limi e sabbie argillose.

La descrizione delle stratigrafie riportate sopra risulta pressochè identica: questo fatto fa ragionevolmente pensare che la natura geologica del sottosuolo presente nell'area in esame non si discosti di molto dal quadro stratigrafico descritto.

3.2. *Fabbricato viaggiatori di Pisa C.Le*

Nell'area della stazione la stratigrafia media del terreno, ricavata, come accennato nella premessa, dalle indagini geognostiche effettuate in corrispondenza del fabbricato viaggiatori confermano sostanzialmente lo schema generale già descritto nel precedente paragrafo.

Al disotto di uno strato di circa 1.60 m di spessore costituito da materiale di riempimento misto a macerie passante a terreno argilloso scuro o grigio-bruno si incontrano:

- I. da 1.00÷1.60 m a 4.5 ÷ 6.50 m: alluvioni recenti costituite da livelli lenticolari di limo a sabbia fine e di argilla limosa di consistenza variabile da molle a compatta. il colore varia da bruno-giallastro a grigio-bruno;
- II. da 4.50÷6.50 m a 9.00÷11.00 m: terreno di natura simile a quella soprastante ma di colore grigio e con presenza, nella parte bassa, di conchiglie di ambiente salmastro. Questi depositi sembrano rappresentare il passaggio dalla fase lagunare a quella alluvionale corrisponde al periodo conclusiva della sedimentazione. La consistenza varia da molle a media;
- III. da m 9.00÷11.00 a m 20.00÷22.00: argilla grigia uniforme molto molle con conchiglie di ambiente salmastro e sottilissimi livelli di limo e sabbia con tritume di conchiglie. Si tratta di sedimenti deposti in ambiente lagunare sviluppatosi dopo una fase di emersione. E' il complesso di argille normalmente consolidate che si ritrova in tutta l'area del centro urbano di Pisa;
- IV. seguono un pacco di argille grigio chiare o brune nettamente più consistenti, a tratti con calcinelli e con intercalazioni lenticolari di sabbia fine. Anche in questi sedimenti si ritrovano conchiglie di ambiente salmastro (deltizio a lagunare). E' evidente che questo terreno é stato al di sopra della falda ed ha subito un consolidamento per essiccamento. Il tetto di questa complesso corrisponde ad una superficie di erosione caratterizzata da una morfologia accidentata e discontinua, che spiega le differenze di quota a cui questi terreni più consistenti vengono generalmente raggiunti.

Il livello di falda é stato intercettato a 1.00÷1.50 m dal piano della pavimentazione della stazione (circa il piano del ferro).

3.3 *Area dello scavalco*

Le indagini eseguite consistono in n. 10 sondaggi a carotaggio continuo spinti sino a 25 m da p.c.; n. 5 sondaggi a distruzione spinti a profondità comprese fra 8 e 15 m; n. 8 prove penetrometriche statiche tipo CPT spinti sino a 25 m da p.c. o al rifiuto della penetrazione; n. 45 prove penetrometriche dinamiche in foro SPT; n. 12 prove di permeabilità Lefranc a carico variabile; n. 6 prove per la determinazione della velocità di circolazione verticale dell'acqua; e numerose analisi di laboratorio eseguite su campioni indisturbati e rimaneggiati prelevati nei sondaggi di cui sopra.

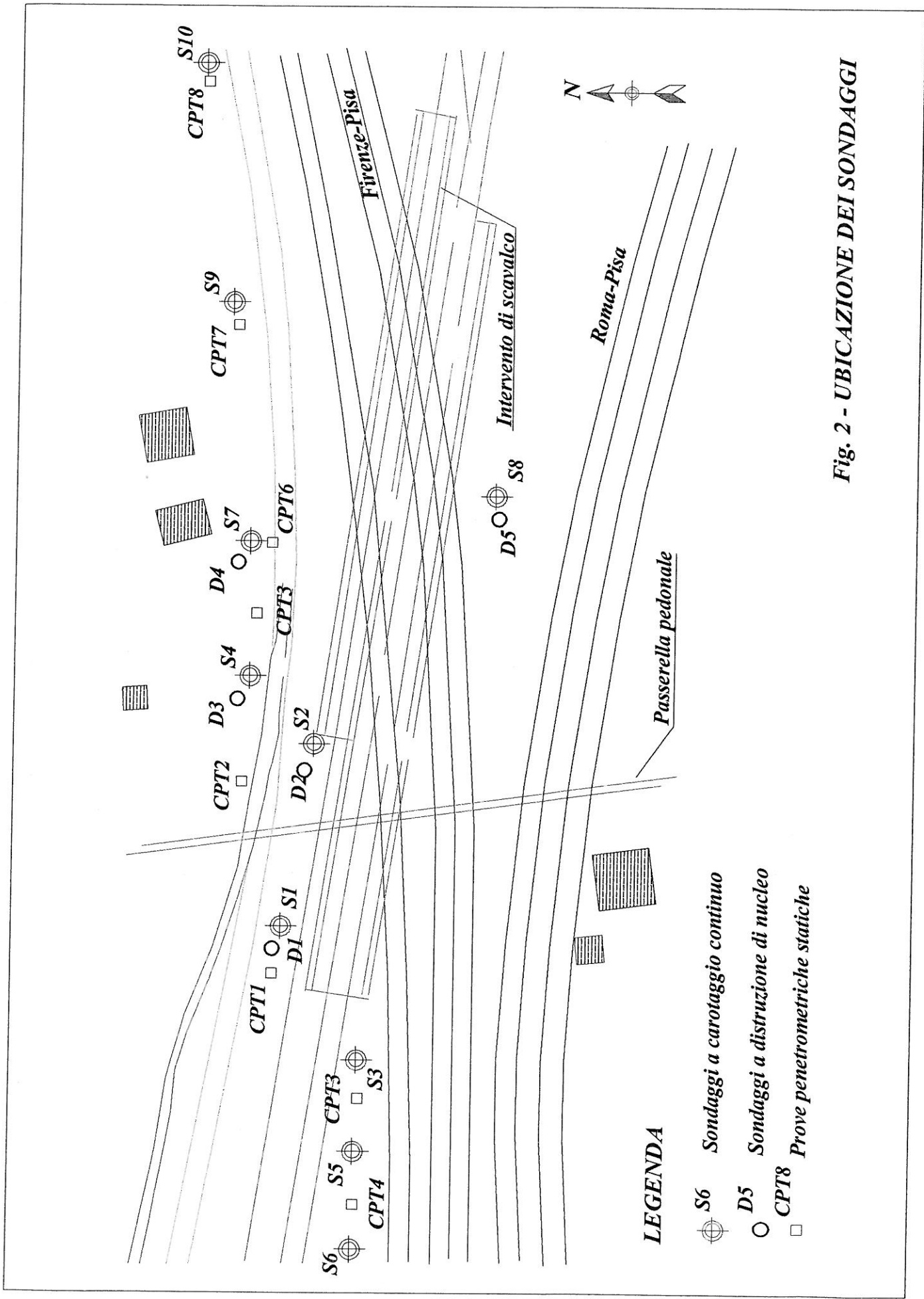


Fig. 2 - UBICAZIONE DEI SONDAGGI

Le differenti informazioni acquisite dalle stratigrafie dei sondaggi geognostici, dai grafici della resistenza alla punta delle prove CPT e dai risultati delle prove di laboratorio, sono state confrontate per giungere ad una schematica suddivisione della stratigrafica del sottosuolo relativa all'area in oggetto.

L'edificio litologico è costituito essenzialmente da una successione di materiale variabile dalla sabbia medio fine ad argilla compatta debolmente limosa, dove non mancano livelli ricchi di torba e resti fossili, testimoni della fase post-glaciale di deposizione tipico di ambiente lagunare.

L'esame delle singole stratigrafie e delle prove CPT evidenzia una successione stratigrafica omogenea, i cui diversi livelli individuati sono continui e con spessore pressoché costante lungo l'intero profilo investigato che possono essere schematizzati come segue:

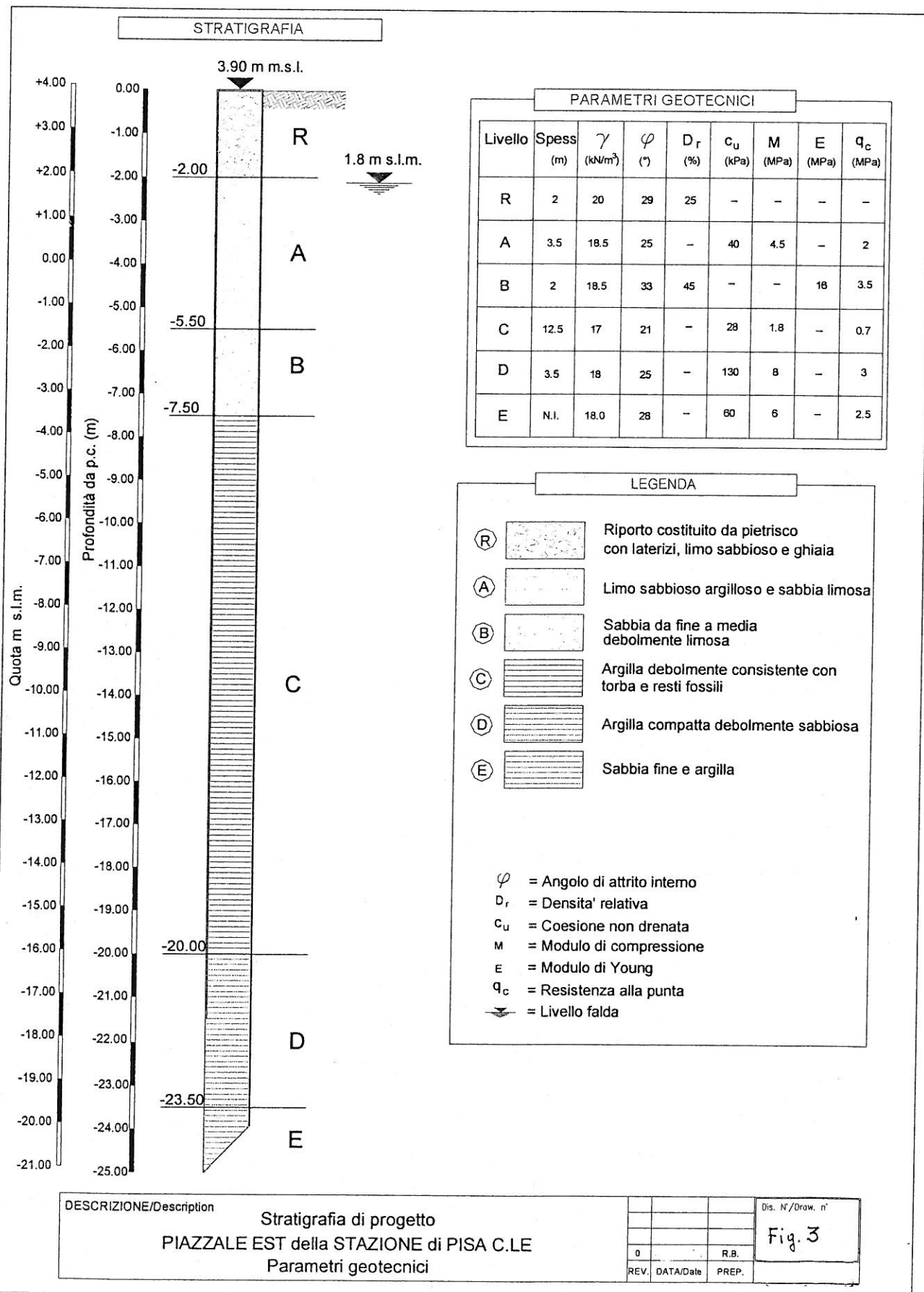
Livello R Costituisce lo strato sommitale della successione, approfondendosi da piano campagna fino a 1÷3 metri. E' costituito essenzialmente da materiale di riporto, pietrisco in una matrice di limo sabbiosa di colore grigio scuro e dal carattere consistente. Localmente passa a limo sabbioso con ciottoli, ghiaioso. E' stata inoltre riscontrata la presenza di laterizi che più o meno diffusi talvolta costituiscono veri e propri livelli tra 0.4 m e 0.5 m. Il riporto non è stato investigato con nessun tipo di prova penetrometrica.

Livello A Superiormente a contatto con lo strato R, fa parte del complesso delle alluvioni recenti. E' principalmente costituito da livelli di sabbia fine debolmente argillosa/limosa di colore marrone, e livelli di argilla sabbiosa di colore grigio azzurro dalla consistenza variabile da molle a consistente. Strato continuo presente fino a 5÷6 metri di profondità, mostra valori di resistenza alla punta q_c tendenzialmente pari a 2 MPa.

Livello B La natura del terreno è la stessa del livello A, con una differenza legata alla più alta energia dell'ambiente deposizionale. Si tratta infatti del passaggio ad una fase deposizionale marcatamente più alluvionale e meno lagunare, dove si sono accumulati livelli di sabbia medio fine limosa di colore grigio azzurro e dal carattere debolmente addensato. Si rinviene ad una profondità compresa tra 5÷6 metri e 8÷9 metri. Presenta valori di q_c tra i più alti registrati nelle verticali di indagine, tendenzialmente pari a 3.5 MPa.

Livello C Presente da 8÷9 metri di profondità fino a 20÷22 metri, rappresenta lo strato più potente individuato ed anche quello dalle più scadenti proprietà di resistenza meccanica. E' il prodotto d'accumulo di una fase deposizionale in ambiente lagunare susseguente ad una fase di emersione. Costituisce il complesso di argille normal consolidate che si ritrova in tutta l'area del centro urbano di Pisa, e che viene descritto negli studi geomorfologici della pianura pisana. Si tratta di argilla azzurra plastica debolmente consistente con torba individuata in un livello metrico da 9.50 metri a 10.50 metri di profondità. Si rinviengono inoltre piccoli livelli costituiti da sabbie fini e resti fossili. Valori di q_c attorno a 0.7 MPa.

Livello D E' a contatto superiormente con il livello C, e da questo è separato da un limite di natura erosiva indicante una sospensione nella fase di deposizione, tipica di ambiente subaereo. Ciò ha permesso una fase erosiva e una fase di consolidazione del terreno per essiccamento sopra falda. Il materiale è



costituito da argille debolmente sabbiose di colore variabile dal grigio scuro al marrone, con carattere molto compatto. Livello dallo spessore di variabile da 3 metri a 4 metri, con valori di resistenza alla punta del penetrometro statico pari a 3 MPa.

Livello E Si rinviene dalla profondità di 23.5÷24 metri fino a 25 metri, senza però intercettare il limite di letto. E' costituito da sabbia fine debolmente argillosa marrone, e da argilla debolmente sabbiosa a carattere mediamente compatto. Valori di q_c pari a 2.5 MPa.

4. CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA

Si riportano di seguito i risultati relativi alla caratterizzazione geotecnica dei terreni indagati sia con riferimento alle indagini eseguite in corrispondenza del Fabbricato viaggiatori, e delle indagini specifiche effettuate per lo scavalco.

4.1 Fabbricato Vviaggiatori

Fino a circa 10 m di profondità sono presenti abbondanti strati a prevalente composizione limo-sabbiosa, alternati ad argille le. cui consistenza, con variazioni irregolari, decresce mediamente con la profondità. Si tratta di terreni mediamente compressibili e caratterizzati da un decorso relativamente rapido del fenomeno di consolidamento per la presenza delle numerose intercalazioni sabbioso-limose.

Da 10 m a 20 m é presente un banco di argilla con indice plastica molta elevato con elevata compressibilità (argille normalmente consolidate). Dato l'enorme di questo banco i tempi di consolidazione sono lentissimi.

I valori dei parametri geomeccanici ricavati dalle analisi effettuate sui campioni prelevati durante l'esecuzione dei sondaggi nell'area del cavalcaferrovia sono riportati nella tabella seguente:

Tab. 1

Prof.	W	W _L	W _P	IP	I _c	USCS	γ	G _s	ϕ	c _u	q _u	Cc
(m)	%	%	%	%			t/m ³	t/m ³	(°)	kg/cm ²	kg/cm ²	
4.5-5.0	24,4	24,0	20,0	4,0	0,0	SM	1,92		32,0	0,01		
9,5-10,0	45,8	67,0	29,0	38,0	0,6	CH	1,61	2,64			0,42	0,412
14,7-15,1	18,8	22,0	20,0	2,0	1,6	ML	2,05	2,68	30,0	0,03		0,066
21,1-21,5	20,6	37,0	18,0	19,0	0,9	CL	1,97	2,71	26,0	0,06		0,166

La tabella mette in evidenza il diverso comportamento dei campioni sottoposti ad analisi. In particolare sono significativi i valori dei limiti di Atterberg (limite liquido WL, limite plastico Wp e l'indice di consistenza Ic) e i valori di resistenza (angolo di attrito interno ϕ , coesione c_u e resistenza a compressione laterale libera q_u). I primi definiscono l'influenza dell'acqua contenuta nel terreno sulle caratteristiche plastiche di esso. in particolare il limite di liquidità indica la quantità di acqua contenuta dal materiale al passaggio stabilito convenzionalmente dallo stato fluido allo stato plastico; il limite di plasticità (WP): indica la quantità di acqua contenuta dal materiale al passaggio convenzionalmente stabilito tra lo stato plastico e quello semisolido. L'indice di consistenza espresso dal rapporto:

$$I_c = \frac{W_L - W}{W_L - W_P} = \frac{W_L - W}{I_p}$$

dà con efficacia la rappresentazione dello stato di consistenza di una terra.

Il campione prelevato a profondità di 4.5-5.0 m presenta un valore di WL pari al limite di fluidificazione e pertanto un valore di I_c pari a zero e perciò particolarmente sensibile alle deformazioni e al rifluimento. Il campione prelevato alla profondità di 21,1-21,5 ha un valore di I_c pari a 1.6 caratteristico di materiale poco deformabile sotto carico. Quelli prelevati alle profondità di 9,5-10,0 e 21,1-21,5 fornisce valori di indice di consistenza rappresentativi rispettivamente di materiali plastici e solido-plastico e pertanto in parte sensibili alle deformazioni.

La resistenza d'attrito è quella forza che tende ad ostacolare lo scorrimento di un dato terreno nelle particelle interne, a seconda della composizione del terreno stesso e della maggiore o minore presenza dell'acqua o di minerali argillosi; il movimento, che si presenta come uno sforzo di taglio τ produce una, sollecitazione tangenziale che è direttamente proporzionale al valore del carico σ applicato in direzione perpendicolare a quella di scorrimento, da cui si ricava (a seconda delle terre prese in esame) un angolo ϕ di attrito interno. La coesione (c) si manifesta in una terra per effetto della adesione dei granuli l'uno all'altro. E' infatti l'attitudine di questi a restare uniti.

Coesione e attrito sussistono simultaneamente nel terreno, ma in rapporti molto diversi, a seconda del tipo di terreno, per es. nelle sabbie assai più rilevante è l'attrito e praticamente nulla è la coesione.

I valori di angolo attrito interno e di coesione riportati in tabella 1 per i campioni compresi prelevati rispettivamente alle profondità di 4.5-5.0 m, 14,7-15,1 m sono rappresentativi di materiali sabbiosi, quello prelevato alla profondità di 21,1-21,5 m si può riferire ad una sabbia limosa.

4.2 Area dello scavalco ferroviario

Durante l'esecuzione dei sondaggi geognostici sono stati prelevati campioni indisturbati da differenti profondità.

Complessivamente i campioni indisturbati di materiale prelevati assommano a 40 e sono stati sottoposti a prove di classificazione (descrizione geotecnica, contenuto d'acqua naturale, limiti di Atterberg, peso di volume), prove edometriche, prove di taglio diretto, 1 prova triassiale non consolidata non drenata, 2 prove ad espansione laterale libera e misurazioni con il Pocket Penetrometer.

Una sintesi dei risultati delle prove di laboratorio eseguite sui campioni anzidetti è riportata nelle tabelle allegate.

Dall'esame dei dati disponibili si evidenzia che i valori dell'indice di plasticità IP risultano compresi tra 27% e 50%. Questi valori medio alti sono direttamente riconducibili alla natura argilloso limosa dei campioni tipici di ambiente lagunare, così come individuati anche dalla carta della plasticità di Casagrande (limi inorganici di alta compressibilità e argille organiche).

Il comportamento plastico è altresì riconoscibile osservando il valore del contenuto d'acqua naturale (W_n), prossimo al limite di liquidità (LL), che sottolinea nuovamente la tendenza del materiale campionato ad un comportamento caratterizzato da una bassa consistenza e alta plasticità.

I parametri di compressibilità, riferiti all'intervallo di pressione 1.00-2.00 (kg/cm²), indicano la presenza di argille normal-consolidate con valori di OCR compresi tra 1 e 2.

Con riferimento a quanto esposto nei precedenti capitoli e in ragione della costanza degli spessori dei vari livelli, è stata proposta un'unica stratigrafia di progetto per la porzione di sottosuolo indagato. Tale stratigrafia è da ritenersi rappresentativa per i calcoli finalizzati alla progettazione delle opere connesse alla separazione dei traffici nella stazione di Pisa C.le.

In base alla distribuzione planoaltimetrica dei livelli individuati ed alla omogeneità dei parametri geotecnici determinati, sono stati distinti cinque livelli stratigrafici più uno strato sommitale di riporto dello spessore medio di due metri.

Nell'area in oggetto possono essere presenti fenomeni locali con caratteristiche lievemente diverse da quella qui presentata, essenzialmente di carattere litologico; comunque la stratigrafia di progetto indicata è da considerarsi quella più cautelativa ed idonea a caratterizzare l'insieme delle condizioni rinvenute.

Relativamente ai dati provenienti dalle prove penetrometriche si è ritenuto opportuno non introdurre fattori di riduzione dei valori di resistenza registrati, ma, piuttosto, di verificare l'eventuale inaffidabilità di alcuni dati dal confronto con il campo dei valori acquisiti, a parità di condizioni lito-stratigrafiche, in verticali di indagine contigue e confrontabili.

In modo analogo si è operato con i risultati delle prove di laboratorio (incluse le misurazioni dei valori di Pocket Penetrometer) qualora risultassero palesemente non concordi con i parametri derivanti dalle correlazioni con le prove in situ.

Tale assunzione trova fondamento sia dal punto di vista quantitativo (il numero dei campioni sottoposti a prove di laboratorio è limitato nei confronti dei dati forniti dalle prove in situ) sia dal punto di vista qualitativo, essendo solo i campioni migliori sottoposti a tali tipi di prove.

Con riferimento a quanto detto, si sottolinea comunque che i parametri geotecnici associati a ciascun livello sono da considerarsi cautelativi in quanto determinati in funzione delle condizioni maggiormente sfavorevoli riscontrate in sito (vedi fig. 3).

5. ASPETTI IDROGEOLOGICI

I valori di permeabilità misurati confermano la successione già elaborata sulla base delle altre indagini effettuate. Si distinguono pertanto i due livelli A e B (sabbie fini e silt), anche se non è possibile individuare un limite di separazione ben marcato tra i due, al pari delle interpretazioni già dei sondaggi e delle prove penetrometriche statiche.

I valori di permeabilità per il livello A sono compresi tra $1.2 \cdot 10^{-5}$ m/s e $8.3 \cdot 10^{-7}$ m/s, mentre per il livello B variano da $1.97 \cdot 10^{-5}$ m/s a $4.7 \cdot 10^{-6}$ m/s.

Ai fini idrogeologici questi due strati si comportano praticamente allo stesso modo e sono sede della falda libera, stabilizzatasi a 2.1 metri dal piano campagna. E' invece fortemente distinguibile il livello C di argille normal consolidate. Nelle prove Lefranc non è stato possibile apprezzare il ben che minimo abbassamento del livello d'acqua all'interno del tubo di rivestimento. Si attesta pertanto come uno strato impermeabile a protezione della falda più profonda. Quest'ultima è forse individuabile a partire dai 24 metri di profondità anche se, in mancanza di prove di permeabilità, ci si è basati sulla descrizione della litologia dai sondaggi per la sua definizione.

Con le osservazioni di cui sopra, e sulla base degli studi geomorfologici e geologici considerati, è corretto riconoscere per l'area in oggetto un livello potente oltre 10 metri di argilla normal consolidata che si pone, assieme al livello D, a protezione della falda più profonda.

La falda libera superiore è pertanto soggetta a oscillazioni di livello in dipendenza degli apporti meteorici legati ai cicli stagionali.

6. PROBLEMI GEOTECNICI CONNESSI CON LA REALIZZAZIONE DELLE OPERE

Le opere da realizzare consistono essenzialmente in una galleria artificiale che sottopassa un fascio binari più altre opere accessorie minori.

La galleria artificiale alloggerà due binari per il collegamento Roma-Pisa (via Collo d'Oca) e per un certo tratto un terzo binario di collegamento con una zona di servizi.

Tra il fascio binari che scavalcherà la galleria sono anche le due vie di corsa della linea Firenze-Pisa.

Il binario per il collegamento (via Collo d'Oca) avrà il punto più basso del piano ferro a circa 8 m dal p.c. il che comporta un'altezza di scavo di circa 9.50 m per arrivare alla quota di imposta della soletta inferiore.

In aggiunta all'opera di scavalco vera e propria si raggiungono le quote di sottopasso con due trincee a profondità variabile.

Gli aspetti geotecnici che pertanto richiedono attenzione sono:

- il sostegno degli scavi necessari all'esecuzione dei manufatti;
- l'impermeabilizzazione del fondo scavo;
- l'impermeabilizzazione delle pareti di scavo nei tratti di rampa non protetti da paratie;
- il problema di galleggiamento delle opere;
- i problemi di emungimento in corso d'opera.
- impatto sulla falda

Mentre i primi punti rappresentano problematiche che possono essere risolti con interventi di carattere strutturale, gli ultimi due costituiscono un problema che, date le caratteristiche dell'opera da realizzare, investe più direttamente gli aspetti idrogeologici del sottosuolo.

Di seguito vengono esaminati sinteticamente i vari aspetti elencati, rimandando alle più avanzate fasi di progettazione i dettagli risolutivi.

6.1. Sostegno degli scavi

Il sostegno degli scavi, almeno di quelli più profondi sarà effettuato con paratie in c.a. scavate con l'ausilio di fanghi bentonitici. In alternativa si potrà ricorrere ai fanghi con polimeri previo uno studio preliminare sul tipo di polimero più idoneo al tipo di terreno.

Le paratie saranno costituite da pannelli di diaframma di lunghezza in pianta compresa tra 2.5 m e 3.5 m con accoppiamento maschio-femmina; lo spessore della paratia nei punti dove lo scavo risulta maggiore sarà di 1.20 m.

La profondità di scavo sarà variabile da un minimo di 3.50 m agli estremi della trincea di raccordo a 9.50 m in corrispondenza del manufatto di scavalco.

Poiché il fondo scavo si colloca entro uno strato di sabbie e sabbie limose per una buona parte del tracciato ed appena entro lo strato coesivo per la parte di scavo più profondo in corrispondenza del monolite, è richiesta la realizzazione del tappo per evitare lo sfondamento del fondo-scavo.

Il tappo, che dovrà essere realizzato con tecnica in jet-grouting compenetrato, avrà uno spessore variabile a seconda della quota di fondo scavo, e potrà svolgere anche la funzione di puntone tra le due pareti della diaframmatura.

6.2 Impermeabilizzazione del fondo scavo

Il fondo scavo nella zona di scavalco risulta in materiale coesivo per circa 2 m, a partire da circa -7.50 dal p.c. attuale; esso risulta pertanto impermeabile e la quantità di acqua da emungere per tenerlo all'asciutto risulta molto modesta, allontanabile con una pompa a fondo scavo.

Lungo la rampa dei muri ad "U" invece, dove il fondo scavo sale al di sopra di 7.50, il terreno è sabbioso e lascia filtrare una notevole quantità di acqua. La presenza delle paratie che lo confinano da due parti e che sono ben immorsate nel materiale impermeabile non consente il passaggio dell'acqua e questa sarà soltanto quella proveniente dalle due testate di scavo: un buon sistema di emungimento con well points può consentire di mantenere la quantità di acqua che entra nello scavo entro limiti accettabili. Un migliore controllo dell'acqua di falda che entra nello scavo e la sua pressoché totale eliminazione si può ottenere mediante la realizzazione di un "tappo" a spessore variabile per tutta la rampa, tappo che poi svolge anche un'altra funzione ben più importante di stabilizzazione del fondo scavo, e con la chiusura delle 2 testate di rampa con un diaframma plastico da demolire parzialmente al termine dei lavori.

6.3 Impermeabilizzazione delle pareti di scavo

L'impermeabilizzazione delle pareti di scavo è garantita dalla presenza delle diaframature per la maggior parte dell'estensione della trincea; per migliorare la tenuta dei giunti, anche per la presenza del materiale sabbioso, si suggerisce la sigillatura locale del giunto per una profondità di 10 m dal p.c. con jet-grouting o iniezioni attraverso canne a manchette.

Dove la profondità di scavo non giustifica il diaframma (< 3.50 m), non potendosi realizzare scavi a cielo aperto perché l'influenza dell'emungimento si risentirebbe a grande distanza vista l'alta permeabilità dei terreni sabbiosi dei primi 7÷8 m, si potrà impiegare il jet-grouting con il doppio scopo di sostegno delle pareti e di impermeabilizzazione delle stesse.

6.4 Problemi di galleggiamento

La stabilità delle opere nei confronti dei problemi di galleggiamento può essere affrontata ricercando un coefficiente di sicurezza molto basso, dell'ordine di 1.02, a condizione di operare tutta una serie di assunzioni cautelative:

- peso di volume del calcestruzzo $\gamma_c \leq 24 \text{ kN/m}^3$;

- livello della falda a -0.5 da p.c. o superiore;
- assenza di ballast ed armamento;
- non presa in considerazione di attrito sulle pareti.

Se risultasse necessario si può chiamare in causa parte del peso del tappo ancorando in un certo numero di colonne delle barre di trazione, a loro volta ancorate alla struttura.

6.5 Emungimento in corso d'opera

Alla luce di quanto esposto nei precedenti punti la sigillatura dei giunti delle paratie laterali, la presenza dello strato coesivo impermeabile alla base, la formazione di un tappo per la sicurezza del fondo scavo, la chiusura temporanea delle testate con diaframmi plastici, si può affermare che l'acqua da emungere nel corso dei lavori sarà pochissima e quindi gli scavi, in funzione della parzializzazione del cantiere, potranno essere tenuti all'asciutto mediante qualche pompa messa a dimora in un pozzetto di avanzamento. Sarà necessario un pompaggio più energico solo nella fase di svuotamento del catino così realizzato.

Ai soli fini di operatività del cantiere si suggerisce che, ove il fondo scavo termina in materiale coesivo, venga steso uno spessore di sabbia di 10 cm per garantire la transitabilità e la pulizia dello stesso.

6.6 Impatto sulla falda

La costruzione delle opere necessarie per la separazione dei traffici (struttura sotterranea di scavalco e relative rampe di discesa e salita), soprattutto per la presenza di diaframature a presidio degli scavi, taglierà in due il parco binari della stazione per quanto riguarda la libera circolazione dell'acqua negli strati superficiali più granulari, fino alla profondità di 7.50÷9.0 m.

Una interruzione di questo genere al libero deflusso della falda, seppure stazionaria come è risultato dalle misure di velocità di flusso idrico con micromulinello, su di un tratto così lungo appare senza dubbio problematico dal punto di vista idrogeologico ed ambientale.

A questo problema si può ovviare adottando soluzioni, già adottate in lavori simili, che consentano, ogni 15÷20 m, un collegamento idraulico tra le parti a valle e a monte dell'opera da realizzare.

Il collegamento tra i due lati del piazzale può essere ottenuto realizzando al di sotto della soletta di base delle opere veri e propri dreni in ghiaia rivestiti con geotessuto o con tubi finestrati che collegano due fori lasciati nei diaframmi e chiusi temporaneamente con saracinesche o con un tappo di bentonite. Laddove il terreno al di sotto dei futuri manufatti risulterà sabbioso sarà sufficiente lasciare solamente i fori nella diaframmatrice senza realizzare il dreno di collegamento.

7. CLASSE DI PERICOLOSITA'

L'inserimento dell'area nella classe di pericolosità viene effettuato tenendo conto dell'inquadramento geologico e stratigrafico dell'area in esame e da quanto previsto dalla Deliberazione n° 94 del 12 febbraio 1985 del C.R. della Toscana.

Per l'area in esame si ritiene opportuno l'inserimento in classe 1 di pericolosità "pericolosità irrilevante". In questa classe sono da ritenersi improbabili "fenomeni di amplificazione o instabilità indotta dalla sollecitazione sismica".

Per quanto concerne le condizioni geologico-tecniche l'area presa in esame è ritenersi, dal punto di vista geologico e geomorfologico, stabile.

8. CLASSE DI FATTIBILITA'

Essa è ricavata dalla sovrapposizione della carta di pericolosità, delle destinazioni d'uso delle aree oggetto di intervento; individua quindi, i piani di indagine da eseguire prima dei progetti esecutivi e gli eventuali piani di consolidamenti e bonifica.

L'attribuzione della classe di fattibilità tiene conto necessariamente delle caratteristiche dell'intervento da realizzare e la tipologia delle opere e della loro incidenza in rapporto alla stabilità dell'insieme opera terreno.

Dal punto di vista dei carichi indotti sul terreno l'intervento può essere considerato "costruzioni di modesto rilievo in rapporto alla stabilità dell'insieme opera-terreno che ricadono in aree stabili note" essendo state già indagate a livello geologico e geotecnico.

Tuttavia per quanto riguarda la tipologia delle opere da realizzare esse presentano problematiche idrogeologiche e soprattutto di impatto sulla falda, che possono essere affrontate con gli interventi idraulici descritti nei punti 6.5 e 6.6.

Si ritiene di attribuire, anche tenendo conto della classe di "pericolosità irrilevante" le opere in progetto alla classe 2 di fattibilità (*fattibilità con normali vincoli da precisare a livello di progetto*). Tenendo conto l'area non presenta fenomeni di instabilità dal punto di vista geologico e geomorfologico, che le indagini geognostiche per la caratterizzazione geotecnica dei terreni sono già state effettuate nell'autunno u.s., e che sono state individuate le problematiche da affrontare in sede progettuale si può ritenere che "gli interventi previsti sono attuabili senza particolari condizioni".

9. CONCLUSIONI

I terreni della stazione di Pisa dove si dovrà realizzare l'opera di scavalco, unitamente alle altre opere accessorie, risultano costituiti da uno spessore di circa 8 m di materiale prevalentemente granulare con presenza più o meno importante di limo che ne pregiudica le buone qualità, seguito da una formazione coesiva tenera di notevole spessore in condizioni di normal consolidazione o di leggera sovraconsolidazione.

La falda risulta prossima al piano campagna, -1.5 m circa; comunque nei calcoli di opere definitive si dovrà, cautelativamente, considerare che essa raggiunga un livello di poco ad esso inferiore.

Le opere da realizzare consistono essenzialmente in una galleria artificiale che sottopassa un fascio binari più altre opere accessorie minori.

La galleria artificiale alloggerà due binari per il collegamento Roma-Pisa (via Collo d'Oca) e per un certo tratto un terzo binario di collegamento con una zona di servizi. Ciò consentirà lo scavalco dei binari della linea Firenze-Pisa.

Il binario per il collegamento (via Collo d'Oca) avrà il punto più basso del piano ferro a circa 8 m dal p.c. il che comporta un'altezza di scavo di circa 9.50 m per arrivare alla quota di imposta della soletta inferiore. Il raccordo con la superficie sarà realizzato mediante due rampe in trincea a profondità decrescente.

L'opera sarà realizzata mediante diaframature in c.a.. Per tenere conto dei problemi geotecnici connessi con la realizzazione delle opere, queste saranno completate da

- un tappo in jet-grouting con la doppia funzione di elemento rigido di contrasto tra le due diaframature opposte;
- puntoni fermati o provvisori in testa nelle sezioni di maggiore scavo;
- un cordolo di collegamento in testa ai pannelli di diaframma;
- un sistema di pompaggio dell'acqua per lo svuotamento dello scavo.

Per quanto riguarda l'impatto che l'opera determinerà sulla falda dovranno essere adottati accorgimenti idonei, quali quello descritto nel punto 6.6, per evitare di interporre un ostacolo così esteso alla libera circolazione dell'acqua di falda.

Sulla base di quanto esposto nei paragrafi precedenti si ritiene di poter inserire l'intervento in progetto nella classe 1 di pericolosità "pericolosità irrilevante". In questa classe sono da ritenersi improbabili "fenomeni di amplificazione o instabilità indotta dalla sollecitazione sismica".

Inoltre essendo in presenza di un intervento da realizzarsi in un'area geologicamente e geomorfologicamente stabile, ma che presenta problematiche di impatto sulla falda, si ritiene di attribuire le opere in progetto alla classe 2 di fattibilità (*fattibilità con normali vincoli da precisare a livello di progetto*) e pertanto "gli interventi previsti sono attuabili senza particolari condizioni", se non quelle che saranno definite a livello progettuale.

Pisa 19 dicembre 2001



IL FUNZIONARIO GEOLOGO

Cauli dott. Luciano

Luciano Cauli

Allegato N. 1

PROVE DI LABORATORIO

Sondaggio	Camp.	Prof. (m)	Descrizione	Granulometria			
				ghiaia (%)	sabbia (%)	limo (%)	argilla (%)
S1	C1	3.0	Limo sabbioso argilloso		22	61	17
S1	C2	6.0	Sabbia con limo debolmente argilloso		56	36	8
S1	C3	9.0	Limo e argilla con tracce di sabbia		5	48	47
S1	C4	12.0	Argilla con limo		2	37	61
S2	C1	3.0	Sabbia con limo		62	38	
S2	C2	6.0	Sabbia limosa		89	11	
S2	C3	9.0	Limo e argilla		2	49	49
S2	C4	12.0	Argilla limosa		2	25	73
S3	C1	3.0	Sabbia con limo		64.0	32.0	4.0
S3	C2	6.0	Sabbia limosa		89.0	11.0	
S3	C3	9.0	Limo e argilla con tracce di sabbia		3.0	49.0	48.0
S3	C4	12.0	Argilla limosa		3.0	18.0	79.0
S4	C1	4.0	Sabbia limosa		88.00	11.9	0.1
S4	C2	9.0	Limo con argilla		0.90	70.5	28.6
S4	C3	15.0	Argilla con limo	0.6	2.30	32.4	64.7
S4	C4	18.0	Argilla con limo	0.1	0.8	34.4	64.7
S5	C1	3.0	Sabbia argillosa con limo		51	39	10
S5	C2	6.0	Sabbia limosa		83	17	
S5	C3	9.0	Argilla con limo		3	44	53
S5	C4	12.0	Argilla con limo		2	33	65
S6	C1	4.5	Sabbia limosa	0.20	77.2	22.6	
S6	C2	9.0	Limo con argilla		3	62.92	34.08
S6	C3	15.0	Limo con argilla		1.2	66.63	32.17
S6	C4	18.0	Limo con argilla		1	66.59	32.41
S7	C1	3.0	Limo debolmente argilloso e sabbioso	0.10	7.5	82.6	9.8
S7	C2	7.5	Limo con sabbia		35	65	
S7	C3	8.0	Limo con argilla		1.7	62.7	35.6
S7	C4	12.0	Argilla con limo	0.10	1.2	41.4	57.3
S8	C1	4.0	Limo argilloso debolmente sabbioso		7	71	22
S8	C2	9.0	Limo con argilla		3	57	40
S8	C3	15.0	Argilla con limo		2	30	68
S8	C4	18.0	Argilla con limo		4	36	60
S9	C1	4.0	Limo con argilla		2.0	62.0	36.0
S9	C2	9.0	Limo e argilla		2.0	50.0	48.0
S9	C3	15.0	Argilla con limo		2.0	31.0	67.0
S9	C4	18.0	Argilla con limo		3.0	30.0	67.0
S10	C1	4.0	Sabbia limosa		86	14	
S10	C2	8.0	Sabbia limosa		79.1	20.9	
S10	C3	15.0	Limo con argilla debolmente sabbioso	1.00	5.8	64.2	29
S10	C4	18.0	Limo con argilla	0.10	1.4	65.92	32.58

Tab.2 – Analisi di laboratorio - Granulometria

Sondaggio	Camp.	Prof. (m)	γ (kN/m ³)	γ_d (kN/m ³)	γ_s (kN/m ³)	Wn (%)	LL (%)	LP (%)	IP (%)	IL	e
S1	C1	3.0	18.81	14.15	25.6	32.95	N.L	N.P.			0.81
S1	C2	6.0	19.04	14.13	25.59	34.72	N.L	N.P.			0.81
S1	C3	9.0	17.56	13.04	25.74	34.74	60	27	33	0.2345	0.97
S1	C4	12.0	16.22	11.01	25.6	47.33	65	26	39	0.5469	1.32
S2	C1	3.0	18.18	13.39	25.6	35.85	N.L	N.P.			0.91
S2	C2	6.0	18.76	14.16	25.73	32.5	N.L	N.P.			0.82
S2	C3	9.0	17.87	12.37	25.99	44.48	60	26	34	0.5435	1.1
S2	C4	12.0	16.27	10.34	25.6	57.3	72	27	45	0.6733	1.47
S3	C1	3.0	19.01	14.20	26.12	33.86	N.L	N.P.			0.840
S3	C2	6.0	19.01	14.39	25.93	32.09	N.L	N.P.			0.800
S3	C3	9.0	17.65	11.4	25.45	54.84	60	25.00	35	0.8526	1.23
S3	C4	12.0	16.42	10.14	26.12	61.97	74	26.00	48	0.7494	1.58
S4	C1	4.0	18.60		26.50	34	n.d.	N.P.			
S4	C2	9.0	17.6		26.2	42.2	57	30.0	27	0.4519	
S4	C3	15.0	16.2		26.1	60.6	78	32.0	45	0.6356	
S4	C4	18.0	16.5		26.3	57.1	75	37.0	38	0.5289	
S5	C1	3.0	18.71	14.17	25.75	32.03	N.L	N.P.			0.82
S5	C2	6.0	18.81	14.3	24.8	31.57	N.L	N.P.			0.73
S5	C3	9.0	15.9	10.01	25.75	58.79	68	26	42	0.7807	1.57
S5	C4	12.0	16.32	10.56	25.75	54.62	76	26	50	0.5724	1.44
S6	C1	4.5	18.96	13.84	25.92	37.04	N.L	N.P.			0.87
S6	C2	9.0	16.65	11.08	25.24	50.2	65	26	39	0.6205	1.28
S6	C3	15.0	16.38	10.54	24.7	55.36	78	28	50	0.5472	1.34
S6	C4	18.0	16.32	12.19	25.71	33.86	75	28	47	0.1247	1.11
S7	C1	3.0	19		26.3	30.5	37	24	13	0.5	
S7	C2	7.5	18.7		26.6	27	n.d.	N.P.			
S7	C3	8.0	18		26.4	39.2	50	28	22	0.5091	
S7	C4	12.0	16.2		27.1	64.1	75	35	40	0.7275	
S8	C1	4.0	19.45	15.22	25.75	27.84	N.L	N.P.			0.69
S8	C2	9.0	17.42	11.92	25.43	46.18	61	24	37	0.5995	1.13
S8	C3	15.0	15.77	9.41	25.01	67.48	73	25	48	0.885	1.66
S8	C4	18.0	16.09	10.2	25.75	57.71	72	25	47	0.696	1.52
S9	C1	4.0	18.36	13.13	26.12	39.88	40	21.00	19	0.9937	0.99
S9	C2	9.0	17.52	12.28	26.12	42.63	56	26	30	0.5543	1.130
S9	C3	15.0	16.36	10.59	26.12	54.49	70	26	44	0.6475	1.470
S9	C4	18.0	16.55	10.83	26.12	52.84	68	27	41	0.6302	1.41
S10	C1	4.0	18.9	14.37	26.22	31.53	N.L	N.P.			0.82
S10	C2	8.0	18.96	15.26	25.1	24.25	N.L	N.P.			0.64
S10	C3	15.0	16.32	10.11	25.63	61.36	67	27	40	0.859	1.53
S10	C4	18.0	16.7	10.93	25.29	52.73	70	27	43	0.5984	1.31

γ = Peso dell'unità di volume totale - γ_s = Peso dell'unità di volume della parte solida - γ_d = Peso dell'unità di volume del terreno secco

Tab 3 – Analisi di laboratorio - Parametri fisici ed Indici

Sondaggio	Camp.	Prof. (m)	Taglio diretto		Triassiale UU	ELL
			c	ϕ'	c_u	c_u
			(kN/m ²)	°	(kPa)	(kPa)
S1	C1	3	0	31		
S1	C2	6	14	31		
S1	C3	9	25	3		
S1	C4	12	4	6		
S2	C1	3	0	35		
S2	C2	6	21	32		
S2	C3	9	17	4		
S2	C4	12	3	2		
S3	C1	3,00	19	32		
S3	C2	6,00	0	41		
S3	C3	9,00	19	4	29*	
S3	C4	12,00	25	3	17,5*	
S4	C1	4	2	33,5		
S4	C2	9	5	24		
S4	C3	15,00	2	20,5		
S4	C4	18,00	2	22,5		
S5	C1	3	12	30		
S5	C2	6	18	35		
S5	C3	9	5	19	20*	
S5	C4	12	14	11	20*	
S6	C1	4,5	0	39		
S6	C2	9	2	22	15*	
S6	C3	15	25	3	20*	
S6	C4	18	20	5	12,5*	
S7	C1	3	8	31,5	46	
S7	C2	7,5	5	34,5		
S7	C3	8	2	26,5		
S7	C4	12	2	20,5		
S8	C1	4	6	33		
S8	C2	9	17	3	27,5*	
S8	C3	15	14	7	5*	4
S8	C4	18	3	4	10*	3
S9	C1	4,00	19	7	12,5*	
S9	C2	9	7	14	30*	
S9	C3	15,00	14	6	11,5*	
S9	C4	18	10	10	10*	
S10	C1	4	0	40		
S10	C2	8	0	42		
S10	C3	15	4	15	7,5*	
S10	C4	18	10	10	21,5*	

c = coesione drenata - ϕ' = angolo di attrito interno - c_u = coesione non drenata - * = c_u da pocket penetrometro

Tab. 4 - Analisi di laboratorio - Prove di taglio diretto - triassiali - ELL

Sondaggio	Camp.	Prof. (m)	Edometrica				OCR
			σ'_p (kPa)	M (MPa)	k (m/s)	c_v (m ² /s)	
S1	C3	9	180	2.9			2.0
S2	C3	9	155	2.3			2.1
S4	C3	15	150	1.83	2.60E-10	4.90E-04	1.1
S8	C3	15		1.9			

σ'_p = pressione di preconsolidazione - M = modulo edometrico - K = coeff. di permeabilità
 c_v = coeff. di consolidazione - c_α = coeff. di consolidazione secondaria - OCR = grado di consolidazione

Tab.5 – Analisi di laboratorio – Prove edometriche

SONDAGGI					
D1		D2		D3	
1	2	1	2	1	2
8.27E-07	4.7E-06	3.07E-06	N.V.	1.55E-05	1.97E-05

SONDAGGI					
D4		D5			
1	2	1	2	3	4
1.25E-05	N.V.	3.77E-07	N.V.	N.V.	N.V.

N.V.: non valutabile per mancanza di abbassamenti apprezzabili – livello impermeabile.

Tab. 3.6 – Valori del coefficiente di permeabilità k (m/s).