

IDROVIA FERRARESE

DRG 603/2020 ADEGUAMENTO IDROVIA FERRARESE AL TRAFFICO  
IDROVIARIO DI V CLASSE EUROPEA.  
COMPLETAMENTO LAVORI DELLA CONCA DI VALPAGLIARO A VALLE  
DELLA STESSA FINO ALLA PROGRESSIVA 2750 IN LOC FINAL DI  
RERO.COMUNI DI TRESIGNANA E DI FERRARA .  
2 LOTTO 1 STRALCIO/PARTE

RUP:

ING. DAVIDE PARMEGGIANI  
REGIONE EMILIA-ROMAGNA - DIREZIONE GENERALE CURA DEL TERRITORIO E DELL'AMBIENTE  
AGENZIA REGIONALE PER LA SICUREZZA TERRITORIALE E LA PROTEZIONE CIVILE  
SERVIZIO SICUREZZA TERRITORIALE E PROTEZIONE CIVILE  
FERRARA

PROGETTAZIONE:

RESPONSABILE INTEGRAZIONE PRESTAZIONI SPECIALISTICHE:  
DOTT. ING. SIMONE VENTURINI

RESPONSABILE DELLA PROGETTAZIONE  
DOTT. ING. MARCO LORA



Via Carlo Cattaneo, 20 - 37121 VERONA (VR)  
Tel. +39 045 8053611 - Fax. +39 045 8011558  
E-Mail: [technital@technital.it](mailto:technital@technital.it)

PROGETTO ESECUTIVO

TITOLO ELABORATO:

Relazioni tecniche e specialistiche  
**RELAZIONE GEOTECNICA**

ELABORATO N° :

**II134P-RT-008**

		ELABORATO		CONTROLLATO		APPROVATO	
SIGLA		E. FRESIA		M. LORA		M. LORA	
REVISIONE	N.	DATA	DESCRIZIONE				
	0	Luglio 2021	EMISSIONE PER APPROVAZIONE				
	1	Settembre 2021	RECEPIMENTO OSSERVAZIONI VERIFICATORE				
	2						

NOME FILE :

II134P-RT-008\_1\_Relazione\_Geotecnica

DATA: **Settembre 2021**

SCALA :

**Regione Emilia Romagna  
Amministrazione Provinciale di Ferrara**

**DGR 603/2020. ADEGUAMENTO IDROVIA FERRARESE AL TRAFFICO IDROVIARIO DI V CLASSE EUROPEA. COMPLETAMENTO LAVORI DALLA CONCA DI VALPAGLIARO A VALLE DELLA STESSA FINO ALLA PROGRESSIVA 2750 IN LOC. FINAL DI RERO. 2 LOTTO 1 STRALCIO/PARTE**

**PROGETTO ESECUTIVO**

**RELAZIONE GEOTECNICA**

## INDICE

1	PREMESSA	3
1.1	Oggetto e scopo	6
2	DOCUMENTI DI RIFERIMENTO	7
2.1	Normative e raccomandazioni	7
2.2	Documentazione di progetto	7
3	GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA	9
3.1	Premessa	9
3.2	Geologia	9
3.1	Geomorfologia	13
4	IDROGEOLOGIA	18
5	INDAGINI GEOGNOSTICHE	20
6	MODELLO STRATIGRAFICO	31
7	ANALISI DEI DATI	41
7.1	Prove di laboratorio	41
7.1	SPT	59
7.2	Prove CPT	66
7.3	Prove su pozzetti	70
8	CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI	72
9	PONTI SULL'IDROVIA E RILEVATI DI APPROCCIO	75
10.1.	Scotico, bonifica e piani di posa	76
10.2.	Valutazione dei cedimenti	76
10.3.	Verifiche di stabilità	83
10	CONCLUSIONI	92

ALLEGATO - ELABORAZIONE PROVE PENETROMETRICHE

## 1 PREMESSA

La presente relazione ha per oggetto lo studio dei terreni interessati dall'adeguamento dell'idrovia ferrarese al traffico idroviario di classe V Europea.

I lavori finanziati sono quelli relativi al 2 Lotto 1 stralcio, compreso fra il mandracchio a valle della conca di Valpagliaro e la fine della curva in corrispondenza di Finale di Rero. I Comuni interessati sono quelli di Formignana, Tresigallo e Ferrara.

Gli interventi di carattere idroviario previsti nella progettazione si integrano con altre opere finalizzate più specificamente alla sicurezza idraulica, ed in particolare con la traversa di Fiscaglia prevista sul Po di Volano, immediatamente a valle della diramazione con l'idrovia nell'omonima località.

La precedente progettazione definitiva/esecutiva comprendeva i seguenti interventi:

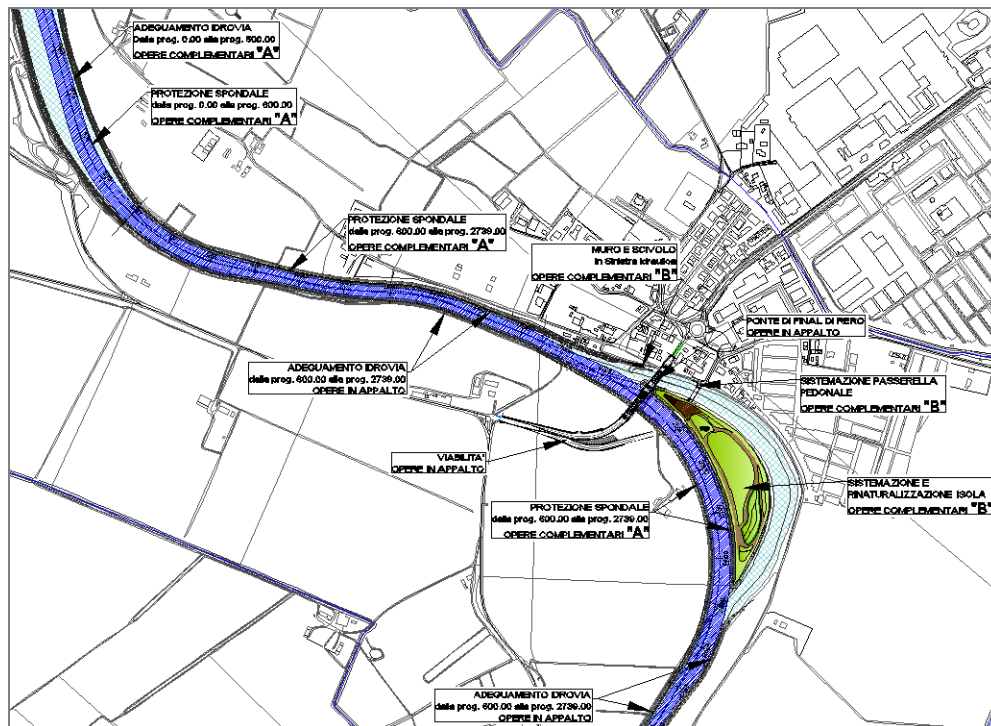
- Adeguamento della conca di navigazione di Valpagliaro alla Va Classe Europea;
- Adeguamento alla Va classe del tratto idroviario compreso tra la conca di Valpagliaro e la sezione terminale della modifica della curva di Finale di Rero (corrispondente alla sezione n° 56 ARNI) assicurando un rettangolo di navigazione a doppio senso di marcia avente larghezza 42 m;
- Realizzazione di un nuovo ponte in località Cà Dondi;
- Realizzazione di una passerella ciclopedonale che collega Tresigallo con la nuova isola che si viene a creare fra l'attuale tracciato dell'idrovia ed il nuovo tracciato di progetto in corrispondenza della curva di Final di Rero;
- Riqualficazione e sistemazione dell'isola sopra citata;
- Realizzazione di uno scivolo per natanti in corrispondenza della curva di Final di Rero;
- Rifacimento del ponte di Final di Rero;
- Rifacimento del ponte in località Eredità;
- Rifacimento della passerella pedonale di Migliarino utilizzando una struttura mobile;
- Innalzamento del ponte stradale di Migliarino;

- Ricalibratura del tratto compreso fra la sezione 56 e la fine dell'abitato di Migliarino garantendo il traffico a senso unico alternato assicurando un rettangolo di navigazione avente larghezza pari a 24 m;
- Scavo del bacino di evoluzione in corrispondenza del tratto finale del lotto alla diramazione del Po di Volano dell'idrovia;
- Protezione delle sponde con marginamenti su palancole in alcuni tratti dell'abitato di Migliarino.

Dal momento che l'importo lavori dell'intero progetto risulta superiore ai finanziamenti disponibili, l'Ente Appaltante ha deciso di procedere per stralci iniziando con gli interventi previsti ad inizio tratto, a meno della conca di Valpagliaro.

Ne consegue che il primo stralcio, di cui il presente documento rappresenta la relazione geotecnica, comprende i seguenti interventi (fig. 1):

- Demolizione e ricostruzione del ponte di Final di Rero con annessa viabilità;
- Variante planimetrica dell'idrovia con rimodellamento della curva a Final di Rero ad un raggio di curvatura di 450 m; in tal modo si viene a creare un'isola interposta fra nuova e vecchia idrovia;
- Passerella ciclopedonale che collega Tresigallo alla nuova isola in corrispondenza della curva di Final di Rero. Allo scopo si è previsto di utilizzare il ponte provvisorio esistente realizzato nell'ambito di altro appalto;
- Riqualficazione e sistemazione dell'isola sopra citata, anche mediante l'abbancamento di materiale per circa 1,5 m al di sopra dell'attuale p.c.;
- Realizzazione di uno scivolo per natanti in corrispondenza della curva di Final di Rero, in sinistra idrografica;
- Adeguamento e risagomatura del tratto idroviario dal punto 0 a valle della conca di Valpagliaro sino alla sezione terminale della modifica della curva di Final di Rero, corrispondente alla sezione n° 56ARNI, progressiva Km 2+750, assicurando un rettangolo di navigazione in conformità alle disposizioni CEM per traffico di V classe.



**Figura 1. Planimetria generale degli interventi di primo stralcio**

Ai fini di una corretta caratterizzazione geologica e geotecnica dell'intero Lotto (conca di Valpagliaro – Migliarino) nel mese di ottobre 2004 è stata eseguita una prima campagna geognostica costituita da sondaggi a carotaggio continuo, prove in sito, prelievo di campioni con relative prove di laboratorio e prove penetrometriche statiche continue con piezocono. Una seconda campagna geognostica integrativa costituita da sondaggi con prelievo di campioni, prove di laboratorio, prove penetrometriche continue statiche e dinamiche, è stata condotta durante il mese di novembre 2008 in corrispondenza di siti precedentemente non indagati. Sono state acquisite inoltre le indagini sito specifiche eseguite nel 2014 dalla ditta COOP.Costruzioni in corrispondenza della passerella pedonale e del ponte di Final di Rero.

Le stratigrafie dei sondaggi geognostici, le diagrafie delle prove penetrometriche statiche e dinamiche, la documentazione relativa alle prove in sito e di laboratorio è contenuta in specifici elaborati relativi rispettivamente alle indagini geognostiche anno 2004, anno 2008 e anno 2014.

In calce al presente documento sono allegate le interpretazioni delle prove penetrometriche statiche del 2004 e 2008.

Il presente documento si integra con gli elaborati citati nel testo ed in particolare con la carta geologica in scala 1:10.000, planimetria con ubicazione indagini alla stessa scala e profilo geologico e geotecnico.

### **1.1 Oggetto e scopo**

Per una migliore comprensione delle tematiche trattate l'inquadramento geologico, stratigrafico e geognostico fornito è relativo all'intero tratto di competenza progettuale fra la Conca di Valpagliato e Migliarino. Successivi dettagli riguarderanno le aree e le opere di competenza del primo stralcio funzionale cui si riferisce in maniera specifica il presente elaborato.

Si discuteranno i seguenti temi per le opere principali:

- analisi ed interpretazione delle indagini esperite;
- caratterizzazione stratigrafica di dettaglio e geotecnica dei terreni incontrati;
- scelta della tipologia di fondazione del ponte sull'idrovia, realizzazione dei tratti in rilevato con relativi scotici e bonifici, valutazione dei cedimenti e verifiche di stabilità per scavi e rilevati.

## **2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO**

### **2.1 Normative e raccomandazioni**

- Raccomandazioni AGI (Associazione Geotecnica Italiana) 1977: “Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche”;
- L. 64/1974 “Provvedimenti per le costruzioni con particolari prescrizioni per le zone sismiche” e s.m.ed.i.;
- Decreto Ministeriale 11.03.1988, “Norme tecniche riguardanti le indagini sui terreni e sulle rocce, la stabilità dei pendii naturali e delle scarpate, i criteri generali e le prescrizioni per la progettazione, esecuzione e collaudo delle opere di sostegno delle terre e delle opere di fondazione”;
- Circolare LL.PP. 24.09.1988 n° 30483 – L. 02.02.197 n° 64 art. 1 Istruzioni per l’applicazione del D.M. 11.03.1988;
- Decreto Ministeriale 16.01.1996 “Norme tecniche per le costruzioni in zone sismiche”;
- Eurocodice 7, “Progettazione geotecnica – Parte 1: Regole generali”, aprile 1997 (pr EN 1997-1);
- Eurocodice 8 – Indicazioni progettuali per la resistenza sismica delle strutture. Parte 5: Fondazioni, Strutture di contenimento ed Aspetti geotecnici (1998).
- O.P.C.M. 3274 del 20.03.2003 “Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica;
- Decreto Ministeriale 14.09.05 “Norme Tecniche per le Costruzioni”.
- Decreto Ministeriale 14.01.08 “Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni”.
- Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni di cui al DM 17/01/2018, pubblicate sulla G.U. del 20.02.2018.
- Circolare 21/01/2019 n 7 C.S.LL.PP. Istruzioni per l’applicazione dell’Aggiornamento delle Norme Tecniche per le costruzioni di cui al DM 17/01/2018

### **2.2 Documentazione di progetto**

- II134P EE-01 Elenco elaborati;
- II134P-RT-01 Relazione generale;



- II134P-RT-005 Indagini geologiche e geotecniche anno 2004;
- II134P-RT-006 Indagini geologiche e geotecniche anno 2008;
- II134P-RT-007 Indagini geologiche e geotecniche anno 2018;
- II134P-RT-004 Relazione geologica, geomorfologica, idrogeologica e sismica;
- II134P-CAR-006 Planimetria generale con ubicazione indagini;
- II134P-CAR-007 Carta geologica e geomorfologica;
- II134P-CAR-008 Ponte Final di Rero Profilo geologico e geotecnico.

### **3 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA**

#### **3.1 Premessa**

Il territorio della provincia di Ferrara è parte dell'ampio bacino subsidente padano in cui, a partire dal Cenozoico, si sono riversati i sedimenti provenienti dall'erosione della catena alpina e degli Appennini. Il suo assetto geologico e strutturale per essere pienamente compreso va visto considerando sia il substrato roccioso che la coltre alluvionale di copertura.

Il substrato roccioso costituisce il margine della struttura nord appenninica costituitasi a partire dalla fine del Mesozoico, con l'avvicinamento del margine Europeo a quello Insubro-appenninico, e con il formarsi delle prime catene montuose nel Cretaceo – Eocene tramite sovrascorrimenti pedeappenninici attivi dal tardo Miocene ad ora, espressione di un ambiente compressivo a ventaglio imbriciato il cui scollamento principale si trova alla base delle successioni mesozoiche.

La sedimentazione, avvenuta contemporaneamente agli eventi tettonici, è stata di ambiente marino nel Pleistocene medio e inferiore, influenzata da variazioni eustatiche legate al succedersi delle fasi glaciali e interglaciali per effetto delle quali, anche grazie ai significativi apporti di materiale durante le fasi interglaciali, la costa con il tempo si spostava progressivamente verso l'interno. In seguito alla regressione wurmiana dell'ultima glaciazione si ha l'apporto di una sedimentazione continentale di ambito fluviale governata prevalentemente dalle diverse divagazioni del Fiume Po .

L'area in studio ricade nella porzione orientale della Provincia di Ferrara ed è impostata su sedimenti olocenici di origine alluvionale legati all'azione di deposito dei rami secondari del Po. Il sottosuolo è costituito da alternanze di sabbie medio-fini, sabbie limose e limi sabbiosi, corrispondenti ai sedimenti di alveo e argine dei corsi d'acqua, ed argille limose o limi argillosi con anche locali livelli di torba depositatisi nelle aree interbacinali.

#### **3.2 Geologia**

Il presente lavoro segue l'impostazione delle precedenti fasi progettuali, il cui modello geologico ha preso avvio dalla consultazione del Foglio 76 Ferrara della Carta Geologica d'Italia in scala 1:100.000, basato su rilievi eseguiti negli anni 1952 – 1953, e dalle relative note illustrative scritte dal Prof. Bruno Accordi.

Uno stralcio della suddetta carta, con riferimento all'area compresa fra Finale di Rero e Migliarino, è riportato in figura 2.

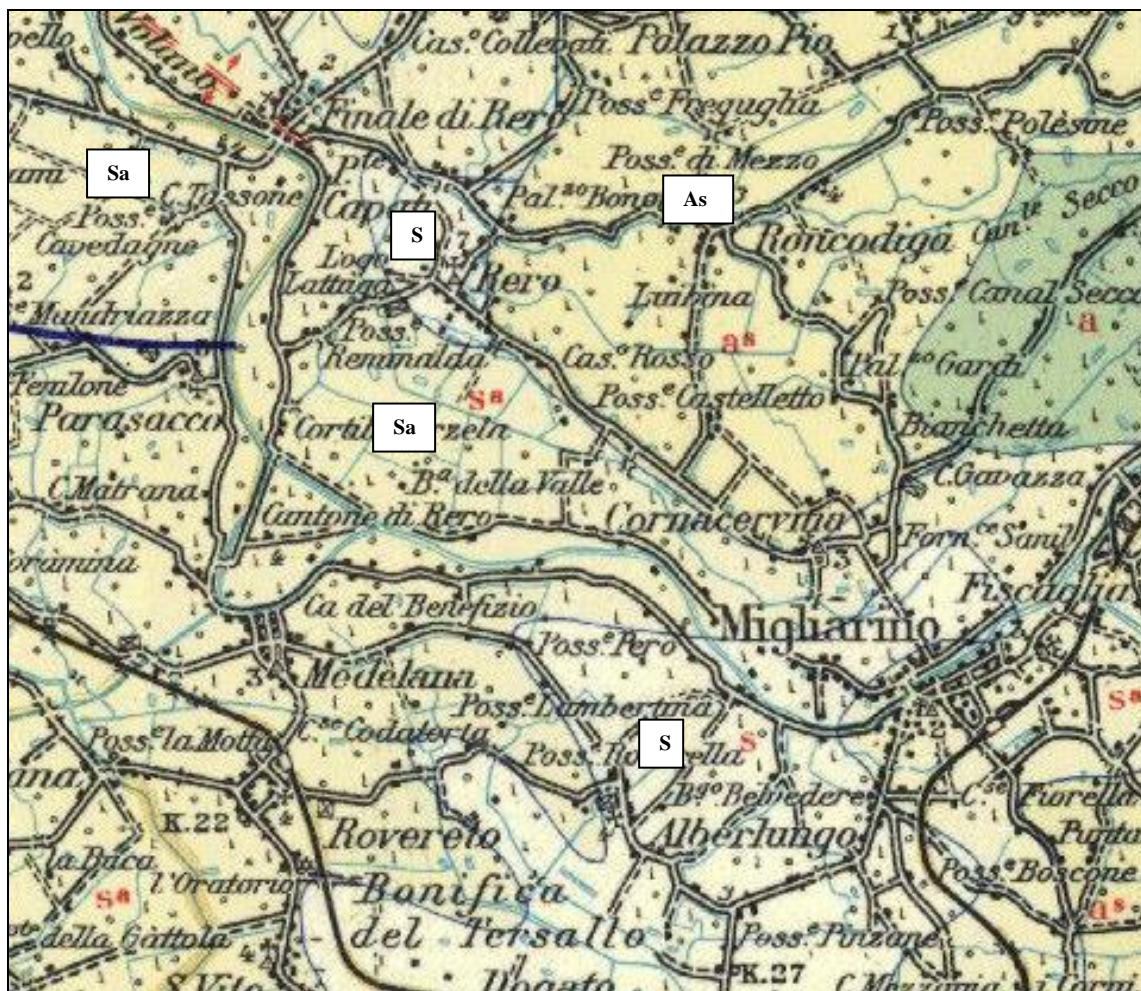


Figura 2. Stralcio del foglio Ferrara della Carta geologica d'Italia fra Finale di Rero e Migliarino

Il Foglio Ferrara della Carta Geologica comprende esclusivamente zone di pianura; stante la difficoltà e la scarsa utilità del rilievo di superficie per la sua redazione sono state effettuate analisi di laboratorio su numerosi campioni di terreno prelevati in sito tramite pozzetto. I terreni presenti sono riferibili ad alluvioni recenti ed attuali deposte in epoca storica ad opera dei Fiumi Po e Reno.

Alcune perforazioni finalizzate alla ricerca di idrocarburi hanno raggiunto profondità massime di 1.600 m. attraversando terreni in facies sedimentaria di età compresa sino al cretaceo superiore.

Dall'esame della carta geologica risulta evidente la relazione esistente fra la disposizione delle zone altimetriche e la distribuzione dei terreni sabbiosi e/o limo argillosi. In particolare gli allineamenti dei dossi, legati ad antichi rami del Po, hanno composizione prevalentemente sabbiosa, mentre le fasce depresse da essi circoscritte sono occupate da materiali prevalentemente fini.

Ad ampia scala con riferimento all'area compresa fra la conca di Valpigliaro e Migliarino il Foglio Ferrara della carta geologica distingue:

- depositi prevalentemente sabbiosi (indicati con la lettera "S") a Nord di Migliarino e più ad ovest sino Alberlungo – Rovereto - Ostellato ed ancora a Rero;
- terreni sabbioso argillosi (ovvero contenenti dal 25 al 40% di materiale fine, indicati con le lettere "Sa") lungo il tratto in progetto nell'intorno del Po di Volano;
- terreni argillo sabbiosi (contenenti dal 40 al 60% di fine, indicati con le lettere "as") ubicati a NW di Migliarino, esternamente al sedime di stretto interesse, in una zona depressa che corrisponde all'interfluvio fra due rami di paleovalveo.

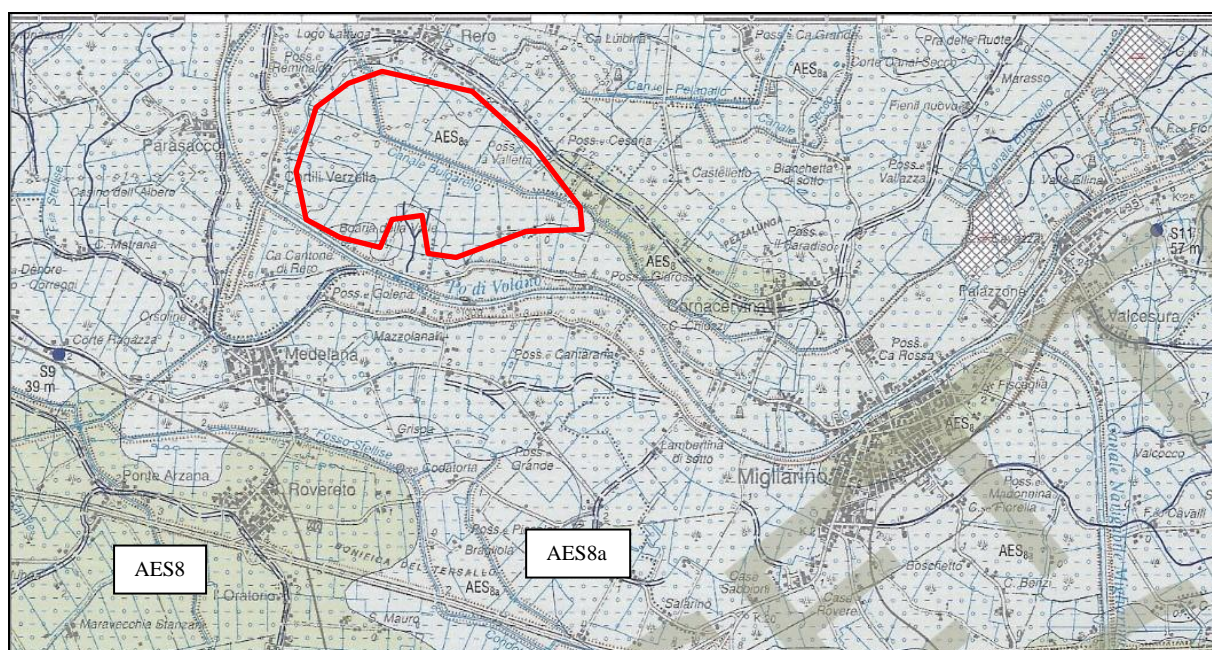
L'ISPRA ha da tempo in elaborazione la carta geologica d'Italia in scala 1:50.000 che rappresenta un vero e proprio approfondimento e aggiornamento della precedente cartografia al 100.000. Lo stato di avanzamento della produzione è molto variabile da regione a regione; in Emilia Romagna la cartografia geologica al 50.000 è ben sviluppata e copre buona parte del territorio, con l'eccezione di alcuni fogli posti lungo il confine settentrionale. Fra quelli mancanti figura purtroppo anche il Foglio 186 Copparo, che include la porzione occidentale dell'idrovia, da Valpigliaro a Finale di Rero, di specifica competenza di questo progetto. E' però disponibile e di recente emissione l'attiguo foglio 204 "Portomaggiore", di cui uno stralcio è riportato in figura 3, nel quale ricade il tratto fra Rero e Migliarino. I terreni sono riferiti prevalentemente all'unità AES<sub>8a</sub> e limitatamente, e senza interferenza diretta con il corso del Po di Volano, all'unità AES<sub>8</sub>, attribuiti rispettivamente:

- AES<sub>8</sub>, Subsistema di Ravenna: alternanze di sabbie e limi associate ad argilla di piana deltizia dei canali distributori del Po ed aree interposte. Alluvionale. Pleistocene superiore – Olocene (10.500 anni BP – attuale).
- AES<sub>8a</sub>, Unità di Modena: costituisce la quasi totalità dei terreni rappresentati nel foglio 204 ed è composta da alternanze di sabbie, limi ed argille di ambiente prevalentemente deltizio e in subordine alluvionale. Si assottiglia nel settore settentrionale ed orientale (area in studio) fino a far affiorare la più antica AES<sub>8</sub> in corrispondenza di dossi di canale distributore abbandonati. I sedimenti più grossolani sono stati depositi da canali distributori del Po ormai estinti (Po di Volano nel settore in studio). I sedimenti più fini si concentrano nelle aree di intercanale (Età post romana IV-VI sec d.C.).

La granulometria prevalente è un'alternanza di sabbie da medie a finissime e limi di canale distributore, passanti lateralmente ad alternanze di limi ed argille che formano corpi nastriformi o lobati. Nell'area d'interfluvio fra i due paleoalvei (bordata in rosso in figura) prevalgono argille e limi di piana inondabile con rare intercalazioni di limi sabbiosi che formano corpi a geometria allungata per spessori di pochi metri.

Un maggiore dettaglio si evince dalla carta geologica e geomorfologica in scala 1.10.000 allegata al progetto, ereditata dalle precedenti fasi progettuali e ricavata dalla cartografia tecnica della Provincia di Ferrara. Da questa carta, la cui validità è da ritenersi indicativa per effetto della natura dei depositi, della modalità di sedimentazione e di una sempre possibile e spiccata variabilità laterale, si evince una più diffusa presenza di depositi sabbiosi che insistono lungo buona parte dell'idrovia. Fa eccezione una superficie interessata da sabbie limose ubicata in corrispondenza di Final Di Rero all'interno dell'ampia curva qui descritta dal Po di Volano, nonché un'ampia plaga di depositi argilloso sabbiosi posti, in coerenza con buona parte della documentazione bibliografica, in corrispondenza dell'interfluvio fra due paleoalvei.





**Figura 3** Stralcio carta geologica ISPRA 1:50.000 fra Rero e Migliarino. In colore rosso il perimetro dell'interfluvio con terreni argillo limosi di piana inondabile

Nella soprarichiamata cartografia sono evidenziati i paleoalvei, di cui uno in corrispondenza del tracciato attuale del Po di Volano, uno passante per Rero (chiaramente individuati entrambi anche nella successiva figura 20) ed un terzo ancora più a nord, di ubicazione incerta, posto a margine dell'abitato di Roncodigà.

### 3.1 Geomorfologia

Per quanto attiene l'assetto geomorfologico in figura 4 si riporta uno stralcio della Carta Geomorfologica del PIAE della Provincia di Ferrara. Appare evidente la struttura di alto morfologico, o di dosso, legata all'andamento del Po di Volano sottolineata dalla carta geologica che in quest'ambito indica una prevalenza di depositi sabbiosi o sabbioso limosi. E' evidente il paleoalveo di Rero. Tra i due si trova la depressione chiusa, a forma di catino leggermente allungato in direzione E-W, dove sono prevalenti i depositi argilloso sabbiosi.



**Figura 4 Carta geomorfologica PIAE provincia di Ferrara (stralcio)**

Nella successiva figura 5 è riprodotto uno stralcio della Carta Altimetrica della Provincia di Ferrara. In bianco le zone morfologicamente depresse poste al di sotto del livello del mare, mentre in verde chiaro gli alti morfologici; in carta si vede chiaramente un paleoalveo del Po di Volano passante per Rero e la posizione di “alto morfologico” relativo dell’area d’interesse progettuale.



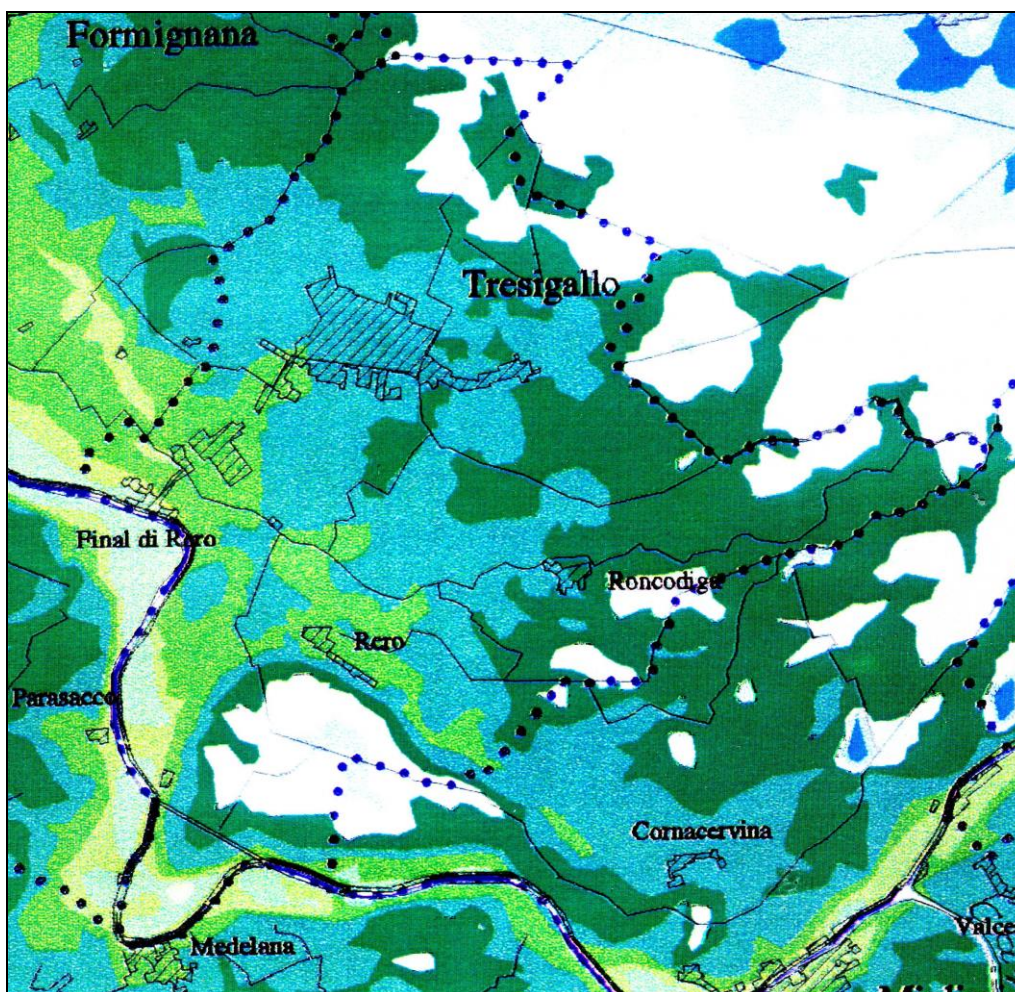


Figura 5 Carta altimetrica della Provincia di Ferrara (stralcio)

Risulta chiaro come le quote più elevate delimitino un cordone ad andamento subparallelo al corso del Po di Volano, di evidente pertinenza fluviale e con un andamento generale degradante in direzione Nord-Est, cioè verso le ex valli di Ambrogio-Jolanda. Tale andamento non risulta uniforme e regolare, bensì interessato da anomalie locali che evidenziano aree depresse ben circoscritte. La più importante è quella compresa tra l'abitato di Rero ed il Po di Volano mentre altre due, di minore dimensione ed entità, sono localizzate in località Roncodigè.

In sintesi il territorio in esame è assimilabile ad un piano inclinato con andamento che rispecchia lo spartiacque del Po di Volano ed immersione prevalente verso nord-est. Tale piano è variamente complicato da ondulazioni che si traducono in depres-



sioni, prevalentemente chiuse, a fondo subpianeggiante, che raggiungono quote al di sotto del livello del mare.

Nel corso dei sopralluoghi condotti si è riscontrata la presenza di alcuni piccoli e superficiali smottamenti lungo le scarpate del Po di Volano. Essi derivano dalla natura dei materiali costituenti, caratterizzati da bassi o nulli valori di coesione (specie per la componente sabbiosa) dall'escursione del livello idrico in alveo, e conseguentemente del regime delle pressioni neutre nel terreno, da possibili fenomeni di erosione al piede dovuti alla corrente fluviale, dall'assenza di una vegetazione erbacea o arborea perenne che protegga e trattenga il terreno. Tale riscontro ha consigliato l'adozione di diffuse protezioni di sponda lungo i tratti idroviari oggetto d'intervento mediante massi di peso e pezzatura idonea. In corrispondenza di una banca posta sul livello idrico si è prevista altresì la messa a dimora di un canneto avente la funzione di smorzare il moto ondoso.



**Foto 1 Piccoli smottamenti lungo il Po di Volano**

Nel complesso l'area studiata si caratterizza per un'estrema variabilità litologica estesa sia in senso sia verticale che laterale, a testimonianza della complessa storia evolutiva della regione (sedimentazione fluviale, alluvionamenti, divagazioni e rotte fluviali, opere di bonifica e regimazione idraulica) che ha portato il territorio ad assumere la

configurazione attuale. Negli orizzonti superficiali i terreni sono prevalentemente sabbiosi o sabbioso limosi lungo l'idrovia, e argillosi o argilloso limosi allontanandosi da essa.

## 4 IDROGEOLOGIA

L'esecuzione delle opere di bonifica, ed in particolare la diffusa rete di canali di scolo con a capo importanti impianti idrovori, impongono un regime perennemente disturbato alla falda freatica. In altri termini il sistema acquifero più superficiale risente delle precipitazioni dirette, del condizionamento della rete idrica consortile e dei prelievi effettuati mediante pozzi.

L'irrigazione dei terreni agricoli avviene a pioggia o mediante innalzamento dei livelli idrici nei canali. I canali di scolo, che allontanano le acque convogliandole agli impianti idrovori, hanno quindi funzione promiscua.

In tale contesto il regime della falda freatica è perennemente disturbato in quanto soggetto, oltre che agli apporti meteorici, ai contributi alterni delle esigenze della rete consortile.

Dal punto di vista della geometria dell'acquifero la morfologia del territorio e la forte presenza di canali consortili fa sì che la falda freatica sia contenuta in una serie di microbacini regimati dai canali stessi.

Alvei e paleoalvei, per effetto delle caratteristiche granulometriche ivi presenti, alimentano direttamente la falda (zona di alimentazione o di spartiacque sotterraneo, a flusso prevalentemente verticale) la quale viene drenata, per quasi tutto il corso dell'anno, dai canali consortili o dalle terre basse confinanti (settori di drenaggio a flusso prevalentemente orizzontale).

In linea generale il territorio può essere considerato un bacino di raccolta suddiviso, sia dalle condizioni morfologiche che dalla rete consortile, in sottobacini all'interno dei quali si raccoglie acqua meteorica (600-700 mm/anno) acqua di irrigazione (200-300 mm/anno) ed acqua dei canali promiscui. Questi ultimi, per la maggior parte dell'anno, servono comunque a mantenere la falda ad una quota attorno ai 2.00-2.50 m dal p.c. mediante scolo e sollevamento ad opera degli impianti idrovori.

In sintesi l'andamento generale dell'acquifero freatico nel territorio in esame presenta le seguenti caratteristiche:

- a. **alimentazione:** oltre agli apporti diretti delle precipitazioni la falda riceve contributi da alvei, paleoalvei e canali consortili con funzione promiscua ;
- b. **gradiente :** notevolmente perturbato per effetto del particolare regime della rete idrica di superficie e dei prelievi effettuati tramite pozzi;
- c. **polarità :** la direzione di flusso tende a variare ricalcando le fluttuazioni del regime idrico di superficie;
- d. **livelli :** sono fortemente condizionati dai corpi idrici di superficie;

La fascia di territorio in prossimità del Po di Volano, con particolare riferimento al territorio in studio, rappresenta una zona di alimentazione in cui la falda tende ad assumere una morfologia di “alto”, drenata poi dai canali consortili limitrofi.

In altri termini il Po di Volano, dal punto di vista idrogeologico, rappresenta un settore di spartiacque, costituendo un serbatoio prezioso di alimentazione della falda freatica.

La vulnerabilità idrogeologica, considerato che la zona viene considerata punto d'ingresso del sistema idrogeologico, ovvero area di ricarica con flusso prevalentemente verticale, è da considerarsi elevata con risposte quasi istantanee.

La fragilità del sistema è elevata.

## 5 INDAGINI GEOGNOSTICHE

Le precedenti fasi progettuali dell'intero tratto idroviario fra la conca di Valpagliaro e Migliarino sono state sviluppate sulla base di una specifica campagna d'indagini geognostiche condotta dalla ditta Elletipi in due fasi temporali distinte, rispettivamente nel 2004 e nel 2008.

La prima fase articolata fra ottobre - novembre 2004 e costituita da:

- n° 5 sondaggi a rotazione a carotaggio continuo spinti sino alla profondità di m 35 da p.c. ed identificati con le sigle SP1; SP2; SP3; SP4; SP5/Pz;
- n° 3 sondaggi a rotazione a carotaggio continuo spinti sino alla profondità di m 15 da p.c. ed identificati con le sigle SC1/Pz, SC2; SC3/Pz;
- n° 3 piezometri a tubo aperto messi in opera in corrispondenza dei sondaggi SP5, SC1 ed SC3;
- n° 4 prove SPT e n° 5 prove scissometriche eseguite nel corso dei sondaggi;
- prove di laboratorio sui campioni prelevati nel corso delle perforazioni;
- n° 6 prove penetrometriche statiche con piezocono (CPTU) spinte a profondità comprese fra 25 e 30 m. da p.c.

La fase successiva si è svolta nel novembre 2008, ha riguardato aree e/o opere non previste al tempo della precedente campagna geognostica ed è consistita in:

- n° 1 sondaggio da 35 m attrezzato con piezometro a tubo aperto (SP1/pz-08) e n° 1 prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU1-08) in corrispondenza di un previsto ponte di attraversamento dell'idrovia in località Cà Dondi, poco ad Ovest di Finale di Rero;
- n° 1 sondaggio da 35 m attrezzato con piezometro a tubo aperto (SP2/pz-08) e n° 1 prova penetrometrica statica con piezocono (CPTU2-08) in corrispondenza della passerella pedonale di Migliarino;
- n° 3 prove penetrometriche dinamiche (DPSH1-2-3) sulla sponda sinistra del Po di Volano a Migliarino, nel tratto compreso fra la passerella pedonale ed il Consorzio Agrario, ove sono previsti alcuni marginamenti su palancole;
- prove SPT in foro e prove di laboratorio su campioni rimaneggiati ed indisturbati prelevati nel corso delle perforazioni;

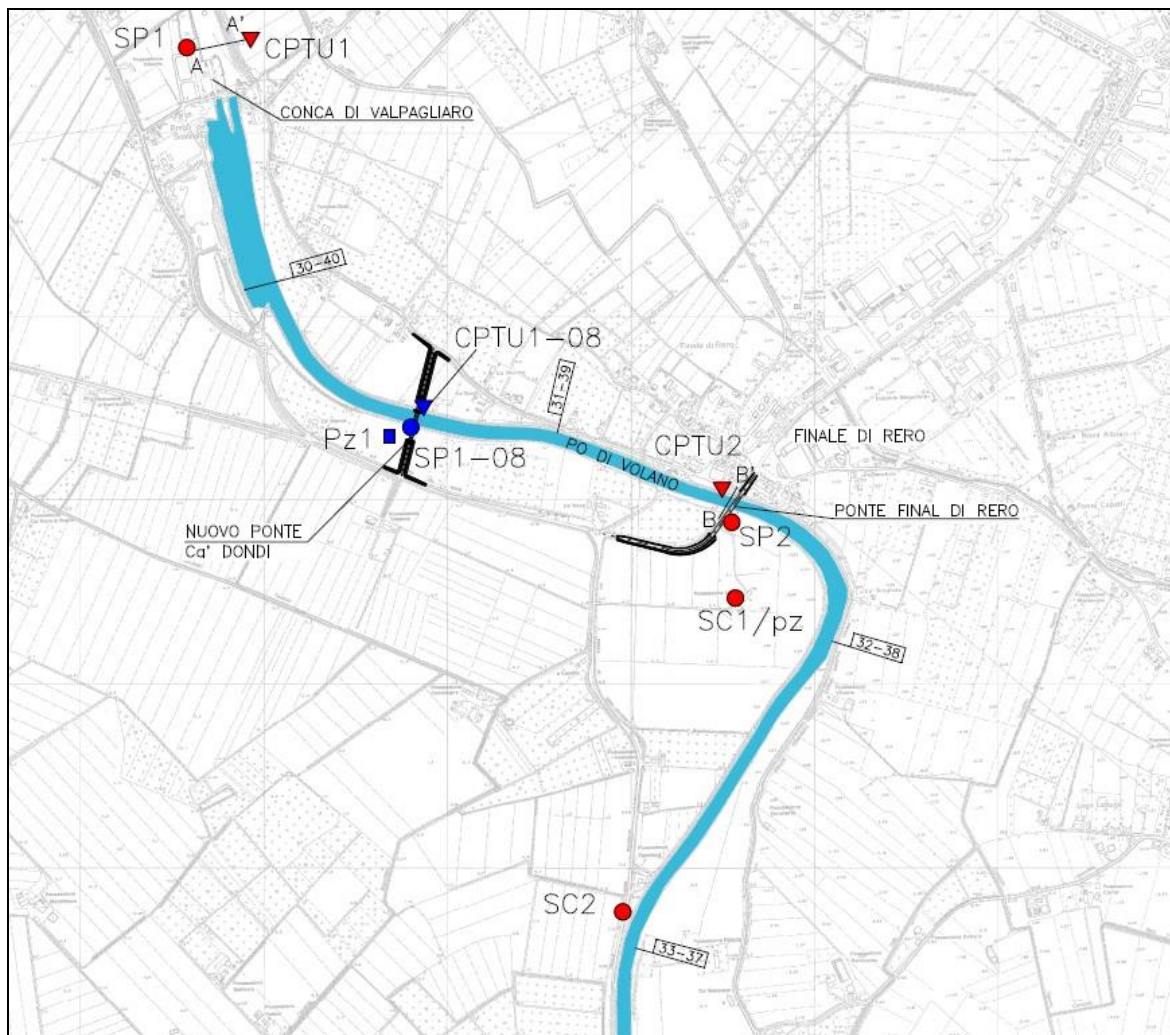
- n° 2 pozzetti esplorativi con prove di carico con piastra in corrispondenza dei rilevati di approccio al ponte di Cà Dondi e Migliarino.

Nel 2014 in corrispondenza del ponte di Final di Rero la ditta Coop.Costruzioni ha realizzato una dettagliata integrazione geognostica attraverso:

- n° 2 sondaggi a carotaggio continuo (S1/14 ed S2/14) profondi 50 m e 42 m ubicati in corrispondenza delle spalle del ponte di Final di Rero, con prove SPT e prelievo di campioni indisturbati;
- N.4 Prove Penetrometriche Statiche con punta elettrica (CPTE) spinte a profondità comprese tra 30.1m e 43.6m; di cui due (P1/14 e P2/14) in corrispondenza rispettivamente della pila centrale e della spalla B del nuovo ponte, e le restanti (P3/14 e P4/14) in corrispondenza degli appoggi del ponte provvisorio/passarella pedonale.
- N.1 prova sismica di tipo MASW per la determinazione della velocità delle onde sismiche e conseguentemente del valore di  $V_{s,30}$ ; tale indagine si è resa necessaria per determinare la categoria di sottosuolo in base alle recenti NTC.

Come rappresentato in figura 6 e 7 nell'area di stretto interesse progettuale ricadono:

- i sondaggi SP1 – SP2 – SC1 – SC2 oltre alle penetrometriche CPTU1-CPTU2 della campagna del 2004;
- il sondaggio SP1-08, il pozzetto Pz1 e la penetrometrica CPTU1-08 della campagna del 2008;
- tutte le indagini del 2014.



**Figura 6 Stralcio planimetrico ubicazione indagini 2004 e 2008**





**Figura 7 Stralcio planimetrico indagini del 2014**

L'intera documentazione relativa alle indagini geognostiche, debitamente suddivisa nelle diverse fasi temporali, è allegata in specifici elaborati relativi alle indagini geologiche e geotecniche anno 2004 – indagini geologiche e geotecniche anno 2008 – indagini geologiche e geotecniche anno 2014.

### **Piezometri.**

All'interno dei sondaggi SC1, SC3, SP5, SP1-08 – SP2-08 (identificati in planimetria con il suffisso “/pz”) sono stati installati piezometri a tubo aperto costituiti da un tubo in PVC del diametro di 1.5”/2” rivestito di geotessuto. Il tratto cementato è di norma non inferiore a 1 m a partire da p.c. Il piezometro è protetto da un chiusino metallico dotato di lucchetto. Successivamente all'installazione e ad intervalli regolari di alcuni giorni è stato monitorato il livello della falda rispetto al piano campagna.

I risultati di detti rilievi sono riportati in tabella 1 (valori espressi in m. da p.c.).

In tutte le verticali indagate indipendentemente dalla presenza di piezometro o meno si è comunque rilevata la profondità di falda in corso d'opera; le misurazioni effettuate nei fori privi di piezometro sono riassunte in tabella 2. Nel complesso i dati conferma-



Data: Settembre 2021	Rev.: 1	Doc.: II134P-RT-008_1
----------------------	---------	-----------------------

no modeste soggiacenze da piano campagna con valori medi attorno a 2 - 4 m in funzione della locale quota del piano campagna.

DATA	SC1/Pz	SC3/Pz	SP5/Pz	SP1-08/Pz	SP2-08//Pz
11/10/04	4,80	-	-	-	-
13/10/04	-	4,20	-	-	-
15/10/04	-	-	1,06		
22/10/04	3,94	2,50	1,99		
29/10/04	3,95	2,22	2,06		
05/11/04	4,00	2,22	1,95		
12/11/04	3,99	2,25	1,93		
19/11/04	4,04	2,19	1,92		
24/11/04	4,08	2,18	1,92		
19/09/08				4,30	2,30
26/09/08				4,26	2,67
10/10/08				4,09	2,80
17/10/08				4,13	2,82
31/10/08				4,12	2,83

**Tabella 1. Rilievi di falda nei piezometri**

Verticale geognostica	Profondità falda	Data	Verticale geognostica	Profondità falda	Data
SC2	3,2	12.10.04	CPTU4	3,6	26.10.04
SP1	1,8	8.10.04	CPTU5	1,5	27.10.07
SP2	4,9	11.10.04	CPTU6	2,4	27.10.04
SP3	2,1	13.10.04	CPTU1-08	3,5	16.10.08
SP4	1,35	15.10.04	CPTU2-08	1,5	16.10.08
CPTU1	1,6	25.10.04	S1/14	1,6	23.7.14
CPTU3	4,2	26.10.04	S2/14	2,3	24.7.14

**Tabella 2. Profondità falda rilevata in corso d'opera**

**Prove eseguite nel corso dei sondaggi: SPT e Vane Test:**

Le prove SPT (standard penetration test) sono state eseguite secondo le modalità previste nelle "Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geo-

tecniche” AGI 1977, utilizzando un campionatore a punta aperta con superfici lisce ed apribile longitudinalmente. Con la prova viene prelevato un campioncino rimaneggiato (qualità Q2-Q3) successivamente sottoposto ad analisi di classificazione fisica in laboratorio.

Il dispositivo di battitura è composto dall’argano di sollevamento della sonda e da una massa battente del peso di 63.5 kg, con un’altezza di caduta di 760 mm. Le aste di manovra, alla cui estremità inferiore è fissato un campionatore (Raymond) di dimensioni standardizzate, hanno un diametro di 50 mm ed un peso per metro lineare di circa 7,2 kg.

Il numero di colpi (N) necessario per una penetrazione del campionatore pari a 300 mm (dopo una infissione preparatoria di 150 mm di cui si prende nota senza però considerarla nei calcoli) è il dato assunto come indice della resistenza alla penetrazione ( $N_{SPT}$ ).

Di seguito sono riportati, in tabella 3 e 4 ubicazione, profondità e numero colpi delle SPT.

Sondaggio	Profondità	Nspt
N°	m	
S1-08	1,15	16
	6,15	8
	12,15	25
	14,75	29
	30,15	39
S2-08	1,15	7
	7,65	14
	12,15	18
	15,15	21
	30,15	32
S5	6,15	20
	9,15	41
	12,15	54
	15,15	59

**Tabella 3 SPT indagini 2004 e 2008**

Sondaggio	Profondità (m)	N <sub>SPT</sub>
S1/14	6.50-6.95	14
S1/14	26.00-26.45	28
S1/14	32.50-32.95	33
S2/14	7.50-7.95	22
S2/14	28.00-28.45	22
S2/14	33.00-33.45	27
S2/14	37.50-37.95	33

**Tabella 4 SPT indagini 2014**

Nei terreni fini ed in alcuni fori di sondaggio sono state eseguite prove scissiometriche VT (vane test) i cui risultati sono riepilogati in tabella.

SONDAGGIO	PROVA	PROFONDITA' (m)	Cu(picco) – Cu(res)
SP3	VT 1	5.00	93.02 – 49.54 kN/m <sup>2</sup>
SP3	VT 2	8.00	195.69 – 57.66 kN/m <sup>2</sup>
SP4	VT 1	5.00	76.88 – 36.69 kN/m <sup>2</sup>
SP4	VT 2	11.00	294.53 – 103.48 kN/m <sup>2</sup>
SP5/Pz	VT 1	3.00	96.10 – 26.21 kN/m <sup>2</sup>
SP1-08/Pz	VT 1	4.00	123.36 – 69.77 kN/m <sup>2</sup>

**Tabella 5. Vane Test eseguiti nel corso dei sondaggi 2004 e 2008**

**Prove di laboratorio su campioni:**

I campioni prelevati nel corso dei sondaggi sono stati analizzati presso laboratori autorizzati ai sensi della circolare 16 dicembre 1999 n. 349/STC ed al DPR n 246 del 21 aprile 1993 art. 8 comma 6. Su detti campioni si sono eseguite le seguenti prove di classificazione e caratterizzazione geotecnica:

- contenuto naturale d'acqua;
- massa specifica;
- peso di volume naturale;
- peso di volume secco;
- determinazione del contenuto di sostanza organica;

- limiti di Atterberg;
- analisi granulometrica con vagliatura meccanica;
- analisi granulometrica per sedimentazione;
- prova di compressione con espansione laterale libera;
- prova edometrica ad incrementi di carico controllati;
- prova di taglio diretto consolidata e drenata;
- prova triassiale consolidata e non drenata;
- prova triassiale consolidata e drenata.

L'elenco completo dei campioni indisturbati e rimaneggiati prelevati in corrispondenza dei sondaggi eseguiti nelle diverse fasi è riportato rispettivamente in tabella 6 e 7.

SONDAGGIO	CAMPIONE INDISTURBATO	PROFONDITA'	SONDAGGIO	CAMPIONE INDISTURBATO	PROFONDITA'	SONDAGGIO	CAMPIONE INDISTURBATO	PROFONDITA'
SC2	Sh 1	3,0-3,5	SP3	Sh 7	25,0-25,4	SP1-08	CI 4	17,5-18,0
SC2	Sh 2	6,0-6,6	SP4	Sh 2	9,0-9,6	SP1-08	CI 5	20,0-20,5
SC2	Sh 3	9,0-9,5	SP4	Sh 3	12,0-12,6	SP1-08	CI 6	24,0-24,5
SP1	Sh 5	18,0-18,6	SP4	Sh 4	15,0-15,6	SP2-08	CI 1	5,0-5,5
SP1	Sh 6	21,0-21,4	SP4	Sh 5	18,0-18,3	SP2-08	CI 2	13,5-14,0
SP2	Sh 5	21,0-21,5	SP4	Sh 8	26,0-26,5	SP2-08	CI 3	16,5-17,0
SP2	Sh 6	24,0-24,6	SP5/Pz	Sh 1	3,0-3,6	SP2-08	CI 4	20,0-20,5
SP2	Sh 7	27,0-27,6	SP5/Pz	Sh 8	30,0-30,6	SP2-08	CI 5	24,0-24,5
SP3	Sh 1	3,0-3,5	SP1-08	CI 1	5,0-5,50	SP2-08	CI 6	27,0-27,5
SP3	Sh 2	6,0-6,6	SP1-08	CI 2	7,5-8,0			
SP3	Sh 3	9,0-9,6	SP1-08	CI 3	9,0-9,5			
SONDAGGIO	CAMPIONE RIMANEGGIATO	PROFONDITA'	SONDAGGIO	CAMPIONE RIMANEGGIATO	PROFONDITA'	SONDAGGIO	CAMPIONE RIMANEGGIATO	PROFONDITA'
SC1/Pz	Ri 1	1,5-1,8	SP2	Ri 9	33,0-33,3	SP1-08	RI 2	3,0-3,45
SC1/Pz	Ri 2	5,5-5,8	SP3	Ri 4	11,0-11,3	SP1-08	RI 3	6,0-6,45
SC1/Pz	Ri 3	12,0-12,3	SP3	Ri 5	17,2-17,5	SP1-08	RI 4	10,5-10,8
SC2	Ri 4	12,0-12,3	SP3	Ri 6	24,1-24,4	SP1-08	RI 5	12,0-12,45
SC3/Pz	Ri 1	1,0-1,3	SP3	Ri 8	27,5-27,8	SP1-08	RI 6	14,6-15,05
SC3/Pz	Ri 2	4,8-5,1	SP3	Ri 9	30,0-30,3	SP1-08	RI 7	16,0-16,45
SC3/Pz	Ri 3	11,0-11,3	SP4	Ri 1	4,4-4,7	SP1-08	RI 8	27,0-27,3
SP1	Ri 1	3,0-3,3	SP4	Ri 6	21,1-21,4	SP1-08	RI 9	30,0-30,45
SP1	Ri 2	6,0-6,3	SP4	Ri 7	23,6-23,9	SP1-08	RI 10	33,0-33,45
SP1	Ri 3	9,0-9,3	SP4	Ri 9	29,5-29,8	SP2-08	RI 1	1,5-1,8
SP1	Ri 4	11,2-11,5	SP4	Ri 10	34,2-34,5	SP2-08	RI 2	3,0-3,45
SP1	Ri 7	24,5-25,0	SP5/Pz	Ri 2	6,0-6,45	SP2-08	RI 3	7,5-7,95
SP1	Ri 8	28,0-28,5	SP5/Pz	Ri 3	9,0-9,45	SP2-08	RI 4	10,0-10,3
SP1	Ri 9	32,0-32,3	SP5/Pz	Ri 4	12,0-12,45	SP2-08	RI 5	12,0-12,45
SP2	Ri 1	2,7-3,0	SP5/Pz	Ri 5	15,0-15,45	SP2-08	RI 6	15,0-15,45
SP2	Ri 2	9,7-10,0	SP5/Pz	Ri 6	21,5-21,8	SP2-08	RI 7	18,0-18,3
SP2	Ri 3	14,7-15,0	SP5/Pz	Ri 7	27,5-27,8	SP2-08	RI 8	22,0-22,3
SP2	Ri 4	16,0-16,3	SP5/Pz	Ri 9	34,5-34,8	SP2-08	RI 9	30,0-30,45
SP2	Ri 8	29,2-29,5	SP1-08	RI 1	1,5-1,8	SP2-08	RI 10	33,0-33,3

**Tabella 6. Elenco campioni indisturbati (Sh) e rimaneggiati (Ri) campagne 2004 e 2008**

Sondaggio	n. campione	Prof (m)
S1/14	SH1	5.00-5.50
S1/14	SH2	8.50-9.00
S1/14	SH3	23.00-23.50
S1/14	SH4	30.00-30.50
S1/14	SH5	35.00-35.50
S1/14	SH6	38.00-38.50
S1/14	SH7	39.00-39.50
S1/14	SH8	42.00-42.50
S1/14	SH9	47.00-47.50
S2/14	SH1	5.00-5.50
S2/14	SH2	10.20-10.70
S2/14	SH3	25.50-26.00
S2/14	SH4	30.00-30.50
S2/14	SH5	35.00-35.50
S2/14	SH6	40.50-41.00

**Tabella 7 Campioni indisturbati campagna del 2014**

**Prove penetrometriche statiche:**

Ad integrazione dei sondaggi nell'ottobre 2004 si sono realizzate n° 6 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono denominate CPTU 1, CPTU 2, CPTU 3, CPTU 4, CPTU 5 e CPTU 6 di profondità compresa fra 25 e 30 m da p.c. Ulteriori n° 2 prove denominate CPTU1-08 e CPTU2-08, profonde 35 m da p.c, sono state eseguite nell'ottobre 2008.

Nel corso della campagna del 2014 sono state eseguite n 4 prove penetrometriche con punta elettrica tipo CPTU spinte fino a 30-43 m da p.c.

I dati rilevati dal penetrometro, registrati su supporto magnetico, sono i seguenti:

- $z$  (m) = profondità dal piano campagna;
- $q_c$  (kg/cm<sup>2</sup>) = resistenza alla punta (conica);
- $f_s$  (kg/cm<sup>2</sup>) = resistenza laterale (manicotto);
- $U$  (kg/cm<sup>2</sup>) = pressione neutra (setto poroso) e sua variazione alla penetrazione della punta nel terreno (ove acquisita);
- $i$  (°) = inclinazione della batteria di aste rispetto alla verticale.

Sulla base degli elementi sopra elencati possono essere determinate anche le seguenti coppie di valori:

- $f_s/q_c$  (%) = rapporto attrito laterale / resistenza alla punta;
- $\Delta U/q_c$  = variazione della pressione dei pori in funzione della resistenza alla punta.

Possono esservi errori nell'acquisizione del valore "qc" legati alla struttura fisica dello strumento. Per ragioni costruttive si è infatti obbligati a porre una guarnizione di tenuta "o-ring" tra la punta del penetrometro ed il fusto. Nelle prove sotto falda questo implica il passaggio dell'acqua in questa zona determinando un errore nella misura di qc. Si prende pertanto in considerazione la seguente relazione:

- $q_t = q_c (1-\alpha)u$
- $\alpha$  = rapporto delle aree del penetrometro. Nel caso in esame vale 0,066.

Per l'interpretazione ed elaborazione delle prove CPTU vengono utilizzati i seguenti valori:

$$q_c - q_t - U - f_s.$$

Le diagrafie delle prove penetrometriche statiche sono riportate negli elaborati relativi alle indagini geognostiche.

Le prove penetrometriche eseguite dagli scriventi nel 2004 e 2008, per le quali si dispone dei file editabili con i risultati acquisiti punto per punto dei valori di pressione alla punta, attrito laterale e pressione neutra, sono state elaborate per estrapolare i principali parametri geotecnici attribuiti ai terreni; tali elaborazioni sono allegate in calce al presente documento (Tavole 1 – 8).

### **Pozzetti esplorativi:**

Al fine di meglio comprendere e valutare l'interazione fra i rilevati di approccio ai ponti ed i terreni di sedime nel mese di ottobre 2008 sono stati eseguiti n° 2 pozzetti esplorativi. Rispettivamente il pozzetto P1 in località Cà Dondi, - Finale di Rero – sponda destra del Po di Volano, ed il pozzetto P2 a Migliarino - ponte in prossimità del Consorzio Agrario - sponda sinistra.

Data: Settembre 2021	Rev.: 1	Doc.: II134P-RT-008_1
----------------------	---------	-----------------------

I pozzetti sono stati eseguiti mediante una terna gommata ed hanno raggiunto la profondità di 1,5 m da p.c.

In corrispondenza di ogni pozzetto è stata eseguita una prova di carico con piastra organizzata su due cicli di carico (carico – scarico – carico) alla profondità di 0,4 m e 1,20/1,30 m da p.c, oltre ad una prova di densità in situ a 0,90/1,00 m da p.c.

## 6 MODELLO STRATIGRAFICO

L'esame dei sondaggi e delle diagrafie delle prove penetrometriche ha permesso di ricostruire un modello stratigrafico che nelle aree di stretto interesse progettuale ed a livello generale vede la presenza delle seguenti unità:

- Unità I Limoso sabbiosa, e/o materiale di riporto da p.c. a circa 2-3 m da p.c. Granulometricamente è composta da sabbia 30-35%, limo 60-65%, argilla < 10%. Densità relativa 40%, contenuto naturale d'acqua <15%.
- Unità II Sabbia fine e sabbia limosa da 2-3 m a 8-12 m da p.c. Granulometricamente è composta da sabbia 50-60%, limo 30-45%, argilla <10%. Densità relativa 40%, contenuto naturale d'acqua 10-25%;
- Unità III limo argilloso e argilla limosa con possibili intercalazioni sabbiose da 8-12 m a 22-27 m da p.c. Granulometricamente è composta da sabbia <10%, limo 60-80%, argilla 20-40%. Contenuto naturale d'acqua 20-40%, limite di liquidità 40-60%, limite di plasticità 20-30% e indice di plasticità 11-36%.
- Unità IV sabbia fine con possibili intercalazioni limose da 22-27 m fino alle massime profondità indagate (50 m da p.c.). Granulometricamente è composta da sabbia 50-80%, limo 20-30%, argilla <15%. Densità relativa 50% e contenuto naturale d'acqua 12-18%.

Fra i sondaggi e le prove penetrometriche continue sono quest'ultime che meglio permettono di apprezzare la litologia e la variabilità stratigrafica che caratterizza i terreni in studio.

Di seguito si descrivono n° 3 sezioni poste lungo il tratto di progetto la cui ubicazione è riportata nella planimetria indagini.

### **Sezione di riferimento A – A' (figura 8)**

La sezione ricade nel margine occidentale dell'area d'interesse progettuale, in località Borgo del Sostegno a NW di Finale di Rero. Rappresenta l'interpolazione dei dati ricavati dal sondaggio SP1 e dalla prova penetrometrica CPTU1.



Dal punto di vista stratigrafico si riscontra l'unità I limoso sabbiosa sino a circa 2m. Segue l'unità II sabbiosa o sabbioso limosa che in sinistra idrografica (CPTU1-04) palesa intercalazioni limoso argillose piuttosto evidenti. A partire da circa 10 m si riscontra l'unità III limoso argillosa, con locali orizzonti torbosi di spessore decimetrico sino alla profondità di 22-23 m. da p.c. Segue infine, sino alle massime profondità indagate (35 m), l'unità IV sabbiosa.

### **Sezione di riferimento C – C' (figura 9)**

La sezione è ubicata in località Cà Dondi, fra la conca di Valpagliaro e Final di Rero, dove nelle precedenti fasi progettuali era prevista la realizzazione di un nuovo ponte. Attraverso l'interpolazione e interpretazione del sondaggio SP1/pz-08 e della prova penetrometrica CPTU1-08 si palesa l'unità I limoso sabbiosa di spessore compreso fra 2 e 3,5 m da p.c. Segue l'unità II sabbioso limosa sino alla profondità di circa 15,7 m in sponda sinistra, e 12,0 m circa in sponda destra, con una intercalazione limoso argillosa attorno alla profondità di 10 m. Al di sotto l'unità III limoso argillosa con intercalazioni di sabbie fini sino a 27 – 28 m da p.c., ed infine l'unità IV sabbiosa sino alle massime profondità indagate (35 m da p.c.).

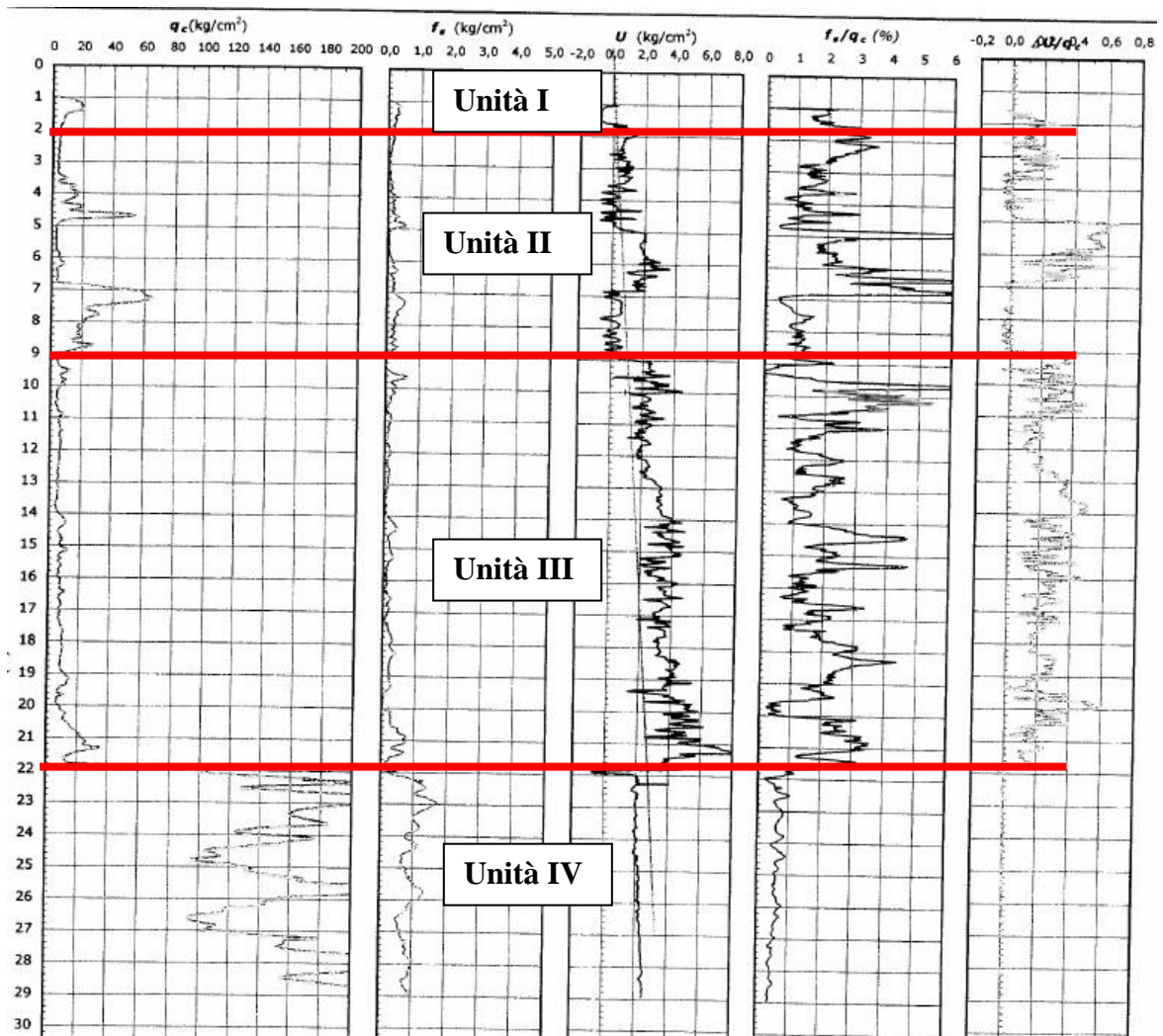


Figura 8 CPTU1-04 (Sezione A-A)

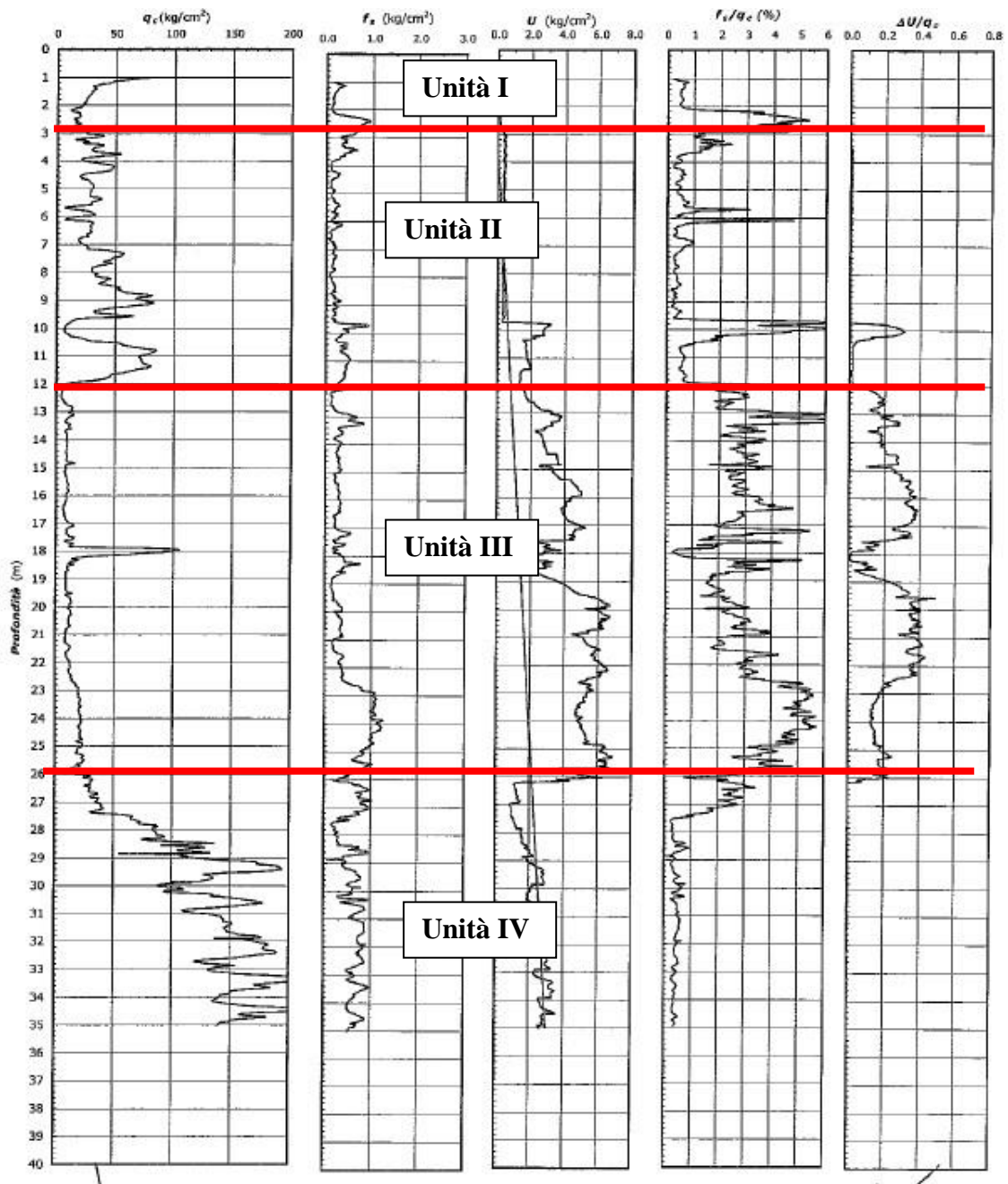


Figura 9 CPTU1-08 (Sezione C-C)

### **Sezione di riferimento B – B' (figure 10-13)**

La sezione in argomento è ubicata a Final di Rero in corrispondenza del nuovo ponte sul Po di Volano previsto in progetto. I dati disponibili sono diversi e relativi alla campagna del 2004 con il sondaggio SP2 e la CPTU2, e del 2014 con i sondaggi S1/14, S2/14 e le penetrometriche P1/14 e P2/14. Per quest'opera si dispone quindi di una prova penetrometrica ed un sondaggio in sponda sinistra, e di due sondaggi e due prove penetrometriche in sponda destra.

Poco più a valle sulla passerella pedonale sono disponibili anche le penetrometriche P3/14 e P4/14.

I risultati emergenti dalle indagini sono fra loro ben correlabili sia su ambo le sponde sia considerano la più traslata zona della passerella.

Sul ponte l'unità I sabbioso limosa si sviluppa nei primi 2-3 m circa passando poi all'unità II sabbiosa che si spinge fino a circa 8-10 m da p.c. A seguire da 8-10 m a circa 25-28 m l'unità III limoso argillosa, ed infine l'unità IV sabbiosa fino alle massime profondità indagate (43,5 m con la penetrometrica e 50 m con il sondaggio). Le più profonde prove penetrometriche e sondaggi riscontrano come a partire dalla profondità di circa 39-40 m nell'unità IV siano presenti alcune intercalazioni limoso argillosa consistenti.

In corrispondenza della passerella la successione è sostanzialmente la stessa ma diventa più irregolare e relativamente meno "pulita". I limi sabbiosi (o materiale di riporto) dell'unità I si spingono fino a 4-6 m con una frazione più fine al letto in sponda sinistra. Le sabbie dell'unità II mostrano intercalazioni limose, e i limi argillosi dell'unità III sono interrotti fra 18-21 m circa da una evidente intercalazione sabbiosa.



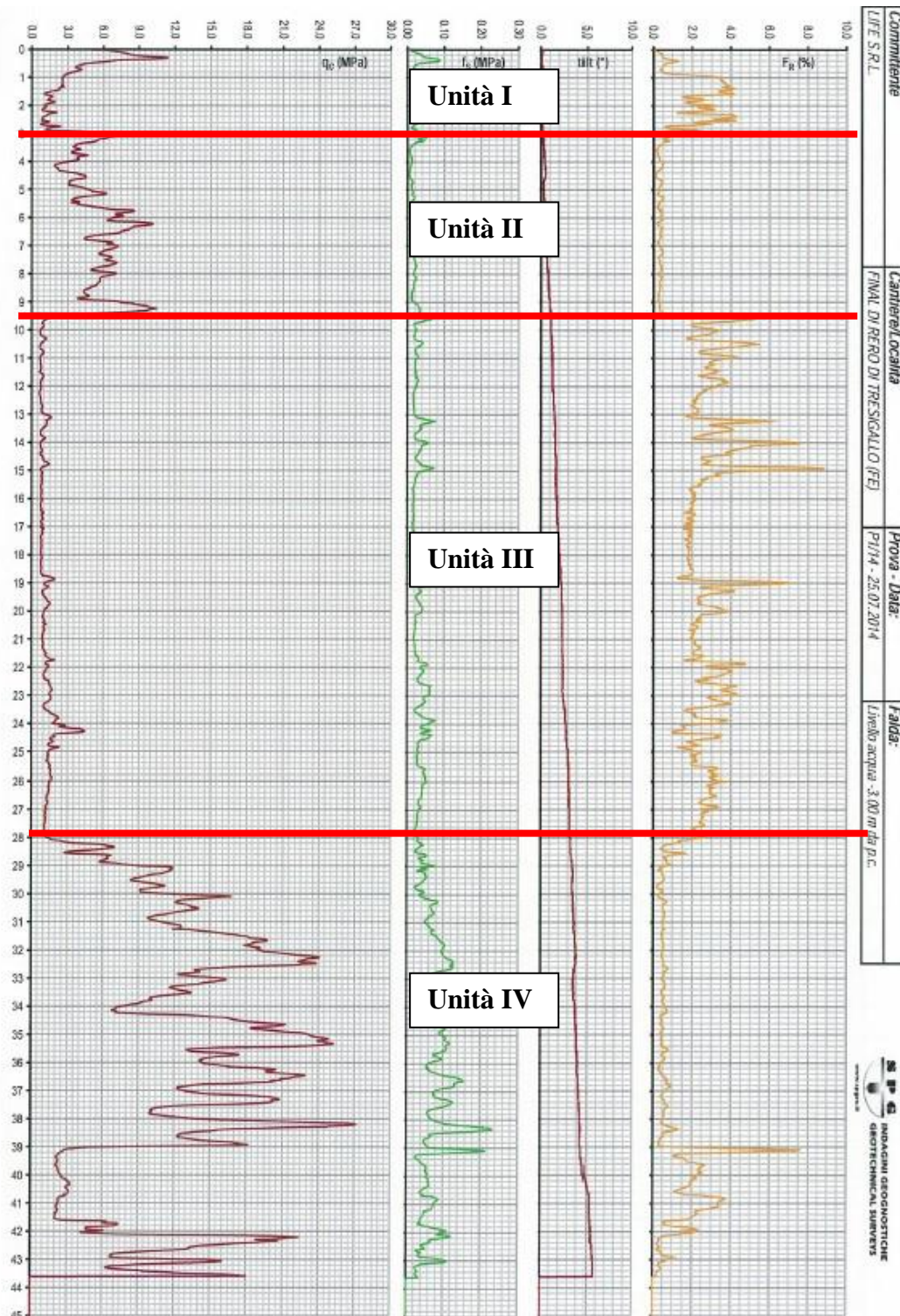


Figura 10 CPT1-14 Ponte Final di Rero sponda destra

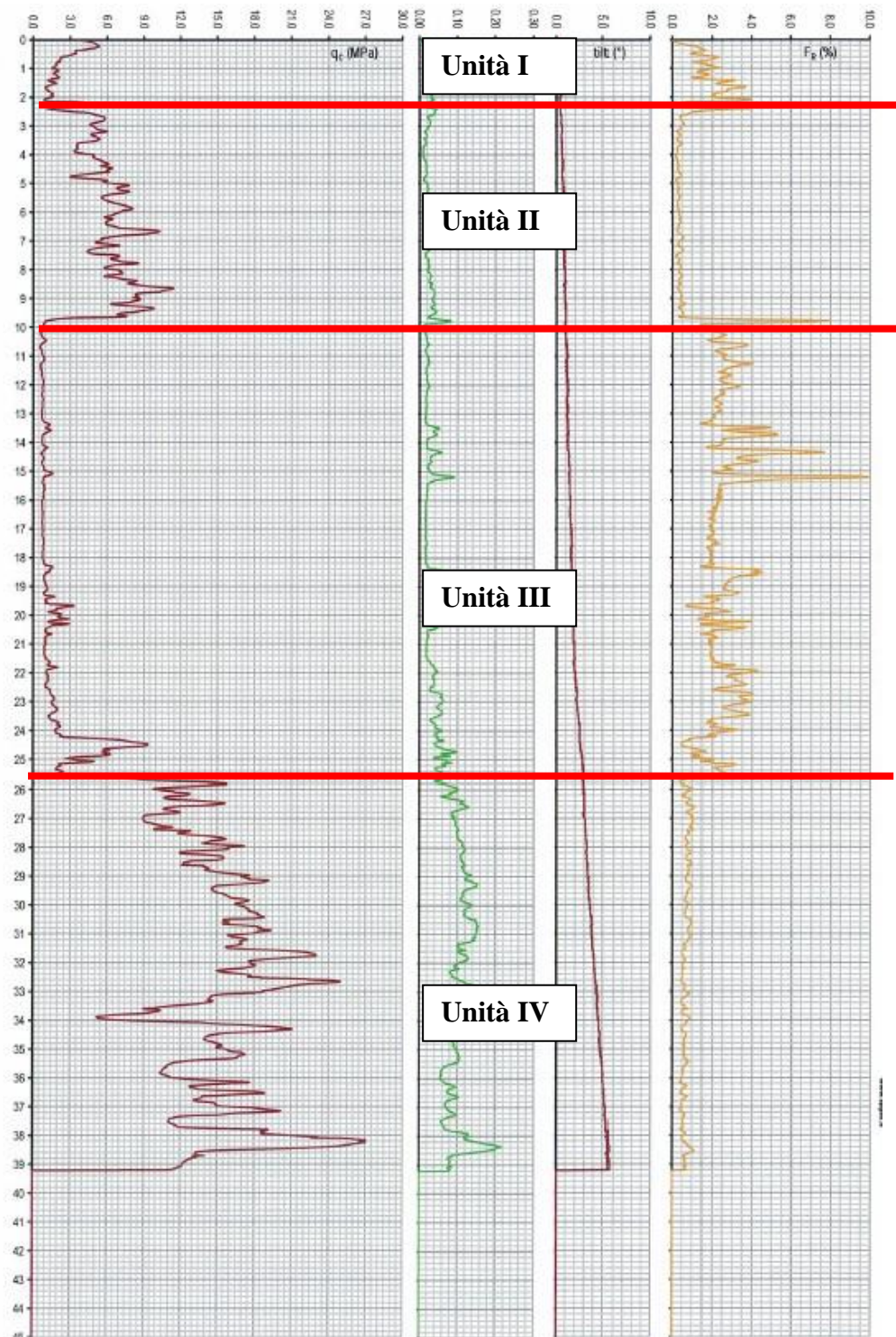


Figura 11 CPT2-14 Ponte Final di Rero sponda destra



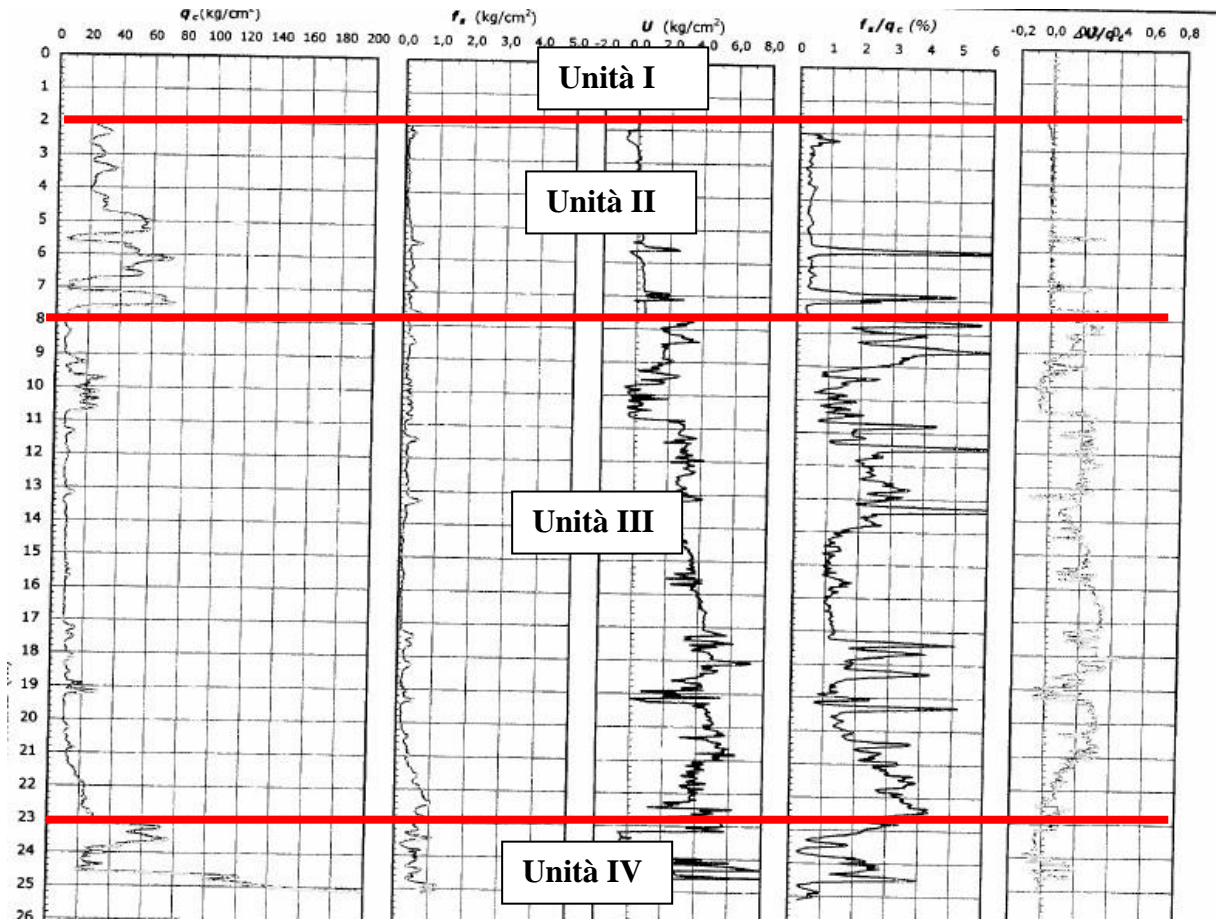


Figura 12 CPTU2-04 Ponte Final di Rero sponda sinistra

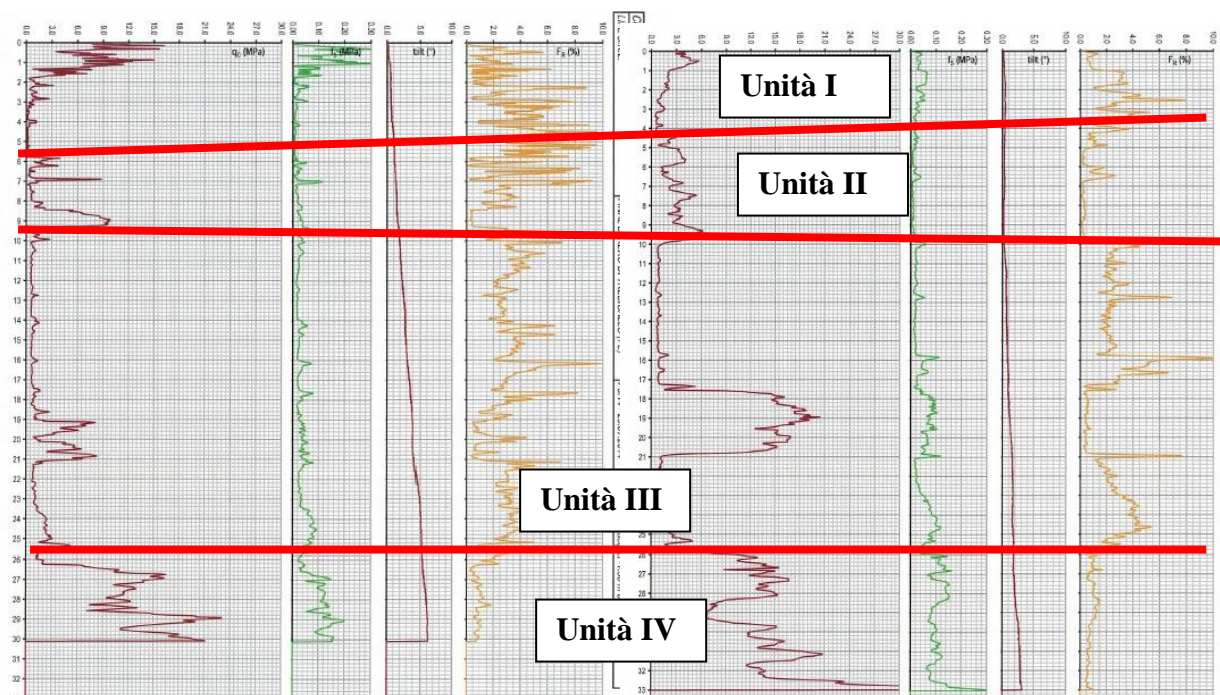


Figura 13 CPT3-14 e CPT4-14 sulle due sponde, zona passerella

Dai sondaggi e delle prove penetrometriche è possibile riscontrare, all'interno degli strati limo argillosi, livelli o orizzonti sia di torba che sabbia (o sabbia limosa) a diversa continuità laterale.

In zona d'intervento è da citare anche il sondaggio SC1/pz realizzato lungo la deviazione dell'idrovia. In buona coerenza con quanto sopra riscontra l'unità I sabbioso limosa da p.c a 2,5 m, l'unità II sabbiosa da 2,5 a 13,7 m, l'unità III limoso argillosa da 13,7 a 23,6 m, ed infine l'unità IV sabbiosa fra 23,6 e 35 m (massima profondità raggiunta). Gli scavi dell'idrovia andranno quindi a svilupparsi in terreni sabbiosi limosi fino ad intercettare il tetto dell'unità sabbiosa.

Le eteropie fra sponda destra e sinistra del Po di Volano sembrano segnalare la tendenza del corso d'acqua a divagare più frequentemente sul lato destro piuttosto che in quello sinistro. Tale ipotesi ben si sposa con la carta del microrilievo che segnala aree depresse (anche sotto il livello del mare) concentrate oltre la sponda sinistra del Po di



Volano, e con la carta geomorfologica del PUC di Ferrara che nel salto di Meandro di Medelana riporta un fenomeno di rotta.

Nel complesso è evidente una spiccata variabilità laterale e verticale tipica di un ambiente di sedimentazione fluviale. La situazione litostratigrafica generale viene comunque adeguatamente rappresentata dalle indagini eseguite nelle diverse fasi.

## 7 ANALISI DEI DATI

In questo capitolo sono presentate, con riferimento all'insieme delle indagini e prove eseguite lungo l'intera tratta dalla conca di Valpigliaro a Migliarino, le informazioni disponibili poste a base della determinazione delle caratteristiche fisiche, di resistenza e deformabilità dei terreni. Verranno illustrati, mediante grafici e tabelle, i parametri direttamente acquisiti nonché quelli ottenuti attraverso estrapolazioni e correlazioni, indicando i riferimenti dei vari autori.

Le informazioni acquisite da prove in sito consistono in valori di resistenza alla penetrazione dinamica (SPT) e Vane Test eseguiti nel corso dei sondaggi. Nel corso dei sondaggi, inoltre, sulle carote di materiale coesivo sono state effettuate misurazioni con penetrometro tascabile (Pocket) e scissometro (Torvane) che hanno permesso di valutare, in prima approssimazione, la resistenza alla compressione semplice  $q_c$  espressa in  $\text{kg}/\text{cm}^2$ , e la resistenza al taglio (in  $\text{kg}/\text{cm}^2$ ) di un terreno coesivo in termini di coesione non drenata  $c_u$ .

I dati misurati in laboratorio consistono essenzialmente in analisi granulometriche (Gr), misura degli indici di consistenza ( $W_l$ ,  $W_p$ ,  $I_p$ ) contenuto d'acqua, peso dell'unità di volume, prove di compressione ad espansione laterale libera (ELL), prove edometriche, prove di taglio diretto e prove triassiali (CU e CD).

Le prove penetrometriche statiche CPT hanno permesso la rilevazione dei valori di resistenza alla punta, dell'attrito laterale e, ove acquisita, della pressione neutra.

I pozzetti hanno rilevato la stratigrafia, la densità in sito e la deformabilità dei terreni superficiali.

### 7.1 Prove di laboratorio

Nel corso delle indagini del 2004 e 2008 si sono prelevati complessivamente n° 57 campioni rimaneggiati e n° 31 campioni indisturbati.

Per tutti i campioni sono state effettuate analisi granulometriche tramite setacciatura meccanica e, dove significativo, per sedimentazione, oltre alla determinazione degli indici di Atterberg.

Sui campioni indisturbati si è inoltre proceduto alla determinazione del peso di volume, del contenuto d'acqua, dell'indice dei vuoti e del grado di saturazione; per i campioni prelevati in corrispondenza di livelli torbosi è stato determinato anche il contenuto di sostanza organica.

Rammentando che i sondaggi del tratto Valpagliaro Finale di Rero sono SP1-SP2-SC1-SC2-SP1-08 la tabella seguente riassume i dati relativi a sondaggi, profondità di prelievo, granulometria, limiti di Atterberg e classificazione per tutti i campioni:

SONDAGGIO	CAMPIONE	PROFONDITA'	GRANULOMETRIA				LIMITI DI CONSISTENZA			Indice di consistenza	U.S.C.S.	UNI 10006	LITOLOGIA
			Ghiaia	Sabbia	Limo	Argilla	LL	LP	IP				
SC2	Sh 1	3,0-3,5		17	81	2	-	-	-			A4	limo sabbioso
SC2	Sh 2	6,0-6,6		0	62	38	69	32	37	0,64	CH	A7	limo con argilla
SC2	Sh 3	9,0-9,5		0	58	42	102	41	61	1,01	CH	A7	limo con argilla organica
SP1	Sh 5	18,0-18,6		0	59	41	69	30	39	0,61	CH	A7	limo con argilla
SP1	Sh 6	21,0-21,4		0	83	17	40	27	13	0,65	ML	A6	limo argilloso
SP2	Sh 5	21,0-21,5		0	77	23	50	30	20	0,51	MH	A7	limo argilloso
SP2	Sh 6	24,0-24,6		0	59	41	53	20	33	0,92	CH	A7	limo con argilla
SP2	Sh 7	27,0-27,6		0	63	37	45	23	22	0,77	CL	A7	limo con argilla
SP3	Sh 1	3,0-3,5		0	88	12	41	27	14	0,36	ML	A7	limo argilloso
SP3	Sh 2	6,0-6,6		0	88	12	39	26	13	0,24	ML	A6	limo argilloso
SP3	Sh 3	9,0-9,6		0	67	33	68	30	38	0,83	CH	A7	limo con argilla
SP3	Sh 7	25,0-25,4		0	53	47	53	21	32	0,90	CH	A7	limo e argilla
SP4	Sh 2	9,0-9,6		0	84	16	88	42	46	0,57	OH	A7	limo argilloso
SP4	Sh 3	12,0-12,6		0	67	33	68	38	30	0,74	OH	A7	limo con argilla
SP4	Sh 4	15,0-15,6		0	70	30	52	31	21	0,30	OH	A7	limo con argilla
SP4	Sh 5	18,0-18,3		0	86	14	35	25	10	0,23	ML	A4	limo argilloso
SP4	Sh 8	26,0-26,5		0	42	58	60	24	36	0,84	CH	A7	argilla da limosa a con limo
SP5/Pz	Sh 1	3,0-3,6		0	82	18	36	24	12	0,73	ML	A6	limo argilloso
SP5/Pz	Sh 8	30,0-30,6		0	32	68	49	25	24	0,57	CL	A7	argilla con limo
SC1pz-08	Cl1	5,00 - 5,50	0,0	3,5	44,3	52,1	73,0	32,0	41,0	1,00	CH	A7	Argilla con limo grigia
SC1pz-08	Cl2	7,50 - 8,00	0,0	19,5	61,4	19,1					ML	A4	Limo sabbioso argilloso grigio
SC1pz-08	Cl3	9,00 - 9,50	0,0	15,0	61,7	23,4	35,0	18,8	16,2	0,15	CL	A6	Limo argilloso debolmente sabbioso
SC1pz-08	Cl4	17,50 - 18,00	0,0	3,4	41,1	55,5	55,2	24,6	30,7	0,33	CH	A7	Argilla con limo grigio marrone
SC1pz-08	Cl5	20,50 - 21,00	0,0	6,1	53,2	40,8	56,2	30,0	26,2	0,86	MH o OH	A7	Limo con argilla grigio chiaro
SC1pz-08	Cl6	24,00 - 24,50	0,0	3,4	43,0	53,6	69,5	24,6	45,0	0,67	CH	A7	Argilla con limo con resti vegetali
SC2pz-08	Cl1	5,00 - 5,50	0,0	54,1	32,7	13,2					ML	A4	Sabbia argillosa con limo marrone
SC2pz-08	Cl2	13,50 - 14,00	0,0	2,9	52,9	44,2	44,2	20,9	23,3	0,40	CL	A7	Limo con argilla grigio chiaro e rari
SC2pz-08	Cl3	16,50 - 17,00	5,2	29,8	46,6	18,3	33,3	25,0	8,3		ML o OL	A4	Limo argilloso con sabbia fine grigio
SC2pz-08	Cl4	20,00 - 20,50	0,1	5,5	44,5	49,9	65,6	29,1	36,5	0,81	CH	A7	Argilla con limo grigio, con rari resti
SC2pz-08	Cl5	24,00 - 24,50	0,0	5,6	63,9	30,5	52,9	26,6	26,2	0,81	CH	A7	Limo con argilla a tratti debolmente
SC2pz-08	Cl6	31,50 - 32,00	0,0	3,2	37,0	59,8	56,3	22,6	33,7	0,92	CH	A7	Argilla limosa grigio azzurro con
SC1/Pz	Ri 1	1,5-1,8		26	68	6	-	-	-		ML	A4	limo con sabbia deb. argilloso
SC1/Pz	Ri 2	5,5-5,8		64	35	1	-	-	-		SM	A2.4	sabbia con limo
SC1/Pz	Ri 3	12,0-12,3		96	4	0	-	-	-		SP	A1	sabbia medio fine
SC2	Ri 4	12,0-12,3		0	66	34	65	33	32	0,43	MH	A7	limo con argilla
SC3/Pz	Ri 1	1,0-1,3		42	45	13	32	24	8		CL	A4	limo con sabbia deb. argilloso
SC3/Pz	Ri 2	4,8-5,1		67	30	3	-	-	-		SM	A2.4	sabbia con limo
SC3/Pz	Ri 3	11,0-11,3		89	11	0	-	-	-		SM	A1	sabbia limosa
SP1	Ri 1	3,0-3,3		74	26	0	-	-	-		SM	A2.4	sabbia con limo
SP1	Ri 2	6,0-6,3		90	10	0	-	-	-		SM	A1	sabbia limosa
SP1	Ri 3	9,0-9,3		99	1	0	-	-	-		SP	A1	sabbia medio fine
SP1	Ri 4	11,2-11,5		0	48	52	143	66	77	0,65	OH	A7	argilla con limo
SP1	Ri 7	24,5-25,0		66	32	2	-	-	-		SM	A2.4	sabbia con limo
SP1	Ri 8	28,0-28,5		82	18	0	-	-	-		SM	A2.4	sabbia limosa
SP1	Ri 9	32,0-32,3		97	3	0	-	-	-		SP	A1	sabbia medio fine

SP2	Ri 1	2,7-3,0		64	35	1	-	-	-		SM	A2.4	sabbia con limo
SP2	Ri 2	9,7-10,0		49	44	7	25	23	2	0,53	ML	A4	sabbia con limo deb. argilloso
SP2	Ri 3	14,7-15,0		54	42	4	-	-	-		SM	A4	sabbia con limo a tratti deb. argillosa
SP2	Ri 4	16,0-16,3		9	74	17	40	29	11	0,18	ML	A6	limo argilloso deb. sabbioso
SP2	Ri 8	29,2-29,5		51	43	6	-	-	-		ML	A4	sabbia con limo deb. argillosa
SP2	Ri 9	33,0-33,3		95	5	0	-	-	-		SP	A1	sabbia medio fine
SP3	Ri 4	11,0-11,3		36	57	7	-	-	-		ML	A4	limo con sabbia deb. argilloso
SP3	Ri 5	17,2-17,5		60	35	5	-	-	-		ML	A4	sabbia con limo deb. argillosa
SP3	Ri 6	24,1-24,4		0	58	42	171	80	91	0,76	OH	A7	limo con argilla
SP3	Ri 8	27,5-27,8		6	82	12	28	22	6	0,24	ML	A4	limo argilloso deb. sabbioso
SP3	Ri 9	30,0-30,3		0	83	17	39	28	11	1,13	OL	A6	limo argilloso
SP4	Ri 1	4,4-4,7		16	77	7	34	26	8	0,10	ML	A4	limo sabbioso deb. argilloso
SP4	Ri 6	21,1-21,4		0	75	25	49	28	21	0,45	OL	A7	limo con argilla
SP4	Ri 7	23,6-23,9		0	53	47	55	30	25	0,53	OH	A7	limo con argilla
SP4	Ri 9	29,5-29,8		0	88	12	-	-	-		ML	A4	limo argilloso
SP4	Ri 10	34,2-34,5		50	43	7	31	25	6	1,04	ML	A4	sabbia con limo deb. argilloso
SP5/Pz	Ri 2	6,0-6,45		80	20	0	-	-	-		SM	A1	sabbia limosa
SP5/Pz	Ri 3	9,0-9,45		98	2	0	-	-	-		SP	A1	sabbia medio fine
SP5/Pz	Ri 4	12,0-12,45		99	1	0	-	-	-		SP	A1	sabbia medio fine
SP5/Pz	Ri 5	15,0-15,45		98	2	0	-	-	-		SP	A1	sabbia medio fine
SP5/Pz	Ri 6	21,5-21,8		0	65	35	50	29	21	0,48	MH	A7	limo con argilla
SP5/Pz	Ri 7	27,5-27,8		0	52	48	57	20	36	0,78	CH	A7	argilla e limo
SP5/Pz	Ri 9	34,5-34,8		2	87	11	35	31	4	0,89	ML	A4	limo argilloso
SC1pz-08	Ri1	1.50 - 1.80	3,8	49,6	38,2	8,4					ML	A4	sabbia con limo
SC1pz-08	Ri2	3.00 - 3.45	0,1	24,2	64,5	11,2					ML	A4	limo sabbioso argilloso marrone
SC1pz-08	Ri3	6.00 - 6.45	0,0	1,2	35,3	63,6	50,7	25,3	25,4	0,69	CH	A7	argilla con limo grigia
SC1pz-08	Ri4	10.50 - 10.80	0,9	15,3	51,5	32,3	53,6	38,0	15,6	1,31	MH o OH	A7	limo con argilla sabbioso, marrone
SC1pz-08	Ri5	12.00 - 12.45	1,4	76,3	22,3	0,0					ML	A2.4	sabbia con limo grigio
SC1pz-08	Ri6	14.60 - 15.05	1,2	93,0	5,9	0,0					ML	A1	sabbia debolmente limosa grigio
SC1pz-08	Ri7	16.00 - 16.45	0,0	2,0	39,7	58,4	49,6	25,9	23,6	0,69	CL	A7	argilla con limo grigia
SC1pz-08	Ri8	27.00 - 27.30	0,0	4,3	45,2	50,5	43,4	25,8	17,6	0,54	CL	A7	argilla con limo grigia
SC1pz-08	Ri9	30.00 - 30.45	0,7	87,9	11,4	0,0					ML	A1	sabbia limosa grigia
SC1pz-08	Ri10	33.00 - 33.45	1,6	79,5	19,0	0,0					ML	A2.4	sabbia limosa grigia
SC2pz-08	Ri1	1.50 - 1.80	1,2	39,8	48,5	10,5					ML	A4	limo con sabbia debolmente argilloso
SC2pz-08	Ri2	3.00 - 3.45	2,5	31,3	47,4	18,8					ML	A4	limo argilloso con sabbia marrone
SC2pz-08	Ri3	7.50 - 7.95	0,0	75,2	24,8	0,0					ML	A2.4	sabbia fine con limo grigia
SC2pz-08	Ri4	10.00 - 10.30	0,0	66,7	33,3	0,0					ML	A2.4	sabbia fine con limo grigia
SC2pz-08	Ri5	12.00 - 12.45	0,0	68,7	31,3	0,0					ML	A2.4	sabbia fine con limo grigio
SC2pz-08	Ri6	15.00 - 15.45	0,0	81,9	18,1	0,0					ML	A2.4	sabbia limosa grigia
SC2pz-08	Ri7	18.00 - 18.30	0,0	2,8	46,0	51,2	41,1	21,4	19,7	0,40	CL	A7	argilla con limo grigio
SC2pz-08	Ri8	22.00 - 22.30	0,2	52,0	47,8	0,0					ML	A4	limo con sabbia grigio
SC2pz-08	Ri9	30.00 - 30.45	0,1	25,5	48,2	26,3					ML	A4	limo argilloso sabbioso grigio
SC2pz-08	Ri10	33.00 - 33.30	0,0	2,5	44,3	53,2					CH	A4	argilla con limo grigio

**Tabella 8. Elenco campioni rimaneggiati (RI) ed indisturbati (Sh-CI) con relativa classificazione granulometrica e limiti di Atterberg**

La tabella successiva riassume i parametri fisici (peso/volume, porosità, indice dei vuoti, contenuto d'acqua, grado di saturazione) dei campioni indisturbati.

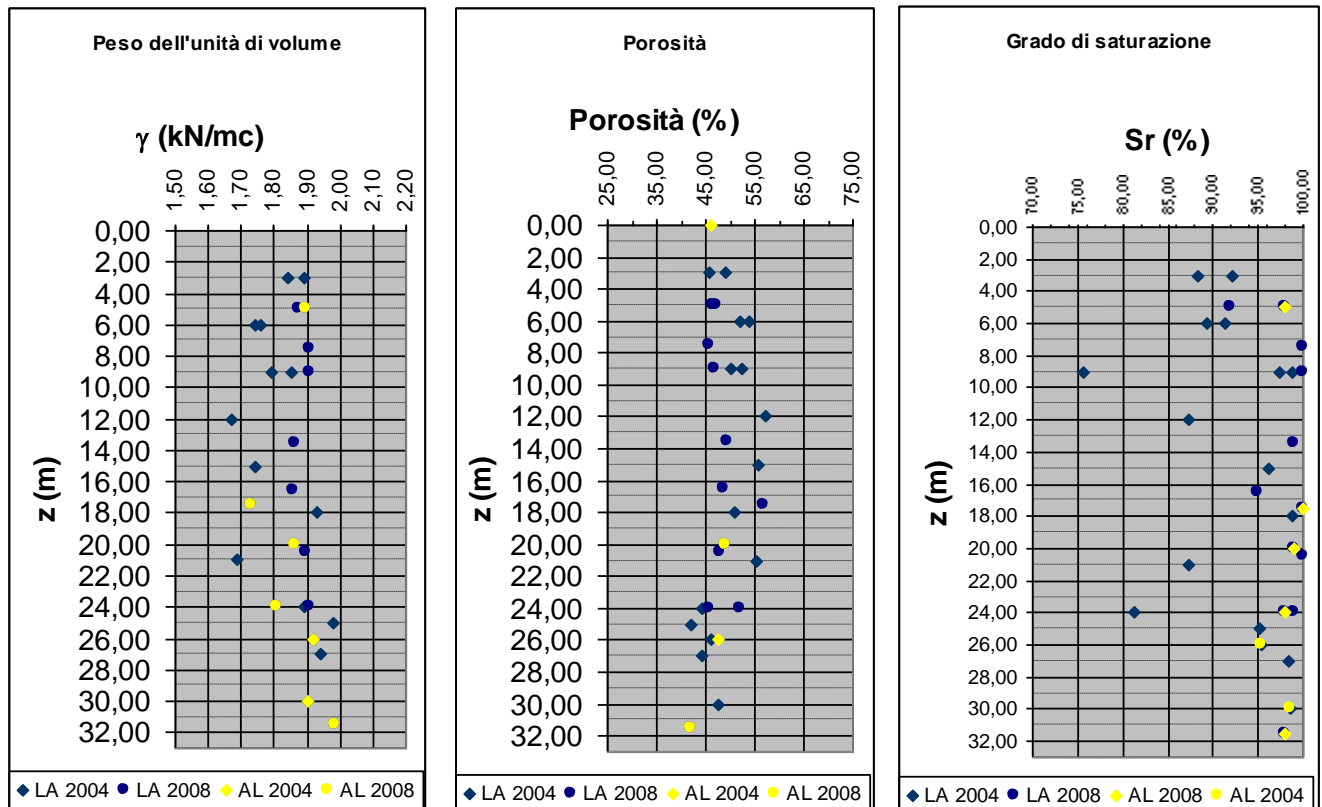
SONDAGGIO	CAMPIONE	PROFONDITA'	massa specifica (Mg/m <sup>3</sup> )	W naturale (%)	$\gamma$ naturale (Mg/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ secco (Mg/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ immerso (Mg/m <sup>3</sup> )	porosità (%)	indice dei vuoti	grado di saturazione (%)	sostanza organica
SC2	Sh 1	3,00	2,70	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	-
SC2	Sh 2	6,00	2,71	40	1,74	1,25	0,79	54,04	1,18	91,34	-
SC2	Sh 3	9,00	2,70	40,1	1,79	1,28	0,80	52,56	1,11	97,31	-
SP1	Sh 5	18,00	2,69	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	-
SP1	Sh 6	21,00	2,75	-	-	-	-	0,00	0,00	0,00	-
SP2	Sh 5	21,00	2,71	40,2	1,69	1,21	0,76	55,55	1,25	87,23	1,9%
SP2	Sh 6	24,00	2,74	23,4	1,89	1,53	0,97	44,08	0,79	81,30	-
SP2	Sh 7	27,00	2,70	28,9	1,94	1,51	0,95	44,17	0,79	98,46	-
SP3	Sh 1	3,00	2,73	32,7	1,84	1,39	0,88	49,25	0,97	92,07	-
SP3	Sh 2	6,00	2,70	36	1,76	1,29	0,82	52,12	1,09	89,38	-
SP3	Sh 3	9,00	2,72	36,5	1,85	1,36	0,86	50,10	1,00	98,74	8,3%
SP3	Sh 7	25,00	2,72	25,3	1,98	1,58	1,00	41,97	0,72	95,26	-
SP4	Sh 2	9,00	2,46	113,1	1,12	0,53	0,31	78,60	3,67	75,63	10,4%
SP4	Sh 3	12,00	2,74	42,6	1,67	1,17	0,74	57,20	1,34	87,22	-
SP4	Sh 4	15,00	2,73	44,6	1,74	1,20	0,76	55,86	1,27	96,08	10,9%
SP4	Sh 5	18,00	2,74	33,3	1,93	1,35	0,86	50,90	1,04	98,75	-
SP4	Sh 8	26,00	2,74	29,6	1,92	1,48	0,94	45,95	0,85	95,43	-
SP5/Pz	Sh 1	3,00	2,74	27,2	1,89	1,49	0,94	45,73	0,84	88,37	-
SP5/Pz	Sh 8	30,00	2,73	32,6	1,90	1,43	0,91	47,42	0,90	98,51	-
SC1pz-08	CI1	5.00 - 5.50	2,71	-	1,894	1,431	0,902	47,100	0,89	98,00	-
SC1pz-08	CI2	7.50 - 8.00	2,68	-	1,908	1,450	0,909	45,900	0,85	100,00	-
SC1pz-08	CI3	9.00 - 9.50	2,71	-	1,909	1,441	0,909	46,700	0,88	100,00	-
SC1pz-08	CI4	17.50 - 18.00	2,70	-	1,734	1,168	0,736	56,800	1,31	100,00	-
SC1pz-08	CI5	20.50 - 21.00	2,71	-	1,895	1,417	0,894	47,800	0,91	100,00	-
SC1pz-08	CI6	24.00 - 24.50	2,70	-	1,808	1,295	0,816	52,000	1,08	98,00	-
Sc2pz-08	CI1	5.00 - 5.50	2,70	-	1,877	1,451	0,914	46,300	0,86	92,00	-
Sc2pz-08	CI2	13.50 - 14.00	2,72	-	1,865	1,375	0,869	49,400	0,98	99,00	-
Sc2pz-08	CI3	16.50 - 17.00	2,72	-	1,859	1,397	0,882	48,600	0,94	95,00	-
Sc2pz-08	CI4	20.00 - 20.50	2,70	-	1,864	1,380	0,869	49,000	0,96	99,00	-
Sc2pz-08	CI5	24.00 - 24.50	2,68	-	1,909	1,455	0,912	45,700	0,84	99,00	-
Sc2pz-08	CI6	31.50 - 32.00	2,71	-	1,984	1,569	0,991	42,200	0,73	98,00	-

**Tabella 9. Campioni indisturbati – parametri fisici**

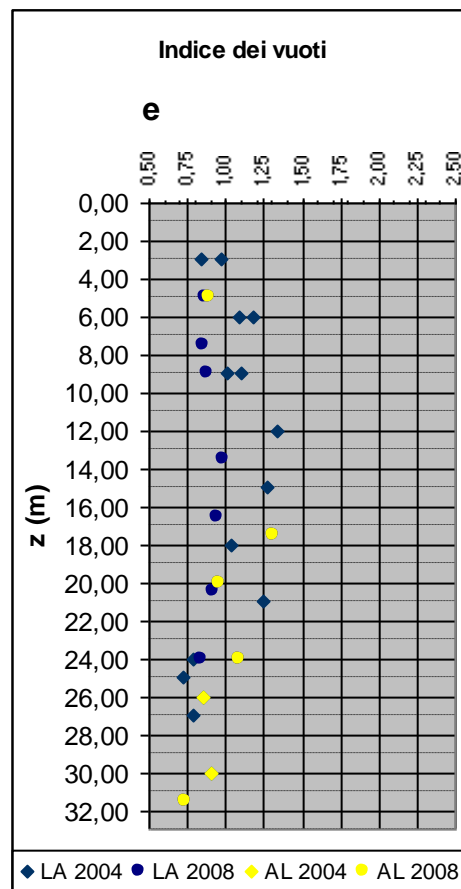
Il peso di volume naturale viene rappresentato in figura seguente distinto nei campioni della campagna del 2004 e 2008, ed ancora in materiali limoso argillosi (sigla LA – contenuto di limo con anche sabbia >50%) e prevalentemente argilloso limosi (sigla AL – contenuto di argilla > 50%). I valori medi sono posti attorno ad 1,9 kN/mc senza particolari variazioni evidenti con la profondità. e fra LA ed AL, termini questi accorpati nell'unità III.

La porosità varia fra il 45-50% negli strati superficiali sino a circa 10 m di profondità, cresce a valori medi di 50-55% fra 10 e 22 m da p.c. e successivamente diminuisce portandosi a circa il 45%. Le AL hanno valori relativamente più costanti ferma restando una modesta diminuzione oltre i 22,00 m.

Il grado di saturazione è di circa il 90% sino a 6 m, successivamente si porta a valori compresi fra il 95 ed il 100% con valori mediamente più elevati per i materiali AL.



L'indice dei vuoti mostra un andamento allineato alla porosità con valori medi attorno all'unità sino a circa 10 m da p.c., fra 1,00 ed 1,25 sino a 22 m da p.c. che, successivamente, diminuiscono portandosi a valori compresi fra 0,75 – 0,85 sino alle massime profondità indagate, senza differenze fra LA e AL.



Nei materiali coesivi i limiti di Atterberg risultano piuttosto dispersi, e nel diagramma di Casagrande (figura 14) i campioni si ubicano lungo la retta  $PI = 0,73 (w_l - 20)$ , che divide il campo dei limi inorganici, limi organici ed argille organiche, inferiormente, dalle argille inorganiche, superiormente. Sono inoltre posti, in egual misura, a destra e sinistra della linea di separazione  $w_l = 50$ , che divide materiali molto plastici, a destra, da materiali mediamente plastici, a sinistra.

Suddividendo i campioni in due categorie, ovvero limi argillosi ed argille limose è possibile fare una certa distinzione. Le argille limose (figura 15) sono concentrate nel campo delle argille inorganiche di alta plasticità, mentre i limi argillosi (figura 16) nel campo dei limi inorganici di media compressibilità.

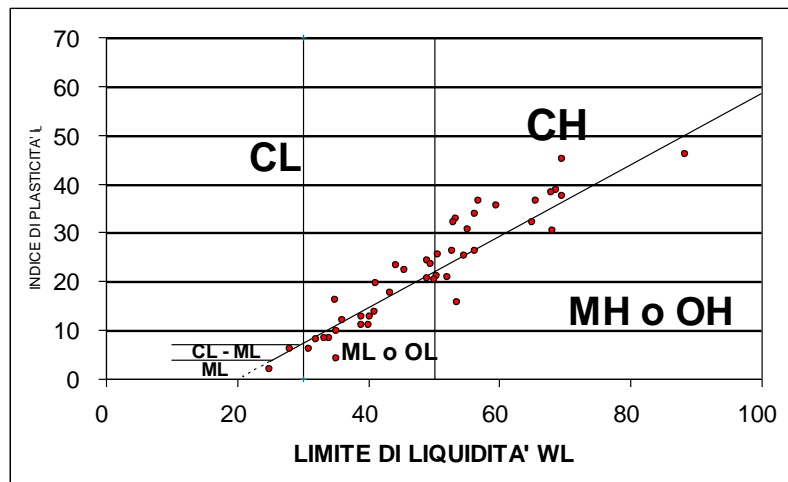


Figura 14. Diagramma di plasticità di Casagrande – tutti i campioni

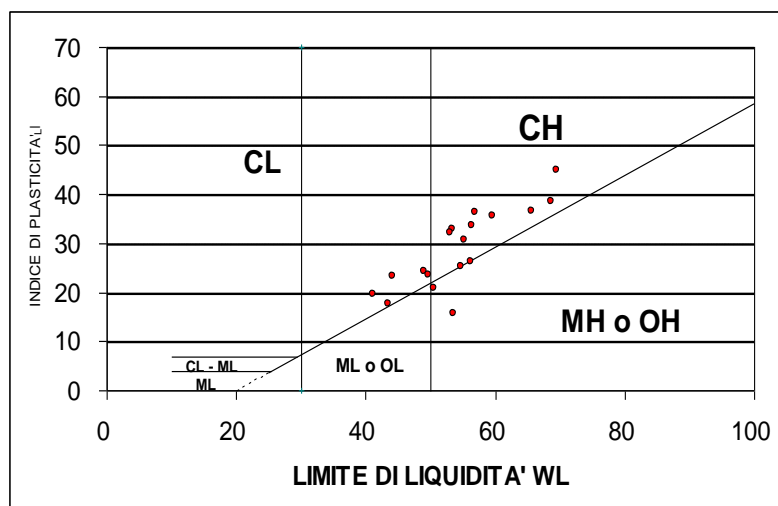


Figura 15. Diagramma di plasticità di Casagrande – Argille limose



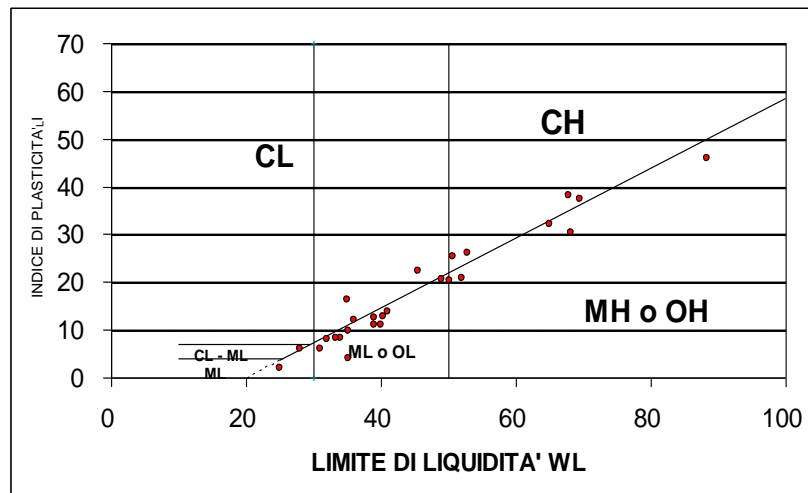


Figura 16. Diagramma di plasticità di Casagrande – Limi argillosi

L'indice di consistenza risulta disperso ma normalmente assume valori compresi fra 0,4 e 0,9 in funzione della profondità.

Per quanto attiene la valutazione delle caratteristiche di resistenza dei terreni sono disponibili le seguenti prove, i cui risultati sono riepilogati in tabella 10:

- compressione semplice (ELL) su n° 21 campioni;
- prove di taglio diretto consolidato e drenato (Ta CD) su n° 9 campioni;
- prova triassiale consolidata drenata (Tx CD) su n° 1 campione;
- prova triassiale consolidata non drenata (Tx CU) su n° 3 campioni.

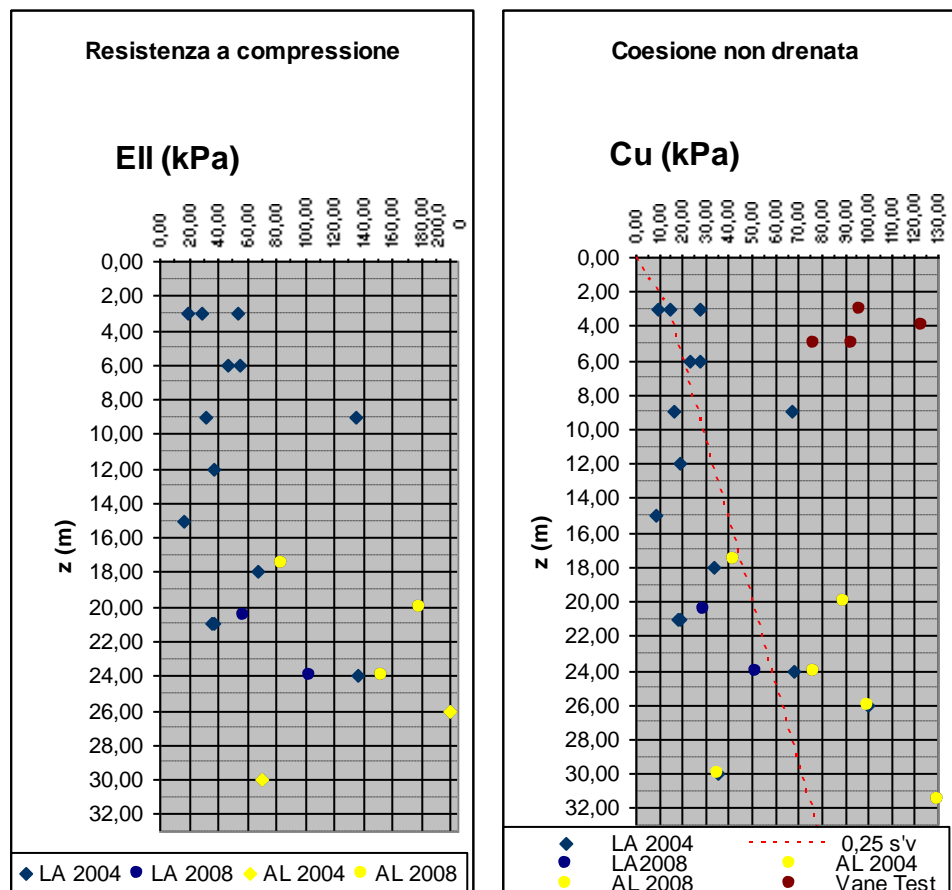
SONDAGGIO	PROFONDITA'	CAMPIONE	ELL (kPa)	Cu (kPa) (1/2 qu)	Ta CD		Tx CD		Tx CU	
					c' (kPa)	φ' (°)	c' (kPa)	φ' (°)	c' (kPa)	φ' (°)
SC2	3,0-3,5	Sh 1	28,97	14,49						
SC2	6,0-6,6	Sh 2	55,37	27,69						
SC2	9,0-9,5	Sh 3								
SP1	18,0-18,6	Sh 5	67,29	33,65						
SP1	21,0-21,4	Sh 6	37,62	18,81						
SP2	21,0-21,5	Sh 5	35,67	17,84						
SP2	24,0-24,6	Sh 6	136,86	68,43						
SP2	27,0-27,6	Sh 7			14,62	23°				
SP3	3,0-3,5	Sh 1	18,65	9,33						
SP3	6,0-6,6	Sh 2	46,77	23,39			3,66	32°		
SP3	9,0-9,6	Sh 3	32,17	16,09						
SP3	25,0-25,4	Sh 7			11,07	24°				
SP4	9,0-9,6	Sh 2	134,82	67,41						
SP4	12,0-12,6	Sh 3	37,76	18,88					9,58	23°
SP4	15,0-15,6	Sh 4	16,95	8,48	19,07	24°				
SP4	18,0-18,3	Sh 5								
SP4	26,0-26,5	Sh 8	200,14	100,07						
SP5/Pz	3,0-3,6	Sh 1	54,26	27,13	25,49	29°				
SP5/Pz	30,0-30,6	Sh 8	70,47	35,24	3,69	24°				
S1pz-08	5,0-5,5	CI1							5,99	26°
S1pz-08	7,5-8,0	CI2			7,13	28°				
S1pz-08	9,0-9,5	CI3			36,07	22°				
S1pz-08	17,5-18,0	CI4	84,53							
S1pz-08	20,5-21,0	CI5	58,17							
S1pz-08	24,0-24,5	CI6	152,9		28,99	30°				
S2pz-08	5,0-5,50	CI1								
S2pz-08	13,5-14,0	CI2							19,09	21°
S2pz-08	16,5-17,0	CI3			0,61	29°				
S2pz-08	20,0-20,5	CI4	178,4							
S2pz-08	24,0-24,5	CI5	103,36							
S2pz-08	31,5-32,0	CI6	259,83							

**Tabella 10. Prove di resistenza (ELL – Ta – Tx)**

I grafici seguenti mostrano l'andamento della resistenza a compressione dedotta dalle prove con espansione laterale libera (ELL), nonché la coesione non drenata ( $C_u = \frac{1}{2} ELL$ ) nei materiali LA ed AL con la profondità; anche in questo caso è stata mantenuta la distinzione fra i risultati delle due campagne geognostiche. Nel grafico sono rappresentati anche i vane test effettuati in avanzamento nel corso dei sondaggi.

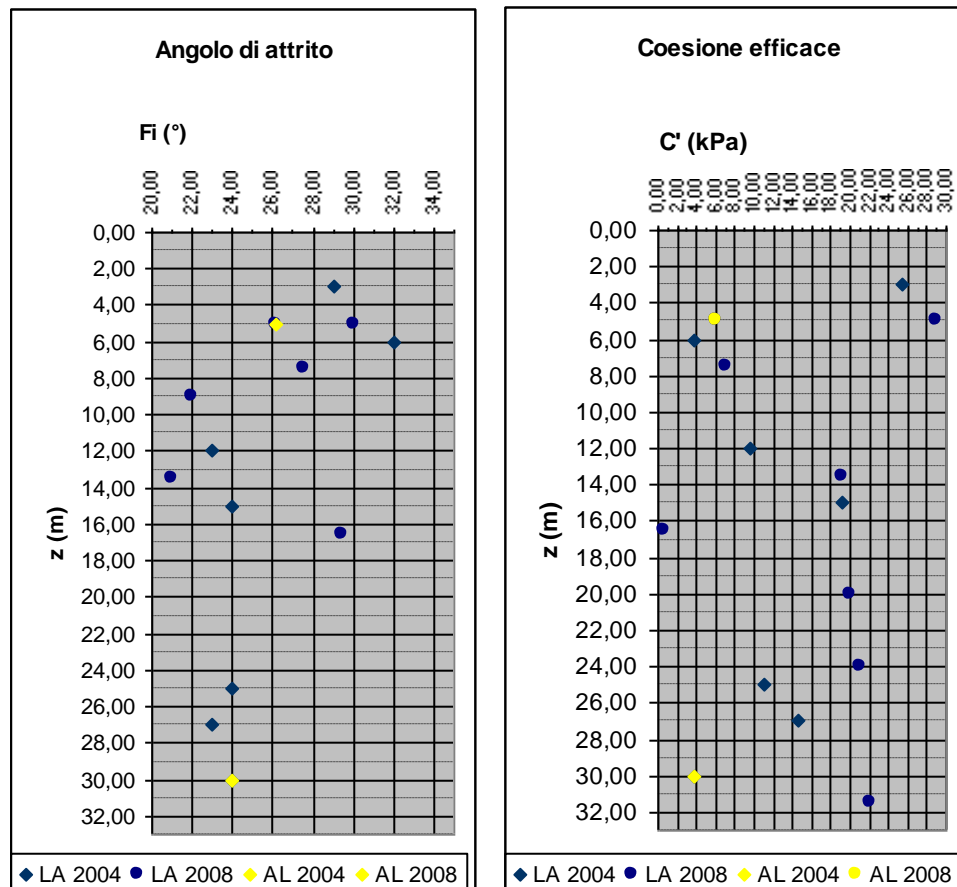
Nonostante una certa dispersione dei dati è comunque piuttosto chiaro un trend generale di incremento della resistenza con la profondità, in linea con un materiale normale consolidato. Valori superiori alla media sembrano poter essere attribuiti alle argille limose, che peraltro risultano essere più diffuse a partire dalla profondità di 18 – 20 m da p.c.

Nel corso dei sondaggi all'interno dei materiali fini sono state effettuate in maniera sistematica rilevazioni con pocket penetrometer e torvaine, con buona/ottima correlazione fra le due misure. E' possibile osservare una resistenza al pocket, in superficie, di circa 1 – 2 Kg/cm<sup>2</sup> (100 – 200 kPa) sino alla profondità di 4 – 6 m, ritenuti compatibili con i valori qui ottenuti dal Vane Test e con una crosta superficiale essiccata. Seguono misurazioni intorno a 0,5 – 1,0 Kg/cm<sup>2</sup> a circa 10 m, che si incrementano progressivamente verso il basso sino a 1,5 – 2,5 Kg/cm<sup>2</sup> alla profondità di circa 30 m da p.c.



Le figure seguenti riportano l'andamento dell'angolo d'attrito e coesione efficace. In questo caso la dispersione dei dati risulta maggiore; è possibile osservare valori più elevati di angolo di attrito (26 – 28°) sino alla profondità di 8,00 m, mentre la coesione efficace assume valore 28 – 30 kPa sino a 5,00 m da p.c. e fra 4 ed 8 kPa da 5,00 ad

8,00 m da p.c. Più in profondità l'angolo d'attrito medio è di 24° e la coesione variabile fra 10 – 20 kPa. Non si segnalano differenze apprezzabili fra LA ed AL



Per quanto attiene la deformabilità dei terreni sono state eseguite n° 5 prove edometriche durante la campagna del 2004 e n° 4 nel 2008. I relativi risultati, debitamente riepilogati in tabella, evidenziano in più casi valori di OCR inferiori all'unità ed incompatibili con la storia geologica del sedimento. Tale evidenza può essere imputata al grado di disturbo subito dal campione all'atto del prelievo e/o trasporto e/o conservazione e/o estrusione. I valori attendibili, e compatibili con i risultati delle prove penetrometriche, sono di poco superiori all'unità.

CAMPIONE	PROFONDITA'	PRESS, PRECONS.	$\sigma'v0$	OCR	k (cm/sec)	Cc
SP2-Sh3	24,30	62	205,4	0,30	2,25E-08	0,20
SP3-Sh3	9,30	252	85,4	2,95	8,65E-09	0,48
SP3-Sh7	25,20	92	212,6	0,43	3,08E-09	0,21
SP4-Sh2	9,30	128	85,4	1,50	9,23E-09	2,05
SP5/Pz-Sh8	30,30	166	253,4	0,66	2,18E-09	0,33
SP1-08-C11	5,50	45	73	0,62	6,50E-08	0,24
SP1-08-C15	21,00	222	200	1,11	5,15E-08	0,31
SP2-08-C12	14,00	123	140	0,88	5,20E-08	0,41
SP2-08-C14	20,50	218	200	1,09	2,20E-08	0,45

**Tabella 11. Prove edometriche**

Per quanto attiene le indagini del 2014, specificamente ubicate in corrispondenza del ponte di Finale di Rero, la figura 17 riporta l'andamento delle caratteristiche granulometriche e di plasticità dei campioni prelevati nella zona di progetto. La composizione granulometrica delle unità stratigrafiche è la seguente:

- L'unità I non è stata interessata dal prelievo di campioni.
- Unità II: sabbia 50-60%, limo 30-45%, argilla <10%;
- Unità III: sabbia <10%, limo 60-80%, argilla 20-40%;
- Unità IV: sabbia 50-80%, limo 20-30%, argilla <15%;

La frazione limosa è sempre presente in tutte le unità. La frazione sabbiosa è maggiormente presente nelle unità II e IV, contrariamente alla frazione argillosa che caratterizza maggiormente l'unità III.

I limiti di Atterberg, LL limite liquido e LP limite plastico, e il contenuto d'acqua naturale  $W_n$  sono riportati per l'unità III e per i livelli limo-argillosi più profondi. Per le unità II e IV, non sono stati determinati i limiti di Atterberg, ma solo il contenuto d'acqua naturale:

Unità II:  $W_n$  10-25%;

Unità III:  $W_n = 20-40%$ ,  $LL = 40-60%$ ,  $LP = 20-30%$ ,  $IP = 11-36%$ ;

Unità IV:  $W_n$  12-18%;

I suddetti valori indicano una condizione di normal consolidazione per l'unità II e di lieve sovra consolidazione per l'unità III.

La figura 18 riporta l'andamento del peso di volume e dell'indice dei vuoti in funzione della profondità di prelievo dei campioni nella zona di progetto.

In generale si ha un incremento del peso di volume con la profondità con conseguente riduzione dell'indice dei vuoti. Le unità stratigrafiche sono caratterizzate dai seguenti valori medi:

Unità II:  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ ,  $e_0 = 0.5-0.6$  (-);

Unità III:  $\gamma = 18-20 \text{ kN/m}^3$ ,  $e_0 = 0.6-1.3$  (-);

Unità IV:  $\gamma = 20 \text{ kN/m}^3$ ,  $e_0 = 0.4-0.6$  (-);

Nell'unità stratigrafica III, in accordo con quanto evidenziato dai valori di limiti di Atterberg e contenuto d'acqua, l'andamento di  $e_0$  indica una fascia sovra consolidata a profondità comprese tra 22-26 m dal p.c.

La resistenza a taglio non consolidata non drenata è stata determinata da prove in cella triassiale non consolidate non drenate eseguite su campioni indisturbati prelevati nei livelli più fini dei terreni di fondazione. L'andamento di  $c_u$  è riportato in figura 19 dove è indicato il profilo normal consolidato delle  $c_u$  definito tramite la correlazione

$$c_u = \alpha \sigma'_v$$

Il parametro  $\alpha$  è dedotto attraverso la relazione sperimentale di Skempton:

$$c_u / \sigma'_v = \alpha = 0.11 + 0.0037 \text{ IP}$$

Il valore IP medio per l'unità II è 20% a cui corrisponde un valore di  $\alpha = 0.18$

Oltre tale valore è indicato l'andamento normal consolidato di  $c_u$  con  $\alpha = 0.24$ .

Come si può notare dall'andamento con la profondità riportato in figura la curva  $\alpha = 0.24$  rappresenta un involuppo medio dei valori di  $c_u$  determinati in laboratorio, mentre la curva  $\alpha = 0.18$  può rappresentare un involuppo inferiore.

I valori di  $c_u$  sono stati definiti anche da correlazioni con i valori di resistenza alla punta nelle prove CPTE che confermano l'aumento di  $c_u$  con la profondità ed un valore medio per l'unità II di 48-50 MPa.

La resistenza a taglio drenata è stata determinata attraverso l'esecuzione di prove di taglio diretto con cella di Casagrande TD, eseguite prettamente nelle sabbie limose dell'Unità II. I risultati di laboratorio delle suddette prove dedotti dai certificati e riportati in figura 20 forniscono valori di  $c'$  non nulli compresi tra 15 e 36 kPa e valori di angolo d'attrito tra i  $32^\circ$  e  $35^\circ$ . Valori di coesione efficace come quelli riportati possono essere attribuiti, almeno in parte, a velocità di esecuzione delle prove di taglio diretto superiori a quella consentita dalla permeabilità delle frazioni più fini dei campioni. Tali

prove sono state quindi interpretate interpolando i risultati con valori di coesione nulla. I risultati vengono riportati in figura 51 ed evidenziano un andamento regolare con la profondità, con valori di  $\phi'$  compresi tra  $34^\circ$  e  $38^\circ$ . Tali risultati sono in accordo con quanto determinato attraverso le prove SPT.

Per quanto riguarda l'Unità III limo argillosa, in figura è stato inserito il risultato di una prova di taglio diretto eseguita su campione indisturbato durante la campagna d'indagine del 2004 che ha evidenziato  $c' = 18$  kPa e angolo d'attrito  $\phi' = 23^\circ$ .

Questi valori sono coerenti con le risultanze delle campagne d'indagine del 2004 e del 2008 su campioni della stessa Unità III, prelevati entro ed esternamente alle zone direttamente interessate dal progetto.



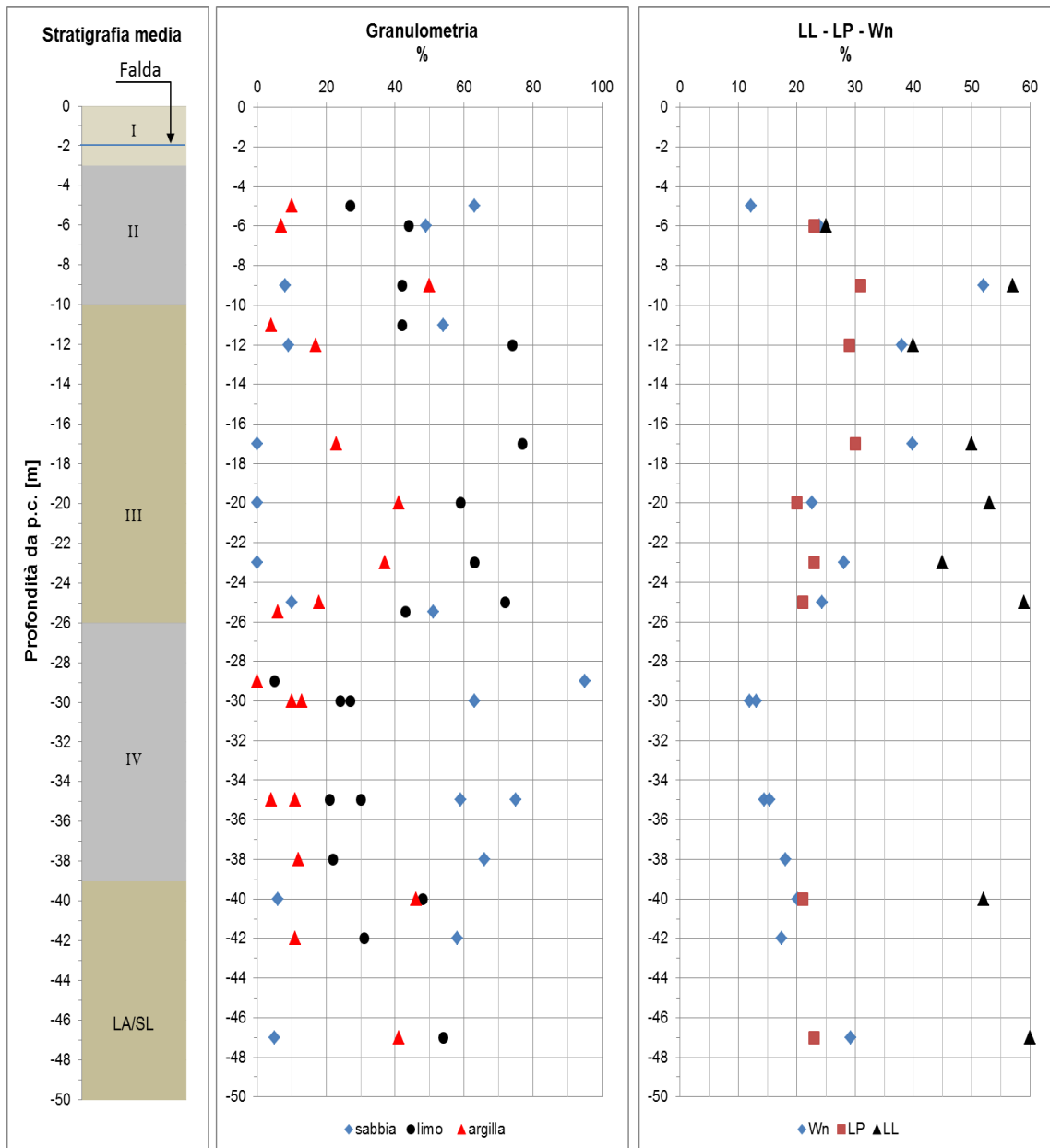


Figura 17 Indagini 2014. Granulometria e plasticità

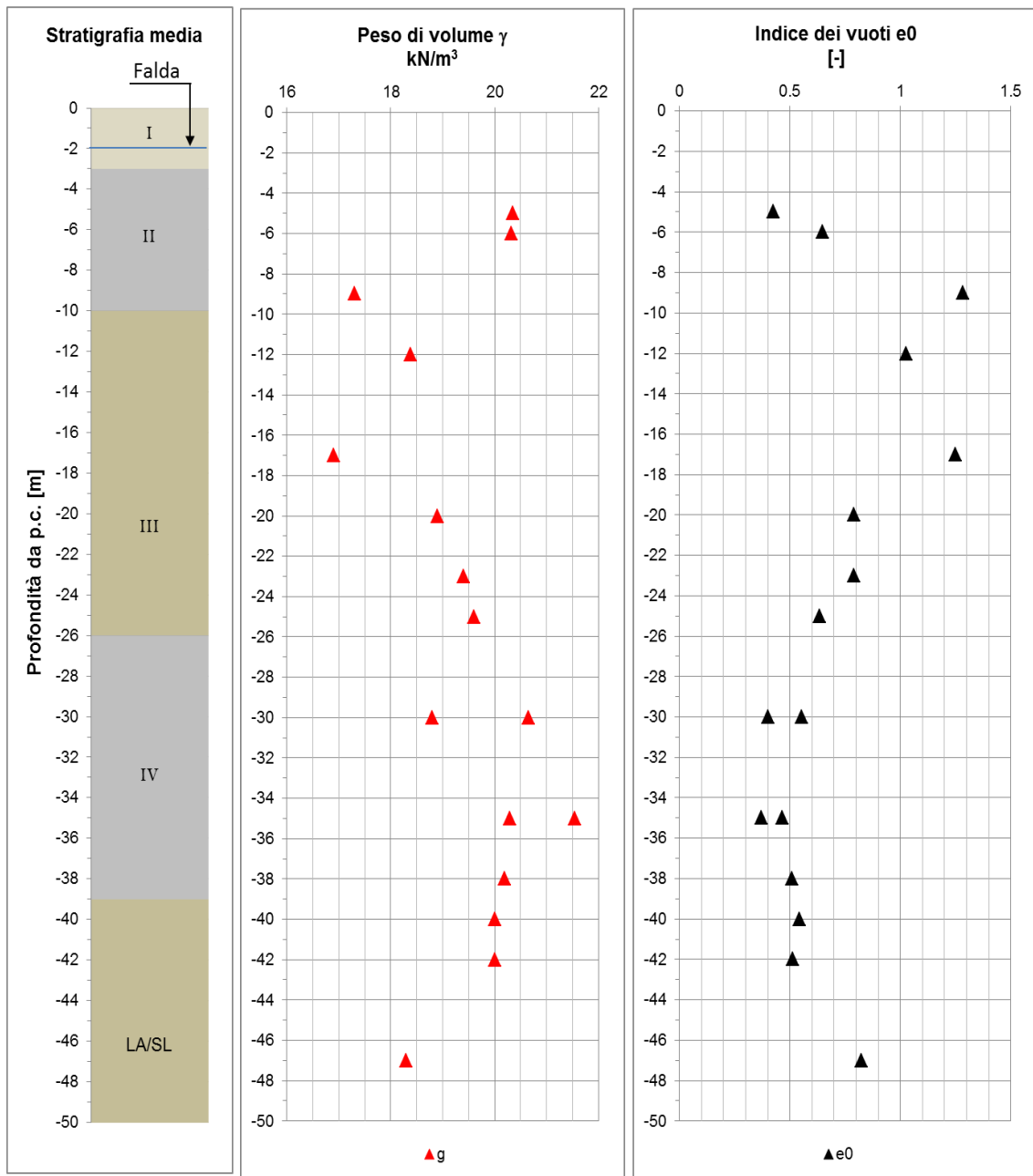
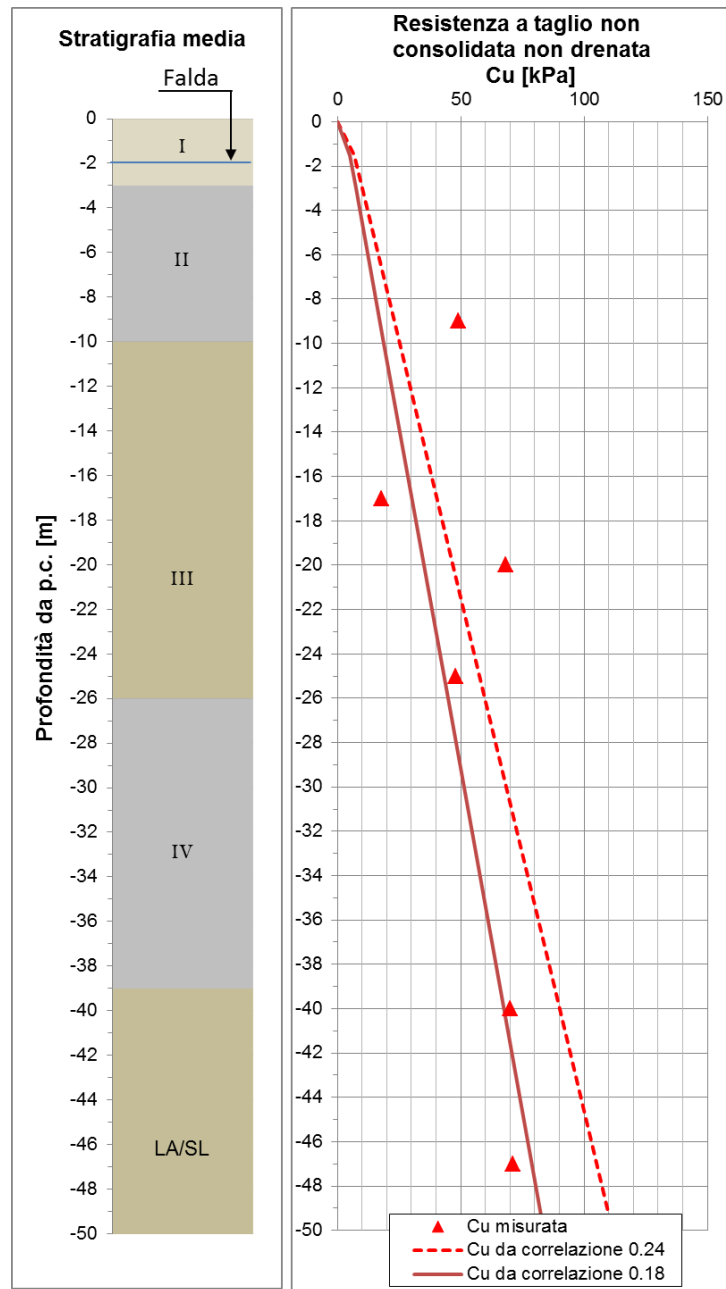
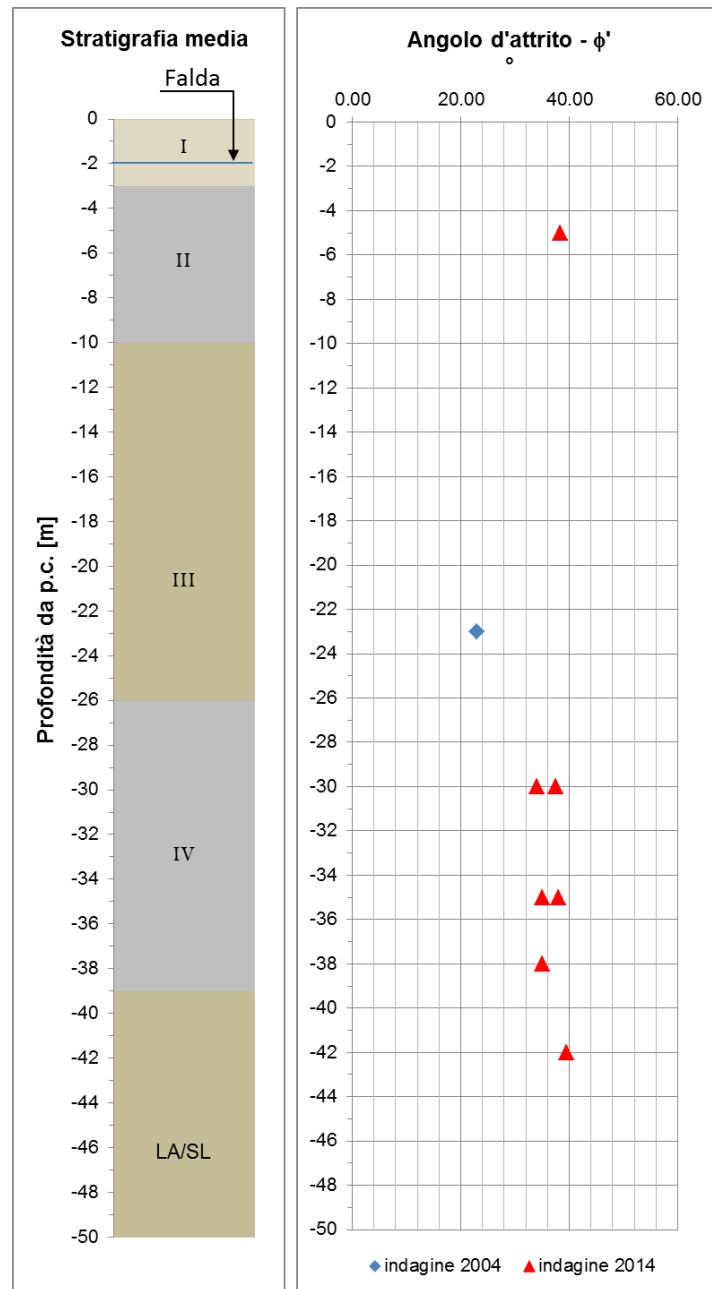


Figura 18 Indagini 2014 Peso di volume e indice dei vuoti



**Figura 19 Indagini 2014 Resistenza non consolidata e non drenata**



**Figura 20 Indagini 2014. Resistenza a taglio drenata**

## 7.1 SPT

La prova penetrometrica dinamica (SPT) è stata ideata negli Stati Uniti nel 1927, diffusa a livello internazionale da Terzaghi nel dopoguerra ed introdotta in Italia negli anni 60.

E' una delle prove più diffuse per la semplicità di esecuzione, per il modesto costo e per le numerose correlazioni disponibili tra i dati ricavati ed i parametri del terreno. Il campo di applicazione ideale è quello delle sabbie ma è valida anche per valutare la consistenza delle argille e delle rocce tenere.

La prova consiste nell'infiggere a percussione nel terreno un campionatore standard contando il numero di colpi (N1-N2-N3) necessario per un avanzamento di 15+15+15 cm.

La nomenclatura adottata è la seguente:

- numero di colpi per la penetrazione di 0,3 m ( $N_{SPT}$  (colpi/0,3 m))
- numero di colpi normalizzato ( $N_1$  (colpi/0,3 m))
- numero di colpi corrispondente al 60% dell'energia di battitura nominale ( $N_{60}$  (colpi/0,3 m))
- numero di colpi normalizzato ( $N_1$ ) ad una tensione verticale efficace di 100 kPa e corretta al 60% dell'energia nominale ( $(N_1)_{60}$  (colpi/0,3 m))
- dove:

**Errore. Non si possono creare oggetti dalla modifica di codici di campo.**

I dati acquisiti durante la prova consentono, mediante correlazioni empiriche ricavate dalla letteratura tecnica la cui validità è confermata a livello internazionale, la valutazione della resistenza al taglio e della compressibilità dei terreni.

Sono state effettuate verifiche con le esperienze di più autori al fine di avere un adeguato confronto fra i valori possibili.

Di notevole aiuto si sono dimostrate le analisi granulometriche condotte su campioni che hanno evidenziato, nelle diverse verticali d'indagine, la presenza di sabbie fini o medie con una percentuale di limo generalmente non inferiore al 20 – 30%. Solo occasionalmente (ed in particolare nel sondaggio SP5/Pz) sono state rilevate sabbie con frazione limosa molto esigua (1 – 2%).

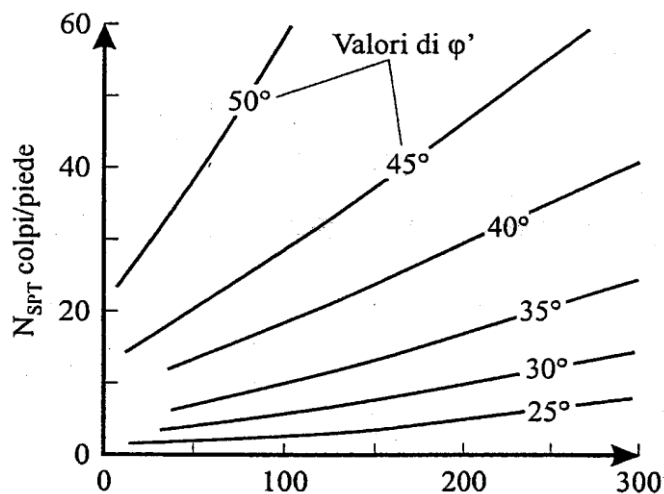
### Angolo di attrito ( $\phi$ ) da prove SPT

Per la valutazione dell'angolo si sono utilizzate le seguenti correlazioni:

$$\phi = f(N_{spt}, \sigma'_{vo}) \quad \text{Mitchell (1978)}$$

$$\phi = f(N'_{spt}) \quad \text{Shioi \& Fukuni (1982) - Road Bridge Specification}$$

Ove secondo Mitchell:



Mentre secondo Shioi & Fukuni:

$$\phi = \sqrt{15 \cdot N_{spt}} + 15$$

### Densità relativa ( $D_r$ ) da prove SPT

Per la valutazione della densità relativa si è utilizzata la seguente correlazione:

$$D_r = f(\sigma'_{vo}, N_{spt}) \quad \text{Meyerhof (1957)}$$

Ove:

$$D_r = 21 \sqrt{\frac{N_{spt}}{\sigma'_v}}$$

### Modulo elastico ( $E_{01}$ ) da prove SPT

Per la valutazione del Modulo elastico si è utilizzata la seguente correlazione:



$E_{01} = f(N_{spt})$  Burland & Burbidge (1985)

Ove:

$E_{01}$  (modulo di elasticità a 0,1% deformazione verticale) =  $\alpha N_{spt}$

essendo E in MPa mentre  $\alpha$  varia al variare di  $N_{SPT}$ .

Si riportano di seguito i valori di  $\alpha = f(N_{SPT})$   proposti da Burland e Burbidge.

N <sub>SPT</sub> (colpi/piede)	α
4	1,6 – 2,4
10	2,2 – 3,4
30	3,7 – 5,6
60	4,6 – 7,0

Per valori di  $N_{SPT}$  intermedi si procede con interpolazione lineare.

### Modulo edometrico (M<sub>o</sub>) da prove SPT

Per la valutazione del modulo edometrico si è utilizzata la seguente correlazione:

$M_o = f(N_{spt})$  Farrent

Ove in particolare:

$M_o = 7,1 \cdot N_{spt}$

### Modulo di taglio (G<sub>max</sub>) da prove SPT

Per la valutazione del modulo di taglio si è utilizzata la seguente correlazione:

$M_o = f(N_{spt} - età)$  Crespellani & Vannucchi

Ove:

$G_{max} = a \cdot (N_{SPT})^b$  in Mpa

per le sabbie dell'Olocene

a = 8.1      b = 0.611

per sabbie del Pleistocene:

a = 31.3      b = 0.526

### Velocità delle onde di taglio (Vs) da prove SPT

Per la valutazione della velocità delle onde di taglio si è utilizzata la seguente correlazione:

$V_s = f(N_{spt}, \text{litologia})$  Yoshida & Motonori (1988);

Ove:

$$V_s = \beta \cdot (N_{SPT})^{0,25} \cdot \sigma_{v0}'^{0,14}$$

B = 55 per qualunque terreno e 49 in sabbie fini.

### Interpretazione dei parametri

La figura 21 illustra i risultati dell'interpretazione dei parametri sopra elencati dedotti dalle prove SPT per le indagini del 2004 e 2008.

Constatata la sensibile variabilità dei risultati a seconda delle correlazioni proposte con i vari autori, per la determinazione dell'angolo d'attrito si è proposto il risultato ottenuto mediante sia la correlazione di Mitchell (figura 21) che di Shioi & Fukuni (1982 - Japanese National Railway) (figura 22). Si allega altresì in figura 23 il grafico relativo all'interpretazione secondo la correlazione di De Mello allegato alla documentazione relativa alle indagini geognostiche del 2008.

Il valore di  $N_{spt}$  aumenta con la profondità, mentre  $(N_1)_{60}$  (valore di  $N_{spt}$  normalizzato ad una tensione verticale efficace di 100 kPa) è costante con la profondità.

La densità relativa, con un valore medio del 60% si dimostra costante con la profondità, così come l'angolo d'attrito (correlazione di Mitchell e De Mello) che assume un valore medio di circa  $40^\circ$ , ben coerente con la correlazione di De Mello, mentre con la più cautelativa correlazione di Shioi & Fukuni si ha un valore medio di  $34^\circ$

Il modulo elastico aumenta con la profondità portandosi da circa 15 a 150 Mpa, così come il modulo di taglio posto fra 20 ed 80 Mpa.

La velocità delle onde sismiche di taglio è compresa fra 150 e 280 m/sec, con un valore medio sui 30 m ( $V_{s30}$ ) di 213 m/sec, compatibile con terreni di classe C.

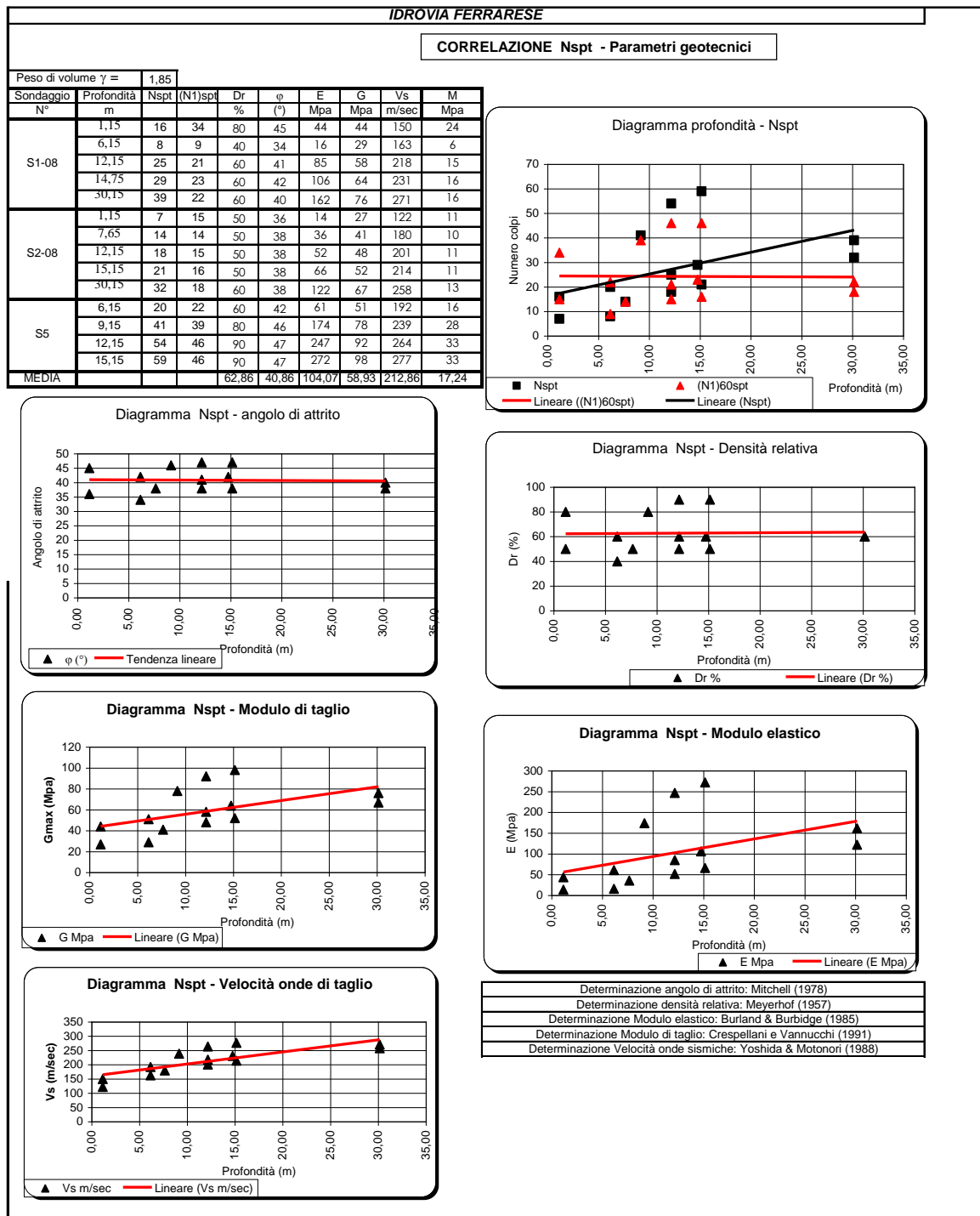


Figura 21. Interpretazione ed interpolazione lineare risultati prove SPT.

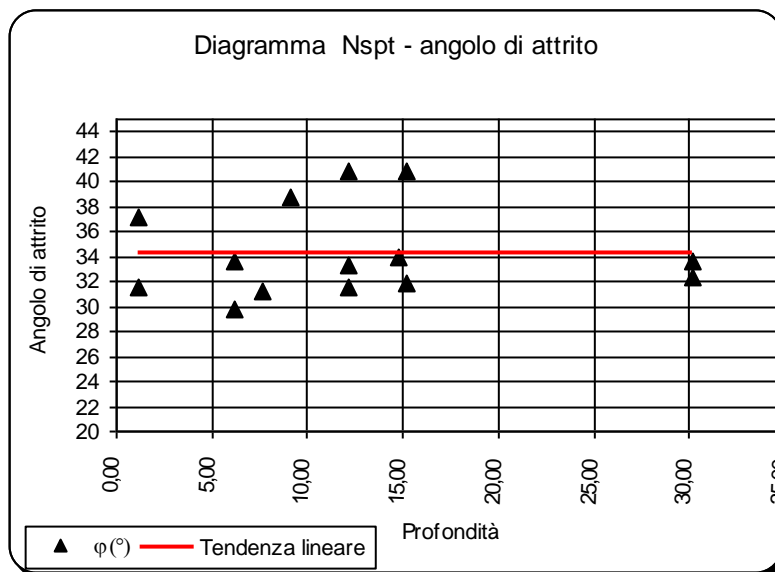


Figura 22. Interpretazione angolo di attrito – correlazione di Shioi & Fukuni

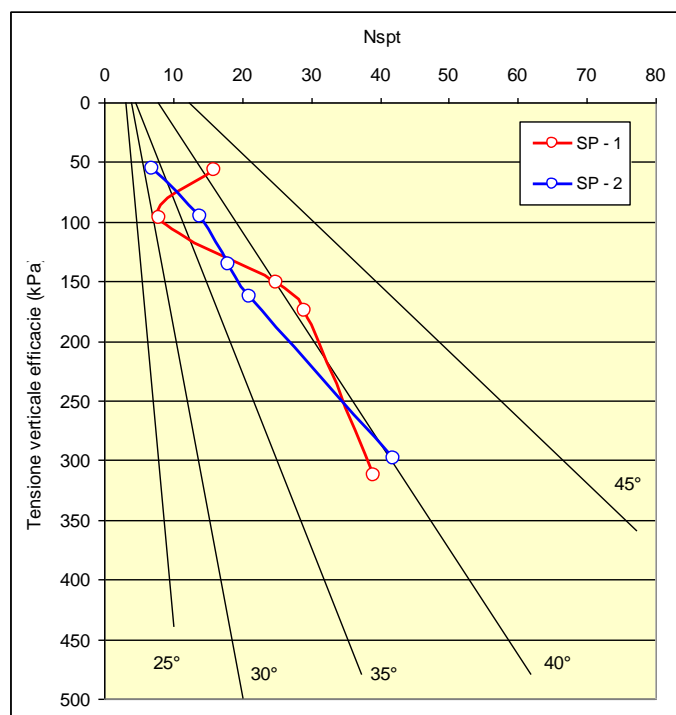


Figura 23. Interpretazione angolo di attrito – correlazione di De Mello (1971)

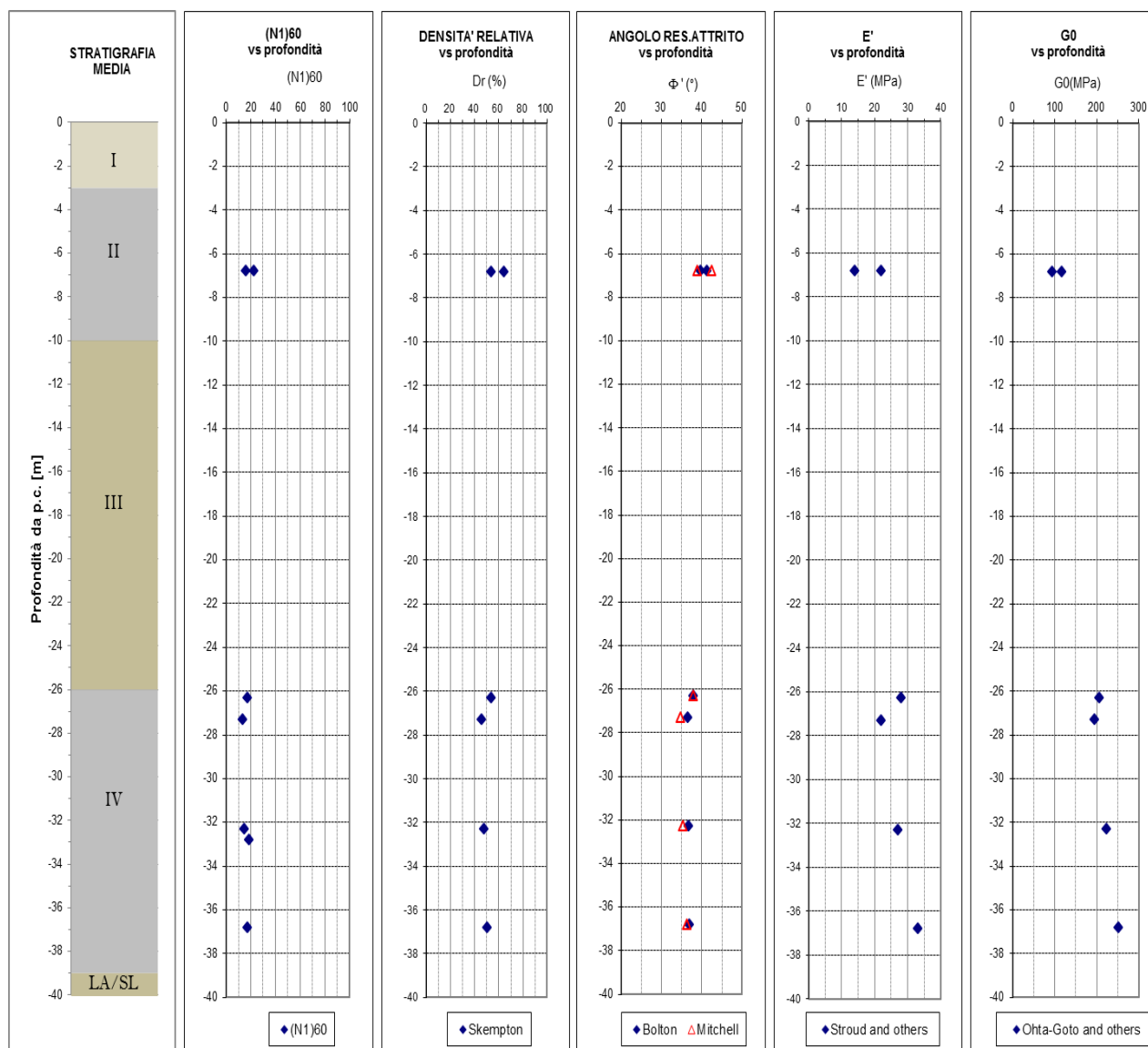
Nell'ambito della campagna d'indagine del 2014 sono state eseguite prove SPT nei fori di sondaggio S1/14 e S2/14 con l'intento di caratterizzare gli orizzonti di sabbie fini e sabbie limose che formano le unità II e IV. L'interpretazione delle prove eseguite è riportata in figura 54.

Come per le indagini precedenti dai grafici risultano caratteristiche poco influenzate dalla profondità di prova, quindi dello stato tensionale, eccezion fatta per il modulo di Young  $E$  ed il modulo di rigidezza a taglio per piccole deformazioni  $G_0$ , che presentano un leggero aumento con la profondità, del tutto conforme con un andamento classico dei moduli di rigidezza di terreni a grana grossa.

La densità relativa  $D_r$  è compresa tra 40 e 60%, con associato un angolo d'attrito  $\phi'$  compreso tra  $35^\circ$  e  $40^\circ$ .

Come detto i moduli di rigidezza  $E$  e  $G_0$  presentano un leggero aumento con la profondità, con:

- $E \div 10-20$  MPa e  $G_0 \div 100-150$  MPa per l'unità II,
- $E \div 20-30$  MPa e  $G_0 \div 200-250$  MPa per l'unità IV



**Figura 24 Interpretazione SPT campagna 2014**

## 7.2 Prove CPT

I valori della resistenza alla punta ( $q_c$  e  $q_t$ ), dell'attrito laterale ( $f_s$ ) e della pressione neutra ( $U$ ) misurati nel corso delle prove penetrometriche statiche elettriche (CPTE) o con piezocono (CPTU) sono serviti per la valutazione di una serie di parametri quali:

- **Natura litologica** ricavata sulla base delle classificazioni e grafici di Robertson e Ricceri utilizzando le seguenti terne di valori:

$$Q_t = \frac{qt - \sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}}$$

$$F_r = \frac{fs}{qt - \sigma_{v0}}$$

$$B_q = \frac{U - U_0}{qt - \sigma_{v0}}$$

Normalmente si registra un'ottima correlazione fra gli abachi proposti dai due autori. L'elaborazione è stata svolta disegnando, su due colonne distinte, le risultanze delle interpretazioni fornite dai due autori con anche, in affiancamento, i diagrammi della prova. Laddove si sono riscontrate differenze fra il dato fornito da Robertson e Ricceri ci si è fatti guidare proprio dall'andamento del grafico e dai parametri in esso rappresentati. In questi casi si è normalmente verificato come la soluzione di Robertson fosse la più appropriata.

- **Tensione verticale geostatica efficace  $\sigma'_{v0}$** : definita come la differenza tra la tensione verticale totale (pari a  $\gamma \cdot z$ , con  $z$  = profondità) e la pressione dell'acqua  $u$ . Il valore di questo parametro viene ricavato sulla base dei valori di  $\gamma'$ ;
- **Coesione non drenata  $C_u$** : determinata mediante la formula di Levadoux & Balign (1980) si basa sui valori di resistenza alla punta, tensione efficace e di un coefficiente  $N_k$  che varia a seconda del tipo di suolo.

$$C_u (a) = \frac{q_c - \sigma'_{v0}}{N_k} .$$

Il parametro  $N_k$  assume tipicamente valori minori di 15 per terreni normal consolidati, e superiori a 15 per terreni sovraconsolidati (in particolare  $N_k = 17 \pm 5$  per argille preconsolidate, e  $N_k = 10 \div 30$  per argille fessurate).

In base alla taratura fornita dai risultati delle diverse indagini ed in base alle esperienze acquisite in terreni analoghi per tipologia di deposizione, età e caratteristiche stratigrafiche, è stato adottato un valore di  $N_k = 15$ .

- **OCR (over consolidation ratio = grado di consolidazione)**: E' noto come l'andamento con la profondità dei parametri misurati mediante una prova pene-



trometrica possa fornire una valutazione della pressione di preconolidazione ( $\sigma'_p$ ) e pertanto del valore di OCR che, nei terreni coesivi, rappresenta il rapporto tra la massima pressione efficace mai sopportata dal terreno e l'attuale pressione geostatica efficace. Viene determinato sulla base della formula proposta da Cher a Mayne (1996) ove:

$$\frac{\sigma'_p}{p_a} = 0,86 \cdot \left( \frac{q_t - \sigma'_{v0}}{p_a} \right) \cdot (IP)^{-0,28}$$

$p_a$  è la pressione atmosferica ed IP (indice di plasticità) un dato di input assunto in questo caso pari al valore di 20.

Risulta infine:  $OCR = \frac{\sigma'_p}{\sigma'_{v0}}$

- **Densità relativa (%)**: tramite la formula proposta da Garizio (1997), Jamiolkosky (2001).

In prima analisi si calcola la:

$$\sigma'_{m0} = \frac{1 + 2k_0}{3} \cdot \sigma'_{va}$$

dove  $k_0$  è un dato di input e, se non definito come tale posto pari a 0,5.

$$DR_1 = -1,292 + 0,268 \ln \left[ q_c (\sigma'_{va})^{-0,5} \right]$$

Tramite la formula proposta da Baldi et al (1986), basata su ricerche sperimentali, si calcola la:

$$DR_2 = \frac{1}{C_2} \ln \left[ \frac{q_c}{C_0 (\sigma'_{m0})^{C_1}} \right]$$

Con  $C_0 - C_1$  e  $C_2$  costanti del terreno che nel caso valgono:

$$C_0 = 249,4 \quad C_1 = 0,46 \quad C_2 = 2,96$$

Infine DR (%) viene ricavato dalla media fra i due valori di DR sopra riportati.

- **Angolo di attrito efficace  $\Phi'$  (°)**: si utilizza per il calcolo la correlazione di Bolton, 1986 ove:

$$\Phi' = \Phi'_{cv} + m \cdot DI$$

$$DI = DR[Q - \ln(p'_f)] - 1$$

$\Phi'_{cv}$  = valore di input ricavato secondo le indicazioni di Stroud (1988) e Yound (1972) e, per sabbie con spigoli arrotondati, variabile da 33° se gradate a 30° se uniformi.

DR = densità relativa risultante dal calcolo sopra descritto.

$$Q = 10$$

$$m = 5$$

$$p'_f = f \sigma'_{v0}$$

- **Modulo di deformazione  $E_{01}$  (modulo di Young):** Il livello di deformazione pari allo 0,1% è ritenuto in letteratura (Battaglio e Jamialkosky 1987, Burland 1989) come il più rappresentativo dei livelli deformativi indotti nei terreni da strutture nell'ambito degli usuali coefficienti di sicurezza. Viene calcolato mediante la correlazione di Jamialkosky (1987) ove il valore di E è correlato alla resistenza alla punta da un fattore  $\alpha$  che varia a seconda che la sabbia sia normal consolidata o sovraconsolidata. Nel caso in studio si è assunto:

$$4 \cdot q_c \leq E_{01} \leq 6 \cdot q_c$$

Si sceglie di prendere il limite inferiore e pertanto  $\alpha = 4$ . L'unità di misura (Mpa) è la stessa scelta per  $q_c$ .

- **Modulo di taglio massimo  $G_{max}$ :** determinata mediante la formula di Rix e Stokoe (1992) secondo cui:

$$\frac{G_0}{q_c} = 290,6 \left[ \frac{q_c}{(\sigma'_{v0} p_a)^{0,5}} \right]^{0,75}$$

Anche in questo caso l'unità di misura è la stessa scelta per  $q_c$ .

- **Modulo confinato  $M_0$ :** viene correlato alla resistenza alla punta mediante l'equazione seguente, proposta da Mitchell & Gardner (1975):

$$M_o = \alpha q_c$$

Il coefficiente  $\alpha$  è tabellato da Sanglerat (1972) in funzione del tipo di terreno. Per argille e limi plastici con bassi valori di  $q_c$  si ha:  $2 < \alpha < 6$ .

Secondo la correlazione proposta da Lumne & Christophersen (1983) per valori di  $q_c < 10$  MPa si ha che

$$M_o = 4 * q_c$$

Pertanto sulla base di quanto sopra esposto si assume  $\alpha = 4$ .

L'elaborazione delle prove CPTU eseguite nel 2004 e 2008, per le quali si dispone dei file editabili con i dati acquisiti direttamente dallo strumento, sono riportate in forma grafica nelle tavole poste in allegato. Essa evidenzia come nelle diverse verticali indagate i parametri geotecnici di ogni unità litologica attraversata siano caratterizzati, a parità di litologia e profondità, da una certa omogeneità.

I valori di resistenza alla punta variano fra 1-3 Mpa nei terreni fini dell'unità III, si portano almeno intorno a 5 Mpa nelle sabbie e sabbie limose dell'unità II con punte > 10 Mpa negli strati più profondi dell'unità IV.

Nei terreni fini dell'unità III l'OCR è compreso fra 1 e 2, in linea con la storia geologica del deposito e sostanzialmente costante con la profondità, fatta eccezione per una crosta superficiale di 3-4 m nell'unità I che assume valori compresi fra 4 e 10. La  $C_u$  è compresa fra 25-40 kPa non o moderatamente crescente con la profondità.

Nei terreni granulari delle unità II e IV l'angolo d'attrito è compreso fra 35-40° ed il modulo elastico fra 10-40 Mpa . La densità relativa è compresa fra 40-60%.

### 7.3 Prove su pozzetti

Nel corso della campagna geognostica del 2008 in località Cà Dondi e Migliarino si sono eseguite prove di carico con piastra e determinazione della densità in sito.

I pozzetti sono profondi 1,5 m da p.c. ed interamente realizzati nei limi sabbiosi dell'unità I presente nei livelli superficiali.

Le prove di carico sono state organizzate su due cicli di carico e scarico ed i risultati sono riportati in tabella seguente.

Possiamo osservare un modulo più elevato alla profondità di 0,40 m rispetto che ad 1 m; si tratta in ogni caso di valori ritenuti adeguati visto e considerato che la maggior parte dei capitolati stradali richiede, per i piani di posa dei rilevati, un minimo di 15 Mpa. Inoltre al secondo ciclo di carico il modulo si incrementa, indice questo di terreni dotati di una struttura e che potranno essere costipati in corso d'opera con mezzi meccanici.

Pozzetto	Profondità (m)	Prova con piastra (*)		Densità in sito (mg/mc)
		MD1 (Mpa)	MD2 (Mpa)	
P1	0,40	31,91	75,00	
	0,90			1,89
	1,20	12,10	19,35	
P2	0,40	16,13	96,77	
	1,00			1,82
	1,30	8,70	21,90	
(*) Modulo calcolato fra gli intervalli 0,05 - 0,15 Mpa				

**Tabella 12. Prove di carico con piastra e densità in situ**

## 8 CARATTERIZZAZIONE GEOTECNICA DEI TERRENI

Le indagini eseguite in sito ed in laboratorio nelle diverse fasi temporali evidenziano un sostanziale accordo tra i risultati ottenuti.

Per l'areale di progetto e per il ponte di Finale di Rero si ritiene di poter fornire un modello stratigrafico e geotecnico unico per l'opera.

Il livello idrico della falda si pone attorno alla quota di 1,5 m slm in asse e nell'immediato intorno dell'idrovia, ed a circa 0,5-1 m slm allontanandosi da essa.

<b>Finale di Rero – Ponte sul Po di Volano – Stratigrafia di progetto</b>		
<b>Profondità (m da p.c.)</b>	<b>Unità (n°)</b>	<b>Descrizione</b>
0 / 2-3	I	(LS) Limo sabbioso a tratti argilloso
2-3 / 8-10	II	(SL) Sabbia fine e sabbia limosa
8-10 / 25-28	III	(LA) Limo argilloso e argilla limosa con presenza di orizzonti sabbiosi
25-28 / 50	IV	(SL) Sabbia fine con sottili intercalazioni limose, più evidenti e potenti a partire da 40 m

Le caratteristiche granulometriche dei terreni sono sempre piuttosto variabili in ragione delle caratteristiche deposizionali con, spesso, la presenza di sedimenti rappresentativi dell'intero campo dalle sabbie fino alle argille. Tendenzialmente sulla base delle analisi disponibili si riscontra, ai sensi della CNR UNI 10006:

- Unità I (LS): prevalenza di terreni A4 fino ad A6;
- Unità II (SL): terreni classificabili come A2.4 o A4 in funzione del contenuto di limo, con punte fino ad A1;
- Unità III (LA): terreni classificabili come A7 e subordinatamente A6;
- Unità IV (SL): terreni classificabili come A2.4 o A1 e subordinatamente A4; A6 o A7 per le intercalazioni.

La caratterizzazione di seguito riepilogata in tabella 13 sulla base del quadro informativo disponibile sostanzialmente conferma i parametri proposti nelle precedenti fasi progettuali, e quelli utilizzati per la progettazione e realizzazione del ponte provvisorio esistente (futura passerella pedonale). La simbologia adottata è la seguente:

- $\gamma$  (kN/m<sup>3</sup>) = peso di volume totale
- OCR (-) = grado di sovraconsolidazione
- $\phi'$  (°) = angolo di attrito di picco, in sforzi efficaci
- $c'$  (kPa) = coesione, in sforzi efficaci
- $E_{01}$  (MPa) = modulo di elasticità a 0,1% deformazione verticale
- $G_{max}$  (MPa) = modulo di elasticità tangenziale iniziale (deformazione 10E-6)
- $\nu$  (-) = coefficiente di Poisson
- $K_o$  (-) = coefficiente di spinta a riposo

Per i livelli coesivi:

- IP(-) = indice di plasticità
- $C_v$  (m<sup>2</sup>/s) = coefficiente di consolidazione verticale
- $C_u$  (kPa) = resistenza al taglio non drenata non consolidata
- CR (-) = indice di compressione edometrico
- RR (-) = indice di ricomprensione edometrico
- $c\alpha$  (m<sup>2</sup>/s) = coefficiente di consolidazione secondaria
- M (MPa) = modulo edometrico di ricomprensione
- K = coefficiente di permeabilità

Per i soli livelli granulari:

- DR (%) = densità relativa =  $(e_{max}-e_o)/(e_{max}-e_{min})$

Unità	Sigla	$\gamma$ (kN/mc)	IP	OCR	DR(%)	K (m/s)	$C_v$ (mq/s)	$C_u$ (kPa)	$C'$ (kPa)	$\Phi$ (°)
I	LS	18,5			40				0-5	28
II	SL	18,5			40					34
III	LA	19	20-30	1		1,00E-06	4,00E-06	45	10	25
IV	SL	18,5			50					34

Unità	Sigla	E01 (Mpa)	Gmax (Mpa)	CR	C $\alpha$ r (%)	M (Mpa)	v	ko
I	LS	2	10				0,3	0,5
II	SL	10	40				0,3	0,45
III	LA	3	15	0,11	0,0015	4	0,35	0,5
IV	SL	20	80				0,3	0,45

**Tabella 13 Caratterizzazione geotecnica dei terreni**

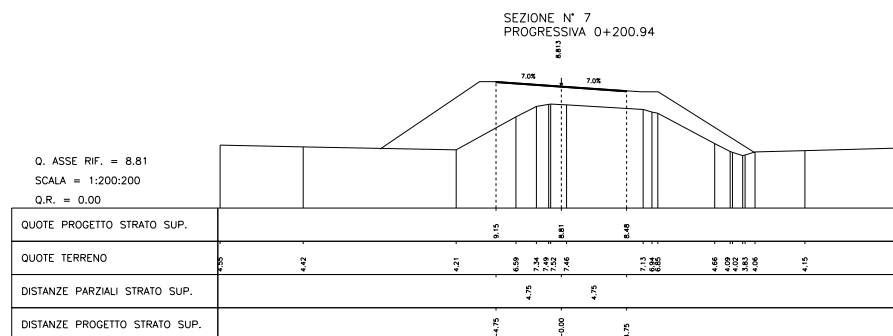


## 9 PONTI SULL'IDROVIA E RILEVATI DI APPROCCIO

Per quanto attiene il tratto di competenza del primo stralcio si prevede la demolizione, e successiva ricostruzione, in sede, del ponte di Final di Rero. L'opera è parallela al ponte provvisorio già realizzato nell'ambito di altro appalto, rispetto al quale si trova 80 m più a monte.

Le caratteristiche dei terreni presenti in relazione alla tipologia di opere hanno reso necessaria la previsione di fondazioni indirette su pali trivellati di grande diametro. I pali verranno realizzati in presenza di falda su terreni marcatamente instabili, laddove tutti i sondaggi eseguiti in fase d'indagine hanno richiesto l'adozione del rivestimento metallico. Sarà pertanto necessario prevedere il sostegno del foro mediante lamierino metallico o utilizzo di fango bentonitico.

Per il ponte di Final di Rero si prevede anche un allargamento, con modesto incremento di altezza, per il rilevato di approccio in sponda destra, ed il recupero e riutilizzo dell'esistente per quello in sinistra. Il rilevato esistente in destra ha altezza massima pari a 3,20 m. da p.c. mentre con il nuovo incremento di quota sarà portato ad un'altezza in mezzzeria di circa 4,10 m (4,4 m sullo spigolo). Per ridurre gli ingombri e gli espropri parte del rilevato è sostenuto da un muro di sottoscampa in c.a.



**Figura 25. Final di Rero. Rilevato di approccio al ponte. Sezione trasversale di massima altezza in destra idrografica**

### 10.1. Scotico, bonifica e piani di posa

Le prove di carico con piastra dimostrano come la resistenza degli strati superficiali non sia inferiore (se non spesso addirittura superiore) a quella degli strati più profondi. In tale contesto lo scotico e bonifica sarà limitato alla coltre di terreno vegetale.

In questa sede si prevede pertanto un valore di scotico pari a 20 cm (valore comunemente assunto nei capitolati) ed una ulteriore bonifica di 20 cm. Ulteriori approfondimenti potranno essere finalizzati alla completa asportazione di una coltre vegetale avente spessore maggiore, o al raggiungimento di un piano di posa a maggiore portanza. Successivamente si provvederà nell'ordine alla:

- posa di un geotessile tessuto di separazione e rinforzo ad elevato modulo con resistenza a trazione non inferiore a  $R > 100 \text{ KN/m}$ ;
- posa di materiale da rilevato sino a colmare interamente lo spessore di scotico e bonifica, avendo l'accortezza di sagomare la parte superiore a schiena d'asino con pendenza non inferiore al 3,5%;
- posa di anticapillare spessore 30 cm realizzato con doppio strato di geotessile non tessuto di separazione a formare una tasca riempita con misto granulare avente fuso 4 – 40 cm.

Laddove è necessario allargare (ed innalzare) il rilevato esistente, al fine di assicurare un perfetto collegamento fra le due parti dovrà essere eseguita una gradonatura delle scarpate esterne del rilevato esistente. Con questa operazione si avrà cura di asportare totalmente la coltre vegetale e gli apparati radicali spintisi a maggiore profondità. I singoli gradoni dovranno avere una debole contropendenza verso il centro del rilevato. Sul piano di sedime dell'area ove ricade la parte in allargamento sarà eseguito uno scotico + bonifica di 40 cm (eventualmente incrementato sino alla totale asportazione della coltre vegetale). Successivamente si procederà come nel caso precedente prevedendo una rullatura, geotessile di rinforzo, materiale da rilevato, anticapillare avvolto da una calza in geotessuto, ed infine stesa per strati successivi del rilevato vero e proprio.

### 10.2. Valutazione dei cedimenti

Il terreno di sedime del rilevato stradale di approccio al ponte è rappresentato da un'alternanza di sabbie più o meno limose e limi argillosi che si spingono da p.c. sino a circa 25 m da p.c., dove si riscontra un potente strato sabbioso che si estende sino alle massime profondità indagate.

I cedimenti totali vengono calcolati come aliquote di tre parti:

$$S_{tot} = S_{ist} + S_{con} + S_{sec}$$

Dove rispettivamente  $S_{ist}$  è il cedimento elastico,  $S_{con}$  è il cedimento di consolidazione,  $S_{sec}$  è il cedimento secondario.

### **Cedimento istantaneo ( $S_{ist}$ )**

La valutazione di questa aliquota di cedimento è proposta tramite la formula di Giroud (1973) dove il cedimento del punto M a distanza x dall'asse di simmetria del rilevato si calcola attraverso la:

$$S_i = \frac{\gamma h}{E_u} \left( \frac{a^2}{a - a'} \right) [r_H - \left( \frac{a'}{a} \right)^2 r'_H]$$

Dove:

a, a' ed h sono parametri geometrici (si veda figura 26);

$\gamma$  è il peso di volume del rilevato arginale

$E_u$  rappresenta il modulo elastico non drenato del terreno di fondazione

$r_H$  e  $r'_H$  sono parametri di influenza ricavati dall'abaco di Giroud (si veda figura 27)

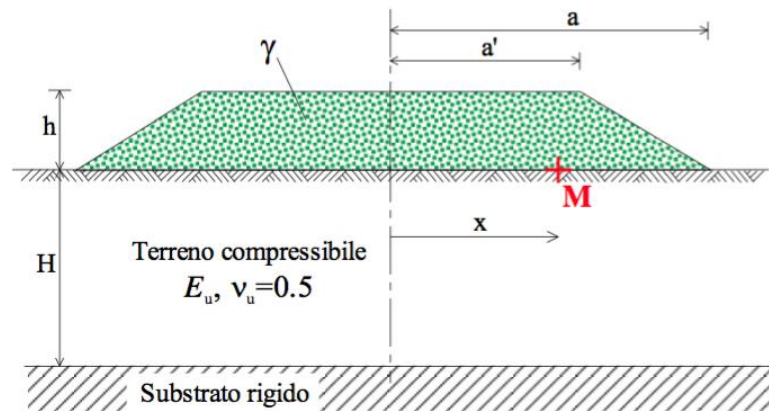


Figura 26: Parametri geometrici di un rilevato arginale - Giroud (1973)

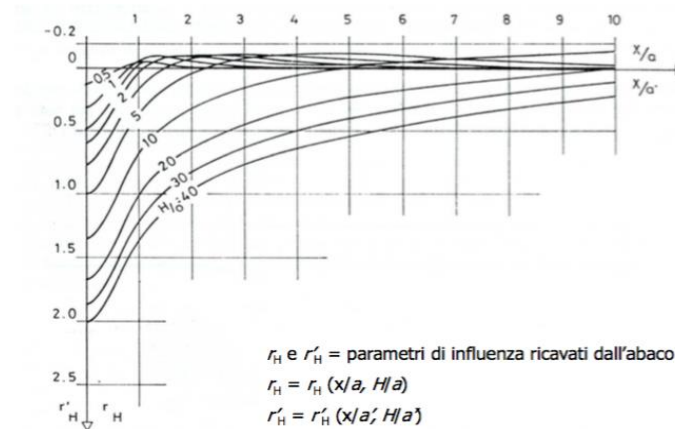


Figura 27: Abaco di Giroud – parametri di influenza

### Cedimento di consolidazione ( $S_{con}$ )

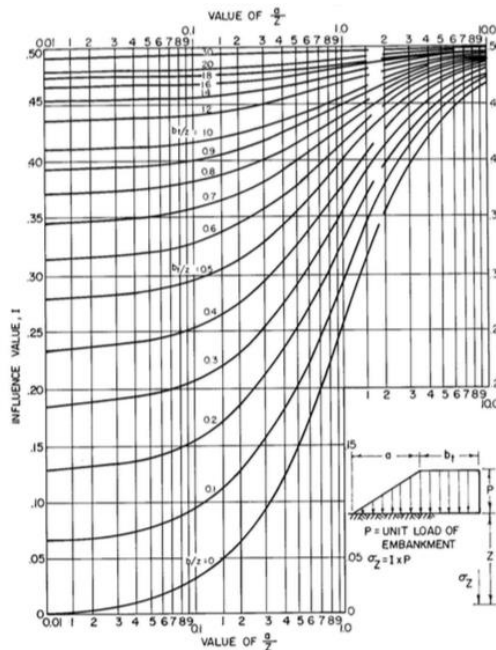
Nei materiali coesivi lo si può identificare come un fenomeno che dura nel tempo e solo parzialmente recuperabile. Le pressioni interstiziali indotte dal carico innescano un processo di consolidazione durante il quale si riducono i vuoti nel terreno, si hanno quindi deformazioni volumetriche e cedimenti (verticali) che accrescono nel tempo fino alla completa dissipazione delle sovrappressioni interstiziali.

Si tiene conto degli incrementi di tensione fino a quando  $\Delta\sigma \leq 0.1 \sigma'v$ .

Per il calcolo dell'incremento di pressione si utilizza la seguente relazione proposta da Boussinesq:

$$\Delta\sigma = 2q \cdot I$$

Dove q rappresenta il carico del rilevato ed I il coefficiente di influenza calcolato tramite l'abaco mostrato in figura 28.



**Figura 28: Abaco coefficiente di influenza I con carico a distribuzione trapezoidale – NAVFAC (1982)**

Una volta individuato lo strato comprimibile H si applica il metodo edometrico per determinare i cedimenti di consolidazione.

Nel caso in esame per gli strati coesivi di unità I e III si è utilizzata la seguente formula:

$$S_c = \frac{H}{1+e_0} * c_r * \left( \log_{10} \left( \frac{\sigma'_v + \Delta\sigma}{\sigma'_v} \right) \right) \quad \text{valida per } \sigma'_c > \sigma'_v + \Delta\sigma$$

Dove:

H= Spessore strato compressibile

$c_r$ = Indice di ricomprensione

$e_0$  = Indice dei vuoti in sito;

$\sigma'_c$  = pressione di consolidazione;

$\sigma'v$  = tensione verticale efficace;

$\Delta\sigma v$  = Incremento di tensione al piano medio.

Poiché il terreno sottostante la fondazione non è confinato lateralmente, l'incremento di pressione interstiziale all'istante di applicazione del carico, in condizioni drenate, è diverso e in genere inferiore all'incremento di tensione verticale totale. Poiché le deformazioni per consolidazione sono dovute alla riduzione di volume derivante dal dissiparsi delle pressioni interstiziali, ne consegue che le deformazioni reali di consolidazione sono inferiori a quelle calcolate col metodo appena descritto. Skempton e Bjerrum suggeriscono di stimare il cedimento correggendo il valore ottenuto tramite un fattore  $\mu$ . In questa trattazione si è adottato un fattore  $\mu$  pari a 0.8.

### **Cedimento secondario ( $S_{sec}$ )**

A termine della consolidazione primaria si possono avere ulteriori deformazioni e quindi cedimenti per viscosità dello scheletro solido.

I cedimenti secondari si ricavano attraverso la formula:

$$S_{sec} = \frac{H}{1 + e_0} * C_{\alpha} * \log\left(\frac{tc + \Delta t}{tc}\right)$$

Dove:

$C_{\alpha}$  = coefficiente di consolidazione secondaria

$tc$  = tempo di fine consolidazione primaria

$\Delta t$  = intervallo di tempo dalla fine della consolidazione primaria (solitamente Vita utile dell'opera di riferimento)

Mesri suggerisce i seguenti valori di coefficiente di consolidazione secondaria:

Terreno	$C_{\alpha}/C_c$
Argille tenere organiche	0,05 ± 0,01
Argille tenere inorganiche	0,04 ± 0,01
Sabbie	da 0,015 a 0,03

**Tabella 14: Valori suggeriti da Mesri per il coefficiente di consolidazione secondaria.**

### CEDIMENTI ATTESI

Nel calcolo del cedimento si è considerato un modello stratigrafico così costituito:

- Unità I limoso sabbiosa, spessore 2 m;
- Unità II sabbioso limosa, spessore 8 m;
- Unità III limoso argillosa, spessore 15 m.

Il contributo al cedimento delle sottostanti sabbie dell'unità IV, con tetto posto a profondità di 25 m da p.c., viene considerato trascurabile.

I cedimenti sono calcolati in asse al rilevato con le seguenti assunzioni:

Modulo: unità I = 2 Mpa, unità II = 10 Mpa; unità III = 4 MPa ;

Geometria rilevato : h=4,4m; a=25 m; a'=12 m.

$e_0$  strato I = 0,75 e strato III = 0,70;

$C_c$  strato I = 0,224 e strato III = 0,25

$C_r=0,11$

$C_{\alpha}$  strato I = 0,0069 e strato III =0,0015

$\mu = 0,8$

Svolgendo i calcoli complessivamente l'aliquota del cedimento istantaneo  $S_{ist}$  risulta pari a 12,9cm, quella del cedimento di consolidazione primaria  $S_{con}$  di 8,3 cm e infine quella del cedimento di consolidazione secondario  $S_{sec}$  riferito ad una vita utile di 50 anni risulta pari a 3,1 cm

Il cedimento totale  $S_{tot}$  è stimato in circa 24,3 cm.

Va considerato che nella realtà si tratta di un allargamento e modesto incremento di altezza di un rilevato esistente, l'incremento di carico in fondazione sarà minore di quello



ipotizzato, e quindi il cedimento calcolato può ritenersi un valore di riferimento cautelativo e sovrastimato.

Quello che risulta importante definire è l'evoluzione del cedimento nel tempo e la sua compatibilità con i lavori. Il tempo di consolidazione è dominato dallo strato III coesivo per il quale risulta:

$$t = T_v H^2 / C_v$$

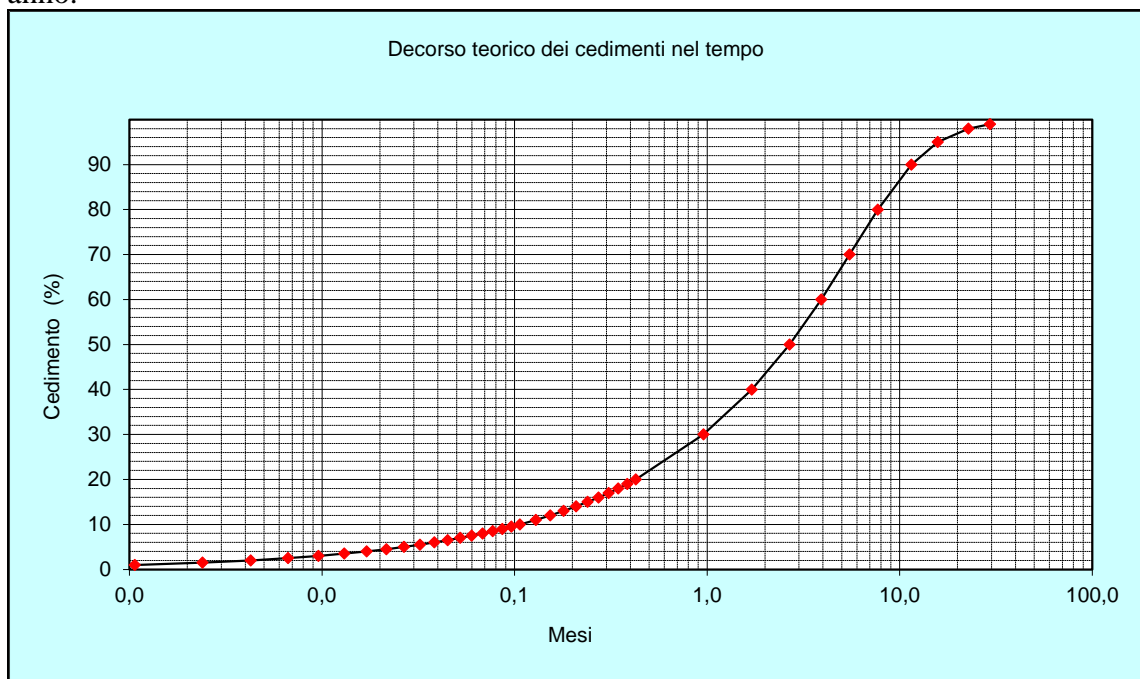
dove:

H = 7,5 m (drenaggio al tetto ed al letto);

$T_v = 0.848$

$C_v = 4 \text{ E}^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Da cui risulta il raggiungimento di un grado di consolidamento del 90% nell'arco di un anno.



**Figura 29. Andamento dei cedimenti nel tempo**

L'esaurimento dei cedimenti è compatibile con l'esecuzione dei lavori.

Si prescrive comunque che i rilevati di approccio al ponte siano realizzati preliminarmente a qualsiasi altra lavorazione, in maniera tale da garantire le tempistiche di esaurimento dei cedimenti prima della posa della pavimentazione stradale definitiva.

### 10.3. Verifiche di stabilità

Secondo le indicazioni contenute nelle NTC 2018 (par. 2.3) le verifiche di sicurezza agli stati limite ultimi (SLU) devono soddisfare la seguente condizione:

$$Ed \leq Rd$$

essendo  $E_d$  il valore di progetto dell'azione o degli effetti delle azioni ed  $R_d$  il valore di progetto della resistenza del terreno.

Rimandando alle NTC 2018 per un maggiore grado di dettaglio le verifiche allo SLU ai sensi del paragrafo 6.8 vengono condotte secondo l'approccio 1, Combinazione 2 (A2+M2+R2) tenuto conto dei valori dei coefficienti parziali di cui alle tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.8.I delle NTC, riportate nelle seguenti tabelle 15, 16 e 17 valide rispettivamente per le azioni permanenti e variabili (A), per i parametri del terreno (M) e per le resistenze (R).

**Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni**

	Effetto	Coefficiente Parziale $\gamma_F$ (o $\gamma_E$ )	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti $G_1$	Favorevole	$\gamma_{G1}$	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	$\gamma_{G2}$	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	$\gamma_Q$	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

<sup>(1)</sup> Per i carichi permanenti  $G_2$  si applica quanto indicato alla Tabella 2.6.I. Per la spinta delle terre si fa riferimento ai coefficienti  $\gamma_{G1}$

**Tabella 15 Verifiche a SLU. Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni (A).**

**Tab. 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno**

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale $\gamma_M$	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1,0	1,25
Coesione efficace	$c'_k$	$\gamma_c$	1,0	1,25
Resistenza non drenata	$c_{uk}$	$\gamma_{cu}$	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	$\gamma_\gamma$	$\gamma_\gamma$	1,0	1,0

**Tabella 16 Verifiche a SLU. Coefficienti parziali per i parametri del terreno (M).**

**Tab. 6.8.I - Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo**

COEFFICIENTE	R2
$\gamma_R$	1,1

**Tabella 17 Verifiche a SLU. Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere in materiali sciolti e fronti di scavo (R).**

Nel seguente prospetto di tabella 18 sono sintetizzati i parametri geotecnici caratteristici (pedice k) e di progetto (pedice d - relativi all'applicazione del coefficiente M2) del sottosuolo, dei materiali costituenti i rilevati stradali di approccio al viadotto e delle protezioni di sponda da mettere in opera lungo l'idrovia.

I rilevati stradali saranno realizzati con materiale arido classificabile come A1 – A2.4 – A2.5 compattato al 90%-95% della densità massima Proctor standard. Ad esso può essere attribuito un angolo d'attrito variabile  $\Phi'$  da 35° a 40°; come già nelle precedenti fasi progettuali si attribuisce 37°. Alla porzione di rilevato già esistente si attribuisce  $\Phi' = 40$  che comunque, come si evince dalla geometria delle superfici di scivolamento, non ha sostanziale influenza sulla stabilità.

Le protezioni di sponda lungo l'idrovia saranno realizzate con pietrame di natura calcarea o dolomitica di spessore 0,5 m (1 m al piede dell'argine) avente pezzatura 20-100 Kg. Come parametri sulla base anche dell'esperienza acquisita in lavori analoghi in ambito fluviale e portuale si attribuisce peso di volume 26 kN/mc, angolo d'attrito  $\Phi' = 43^\circ$  e  $c' = 2$  kPa.

Sia per i rilevati che per le protezioni di sponda a vantaggio di sicurezza si trascura il contributo fornito dal geotessile e, nei rilevati, dallo spessore di bonifica.

<b>MATERIALE</b>	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	c'k (kpA)	$\Phi'$ k (°)	c'd (kpA)	$\Phi'$ d (°)
Rilevato nuovo	19	0	37	0	31,1
Rilevato esistente	19	0	40	0	33,8
Protezione di sponda	26	2	43	1,2	36,7
Unità I (LS)	18,5	5	28	4	23
Unità II (S)	18,5	0	34	0	28,4

**Tabella 18. Analisi di stabilità. Parametri geotecnici caratteristici e di progetto**

Le successive analisi di stabilità rientrano in verifiche allo SLU; le azioni variabili sono rappresentate dal solo sovraccarico sul rilevato stradale e sul margine dell'idrovia, per il quale si è assunta una pressione pari a:

$$20 \times 13 = 26 \text{ kPa (caso statico)}$$

$$20 \text{ kPa (caso sismico)}$$

Sempre a vantaggio di sicurezza si considera una simultaneità di sisma e sovraccarico. La verifica del sistema geotecnico sotto l'effetto dell'azione sismica viene eseguita con riferimento ai contenuti del capitolo 7 delle NTC 2018, ed in particolare al paragrafo 7.11.4, che per fronti di scavo e rilevati precisa l'impiego del medesimo approccio di cui al paragrafo 6.8.2 per opere in materiali sciolti ponendo pari all'unità i parametri per le azioni e sui parametri geotecnici, ed impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale  $\gamma_r = 1,2$ .

I coefficienti sismici sono stati assunti pari a

$$K_h = 0,0635;$$

$$k_v = 0,0317$$

come illustrato nel capitolo relativo alla sismicità della Relazione Geologica, geomorfologica idrogeologica e sismica e sono relativi a:

- periodo di riferimento  $VR = 50$  anni;
- $ag = 0,117$  nella condizione di SLV;

- categoria di suolo di fondazione tipo C;
- categoria topografica T1.

Le verifiche sono state eseguite con il programma Slide2 della Rocscience (Toronto – Canada) secondo il metodo di Bishop e Janbu ricercando le superfici maggiormente critiche ed al contempo escludendo quelle pellicolari in quanto poco significative.

Di seguito sono descritti i risultati ottenuti dai calcoli. Come si può osservare tutte le verifiche forniscono valori superiori al minimo di normativa ( $F_s = 1,1$  in condizioni statiche e  $F_s = 1,2$  in condizioni sismiche).

### **Rilevato di appoggio al Ponte di Final di Rero**

In fase di progettazione esecutiva si è reso necessario contenere il rilevato stradale, specie nelle tratte di maggiore altezza, mediante l'introduzione di muri in c.a. per ridurre gli ingombri del rilevato arginale e conseguentemente gli espropri. Le tratte prive di muri di contenimento sono quelle di minore altezza. Nel caso specifico viene proposta la verifica in corrispondenza della sezione n° 11 alla pk 0+285 che, fra quelle prive di opere di sostegno, risulta essere la più rappresentativa.

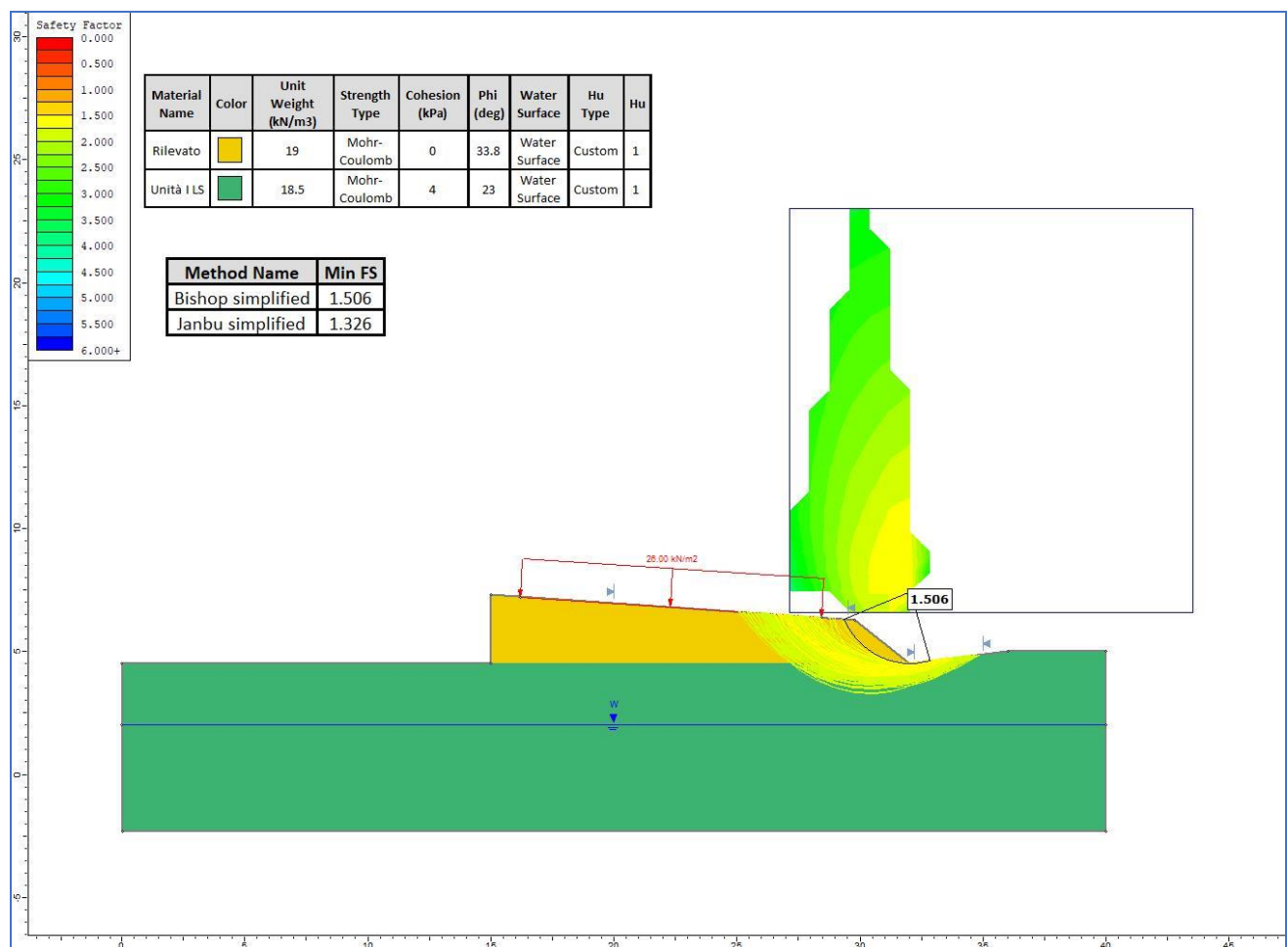
Dal punto di vista geolitologico e geotecnico in quest'area sono disponibili numerose verticali d'indagine che riscontrano uno strato limoso sabbioso (unità I) di spessore non inferiore a 2,00 – 2,50 m cui seguono sabbie e sabbie limose (unità II) non coinvolte dalle superfici di scivolamento.

La falda è stata riscontrata alla profondità di 4,90 m da p.c. nel corso della perforazione del sondaggio (piezometro SP1-08 posto poco più a monte) ma in ogni caso dato che le superfici di scivolamento si sviluppano in buona parte nel corpo del rilevato la sua posizione non ha particolare influenza sull'esito della verifica.

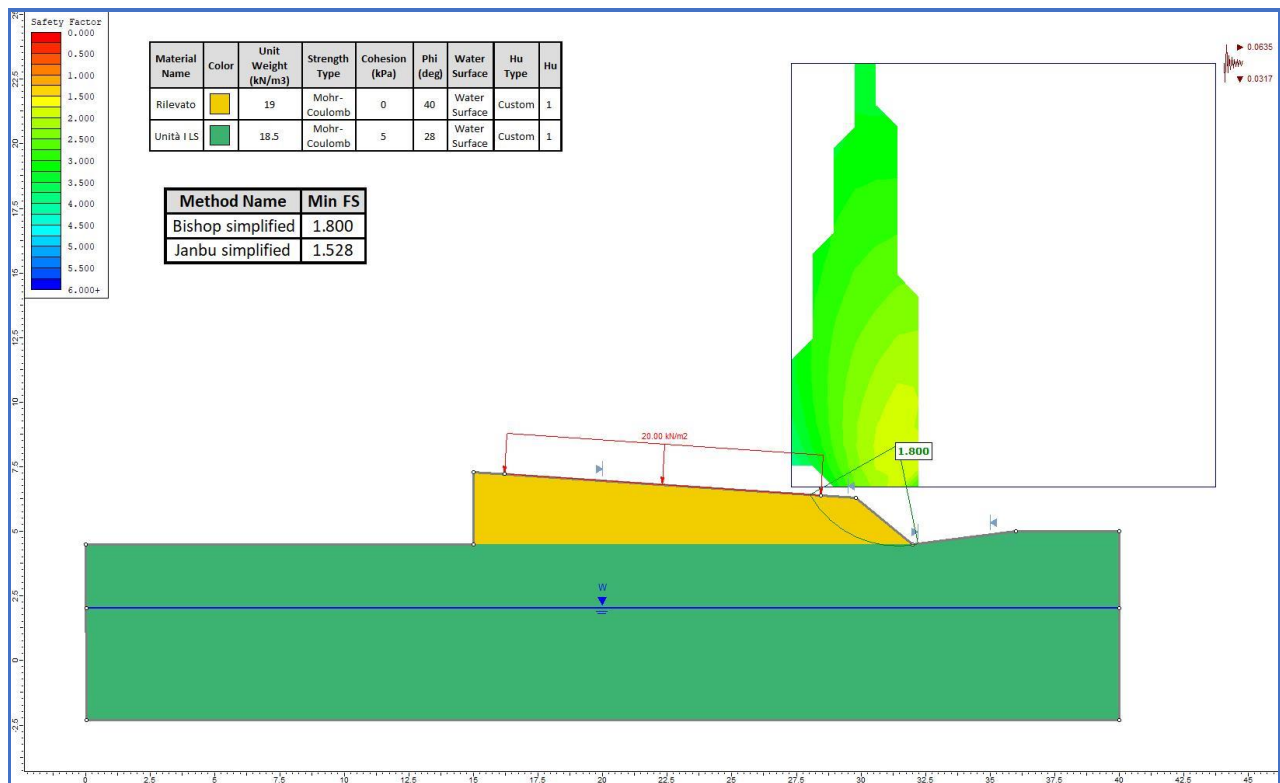
I risultati delle verifiche sono riepilogati in tabella e figure seguenti

Verifica rilevato Analisi svolta:	Fattore di sicurezza ottenuto	Figura di riferimento
Verifica statica	<u>1,326</u>	30
Verifica con sisma	<u>1,528</u>	31

**Tabella 19 Verifiche di stabilità rilevato di appoggio al ponte di Final di Rero sez 11**



**Figura 30. Rilevato Final di Rero sez. 11. Verifica statica**



**Figura 31. Rilevato Final di Rero sez. 11. Verifica con sisma**

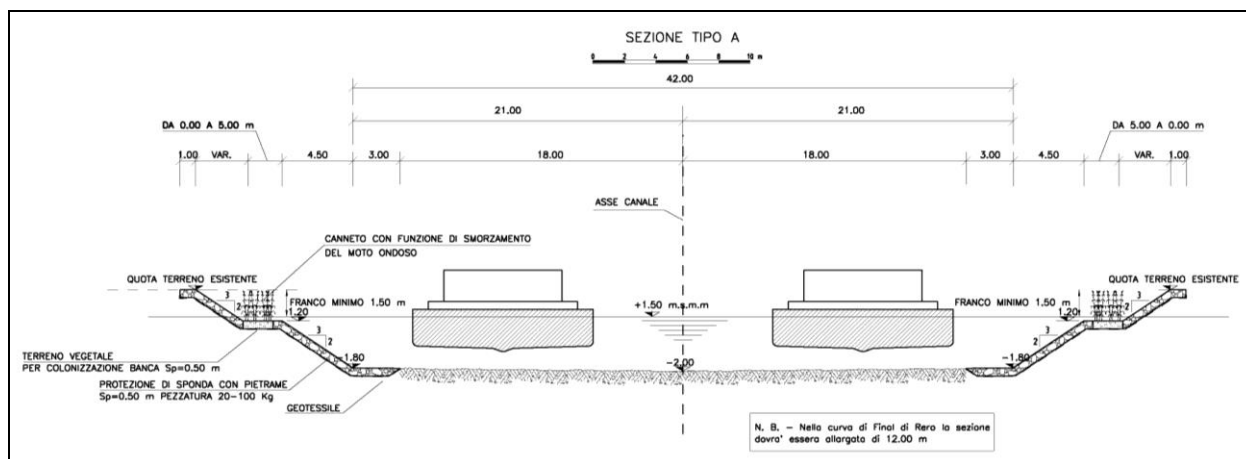
### Scavo dell'idrovia

Il progetto prevede l'adeguamento della sezione idroviaria, la posa di protezioni di sponda ed una deviazione planimetrica dell'idrovia stessa all'incirca fra le Pk 1.800 – 2.600, con la creazione di un'isola centrale che sarà raggiungibile tramite passerella pedonale.

Come si evince dall'elaborato relativo alle sezioni trasversali il fondo scavo è previsto alla quota -2,00 m.s.l.m, mentre il piano campagna ha quote variabili in base al contesto locale con valori massimi compresi fra 5,00 e 6,00 m slm.

La sezione tipo dell'idrovia (figura 32) è sagomata con pendenza 3 orizzontale e 2 verticale, con una o due banche intermedie di larghezza 2,00 m, di cui la prima a quota

1,20 m.s.l.m. e la seconda ove presente a 4,00 m slm. Il livello idrico è a quota 1,5 m slm.



**Figura 32. Sezione tipo dell'idrovia nel tratto a doppio senso alternato**

La sezione verificata è quella di massima altezza posta alla Pk 1.950, sezione n° 42.

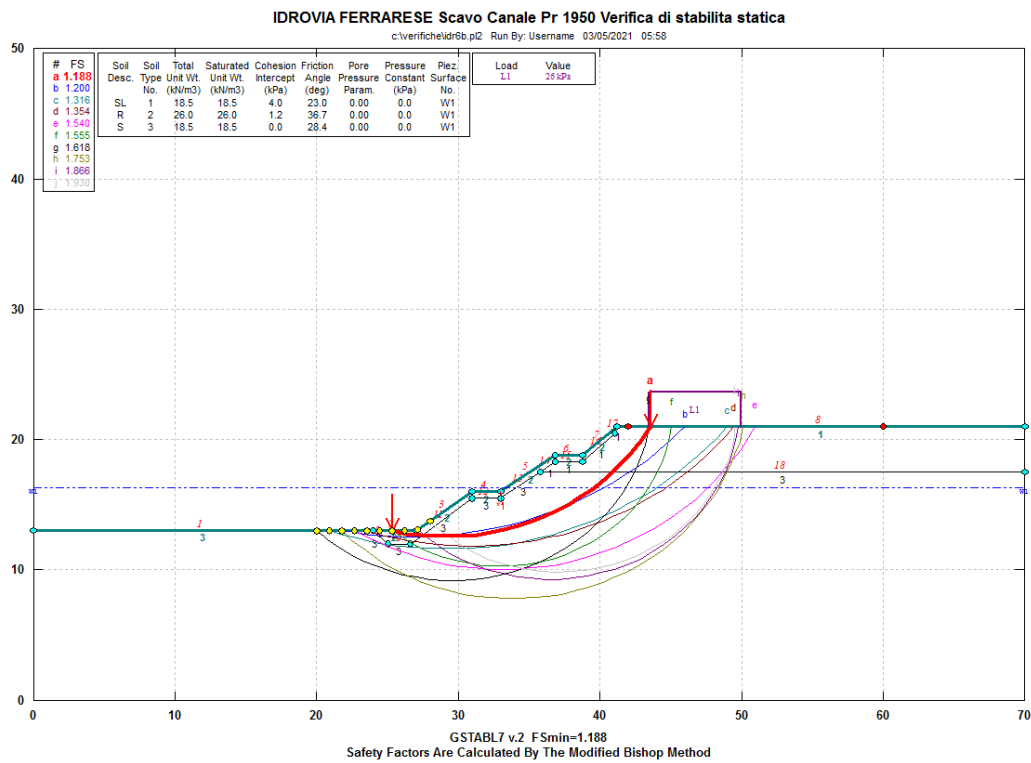
Dal punto di vista stratigrafico e geotecnico è presente un orizzonte superficiale limoso argilloso (unità I), o rappresentato da materiale di riporto che dovrà essere posto in opera per la creazione dell'isola, in appoggio sulle sabbie e sabbie limose (unità II). La falda si attesa a quota compatibile con il livello idrico nell'idrovia come evidenziato anche dal piezometro installato nel sondaggio SC1PZ.

La tabella seguente riepiloga l'esito delle verifiche svolte.

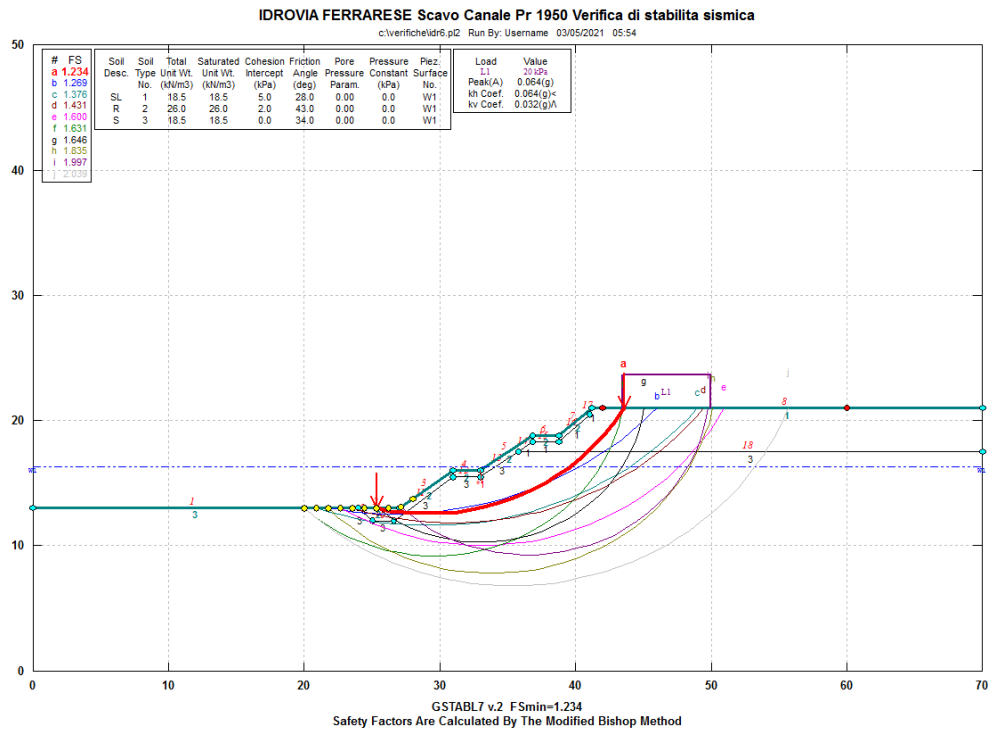
Verifica rilevato Analisi svolta:	Fattore di sicurezza ottenuto	Figura di riferimento
Verifica statica progr. 1950	<u>1,188</u>	33
Verifica con sisma progr 1950	<u>1,234</u>	34

**Tabella 20 Verifiche stabilità idrovia**





**Figura 33 Idrovia. Verifica statica**



**Figura 34 Idrovia. Verifica con sisma**

Da quanto si evince dai sopralluoghi condotti è importante assicurare una copertura vegetale (canneto) sulla banca con funzione di smorzamento del moto ondoso. E' altrettanto importante garantire la compattazione del materiale di riempimento che viene posto in opera (ove previsto) a tergo dell'idrovia impiegando le frazioni granulometricamente più grossolane provenienti da scavi, stendendolo e compattandolo per strati di spessore non superiore a 30 cm, lavorandolo con contenuto d'acqua inferiore al 30%, ed assicurando una densità Proctor non inferiore al 90%.

## 10 CONCLUSIONI

L'interpretazione delle indagini in sito ha permesso la definizione del modello stratigrafico e la caratterizzazione dei terreni.

Le indagini eseguite in sito ed in laboratorio nelle campagne del 2004, 2008 e 2014 hanno evidenziato una buona congruenza reciproca.

L'assetto stratigrafico, per il volume di terreno interessato dalla realizzazione delle opere in progetto è rappresentato dalle seguenti 4 unità stratigrafiche:

- **Unità I:** limo sabbioso a tratti argilloso, o materiale di riporto, spessore medio 2-3 m;
- **Unità II:** sabbia fine e sabbia limosa, spessore medio 8 m;
- **Unità III:** limo argilloso e argilla limosa con presenza di lenti sabbiose, spessore medio 15-16 m;
- **Unità IV:** sabbia fine con possibili intercalazioni limose, spessore > 15m.

La granulometria delle diverse unità è uno specchio della variabilità e complessità del regime deposizionale con, spesso, la presenza all'interno della stessa unità di termini variabili lungo l'intero campo fra le sabbie e le argille. Le unità I e II sono classificabili prevalentemente come A4-A6 ed A7; le unità II e IV come A2.4 o A4 in funzione del contenuto di limo, e locali sacche di sabbie sostanzialmente pulite classificabili come A1.

Nel complesso i terreni sono normal consolidati, con un leggero grado di sovra consolidazione che interessa l'unità III, ed una crosta superficiale essiccata per l'unità I.

I livelli granulometricamente fini, Unità I e III, risultano essere più deformabili e dotati di caratteristiche di resistenza inferiori rispetto ai livelli sabbiosi più competenti, Unità II e IV.

La falda idrica ha una quota essenzialmente governata da canali che, oltre a portare le acque verso gli impianti di sollevamento, vengono utilizzati a scopo irriguo. Essa comunque è posta generalmente a profondità compresa fra 2-4 m da p.c. in funzione della morfologia locale.

Le caratteristiche dei terreni hanno imposto l'adozione di fondazioni su pali trivellati di grande diametro per il ponte di Final di Rero.

Per quanto attiene il rilevato di approccio al ponte di Final di Rero, dove si prevede un allargamento e parziale incremento di altezza, i cedimenti indotti dal carico si svilupperanno in un arco di tempo compatibile con i lavori. Si prescrive comunque l'esecuzione di tali rilevati durante le prime fasi del cantiere in modo da verificare e scontare tali cedimenti, e prevedere ove necessario eventuali ricariche ben prima della posa della pavimentazione stradale.

Un eventuale monitoraggio mediante assestimetri a piastra permetterebbe di verificare entità e decorso dei cedimenti nel tempo.

Sui piani di posa è previsto uno scotico e bonifica limitato all'asportazione del vegetale e la posa di un geosintetico di rinforzo. La modesta profondità della falda ha consigliato la previsione di uno strato con funzione anticapillare.

Sulle scarpate dell'idrovia è stata prevista: l'estensiva posa di una protezione di sponda in pietrame con pezzatura 20-100 Kg, la profilatura delle scarpate con altezze modeste (circa 3 m) interrotte da banche larghe 2 m dove porre a sedime un canneto con funzione di smorzamento del moto ondoso.

Le verifiche di stabilità eseguite sia sui rilevati che sull'idrovia sono sempre positive per effetto sia della modesta altezza delle opere (rilevati altezza media circa 4 m da p.c.) che delle geometrie e pendenze adottate.

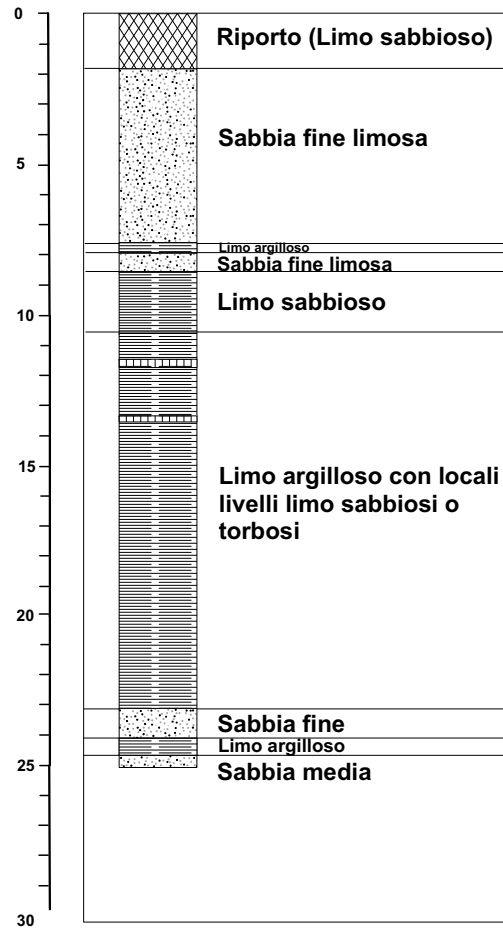
## **ALLEGATO**

### **ELABORAZIONE PROVE PENETROMETRICHE 2004 - 2008**

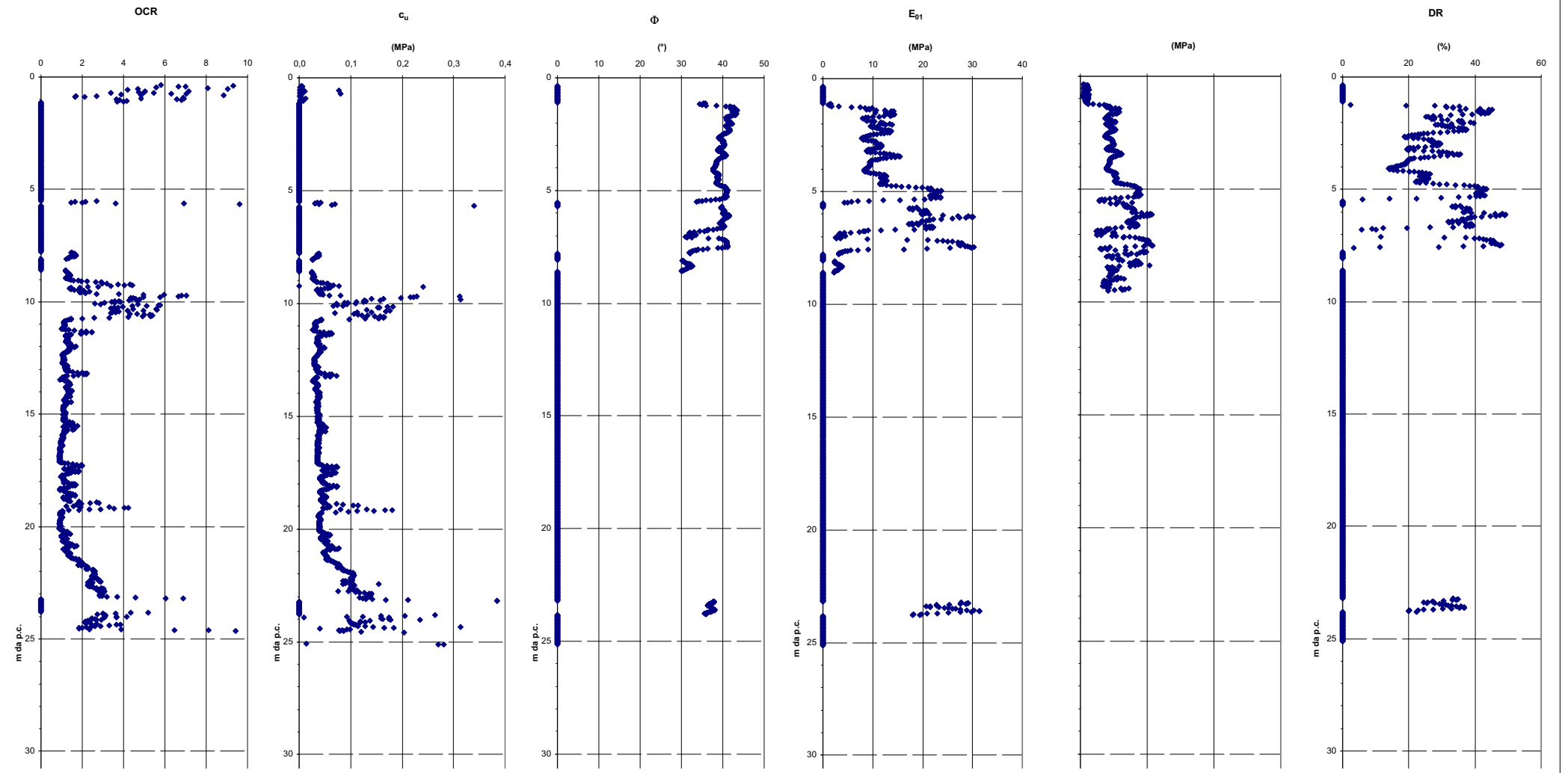
<b>TAV. 1</b>	<b>PROVA CPTU 1</b>
<b>TAV. 2</b>	<b>PROVA CPTU 2</b>
<b>TAV. 3</b>	<b>PROVA CPTU 3</b>
<b>TAV. 4</b>	<b>PROVA CPTU 4</b>
<b>TAV. 5</b>	<b>PROVA CPTU 5</b>
<b>TAV. 6</b>	<b>PROVA CPTU 6</b>
<b>TAV. 7</b>	<b>PROVA CPTU 1-08</b>
<b>TAV. 8</b>	<b>PROVA CPTU 2-08</b>



INTERPRETAZIONE DELLA STRATIGRAFIA



Qc U fs



**LEGENDA**

OCR = Grado di sovraconsolidazione

Cu = Resistenza al taglio non consolidata non drenata

F = Angolo di attrito di picco

Gmax = Modulo di taglio massimo

E01 = Modulo di elasticità a 0,1% di deformazione verticale

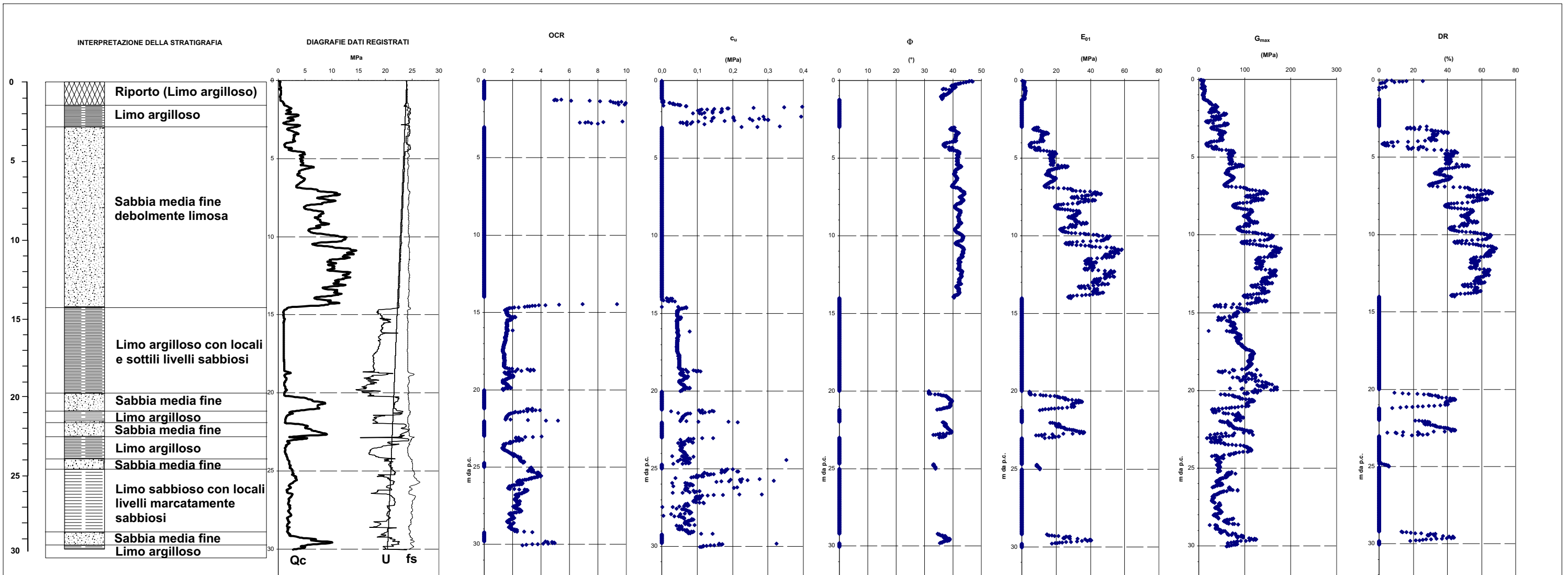
Dr = Densità relativa

CO			FRESIA E	FRESIA E	FRESIA E
REV. N.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO
SOSTITUIRE L'ELABORATO N°			SOSTITUITO DALL'ELABORATO N°		
REGIONE EMILIA ROMAGNA					
AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI FERRARA					
ADEGUAMENTO DELL'ITROVA FERRARESE, NEL TRATTO DA FINALE DIRERO A MELLARNO, AL TRAFFICO DROVARD DI CLASSE V EUROPEA					
PROGETTO DEFINITIVO					
Elaborazione dati prova penetrometrica statica cptu2					
Tav. 2					
ELABORATO N.			REV N°00		
DATA Novem bre 2008			PROGETTAZIONE		
CODICE CAD-FILE cptu2.dsf			DIRETTORE TECNICO :DOTT.ING. M. RACOSTA		
OPERA PROTETTA AISENSIDELLA LEGGE 22 APRILE 1941 N. 633 TUTTI I DIRITTI RISERVATI QUALSIVISIA PRODUZIONE ED UTILIZZAZIONE NON AUTORIZZATE SARANNO PERSEGUITE A RIGORE DILEGGE					





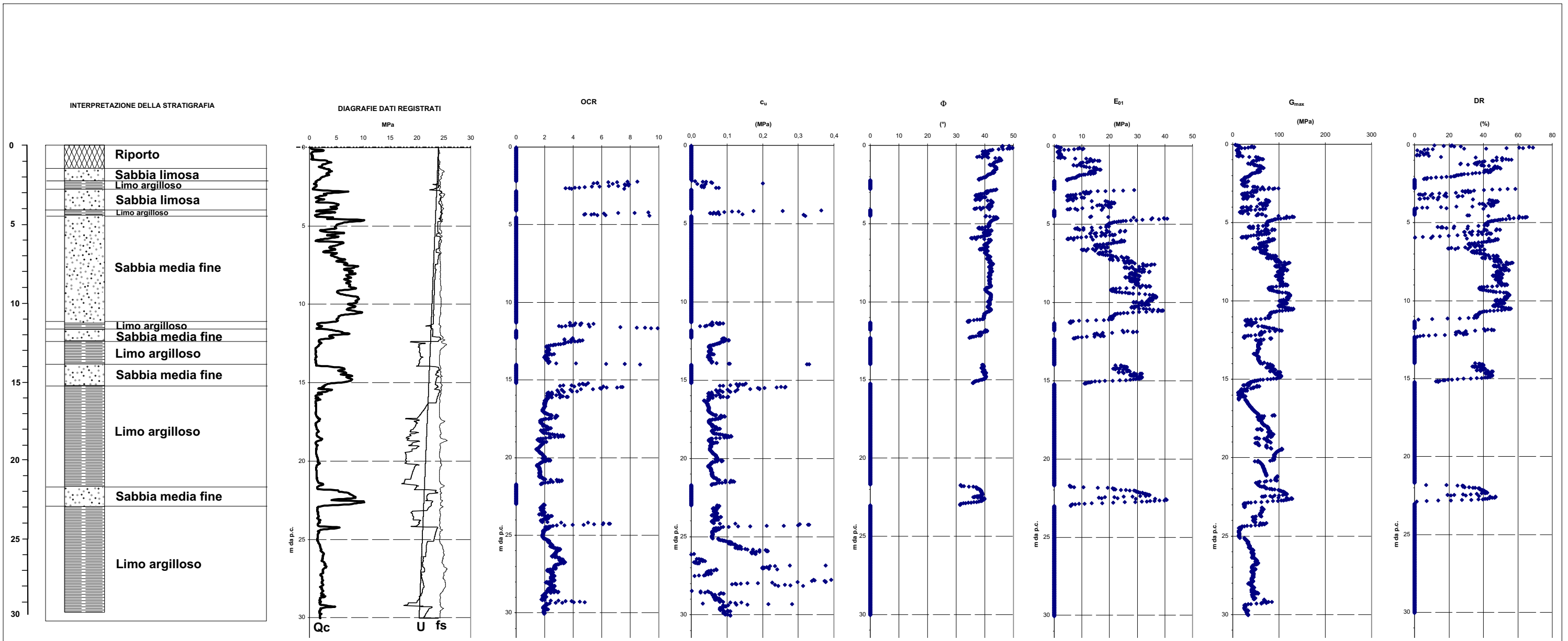




**LEGENDA**

- OCR = Grado di sovraconsolidazione**
- $C_u$  = Resistenza al taglio non consolidata non drenata**
- $F$  = Angolo di attrito di picco**
- $G_{max}$  = Modulo di taglio massimo**
- $E_{01}$  = Modulo di elasticità a 0,1% di deformazione verticale**
- Dr = Densità relativa**

OG					
REV. N.	DATA	DESCRIZIONE	FRESA E. ELABORATO	FRESA E. VERIFICATO	FRESA E. APPROVATO
SOSTITUISCE L'ELABORATO N°			SOSTITUITO DALL'ELABORATO N°		
REGIONE EMILIA ROMAGNA					
AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI FERRARA					
ADEGUAMENTO DELL'USCITA FERRARESE, NEL TRATTO DA FINALE DIRERO A MGLARNO, AL TRAFFICO DROVARD DI CLASSE V EUROPEA					
PROGETTO DEFINITIVO					
Elaborazione dati prova penetrometrica statica cptu5					
Tav. 5					
ELABORATO N.:			REV. N°00		
DATA	Novembre 2008	PROGETTAZIONE			
CODICE CAD-FILE	cptu5.dsf	DIRETTORE TECNICO	:DOTT. ING. M. RACCOSTA		
OPERA PROTETTA AI SENSI DELLA LEGGE 22 APRILE 1941 N. 633 TUTTI I DIRITTI RISERVATI QUALSIASI RIPRODUZIONE ED UTILIZZAZIONE NON AUTORIZZATE SARANNO PERSEGUITE A REQUE DILEGGE					



**LEGENDA**

**OCR** = Grado di sovraconsolidazione

**Cu** = Resistenza al taglio non consolidata non drenata

**F** = Angolo di attrito di picco

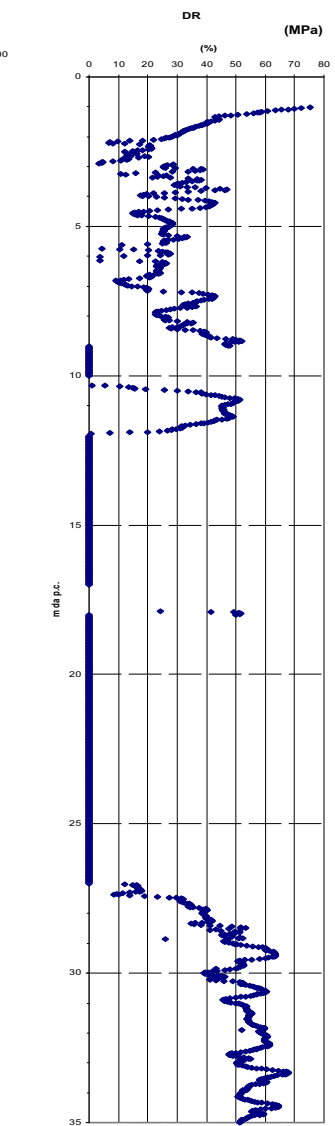
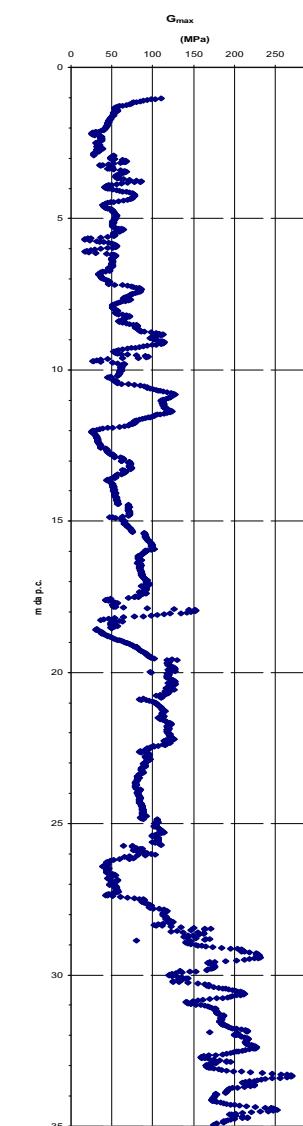
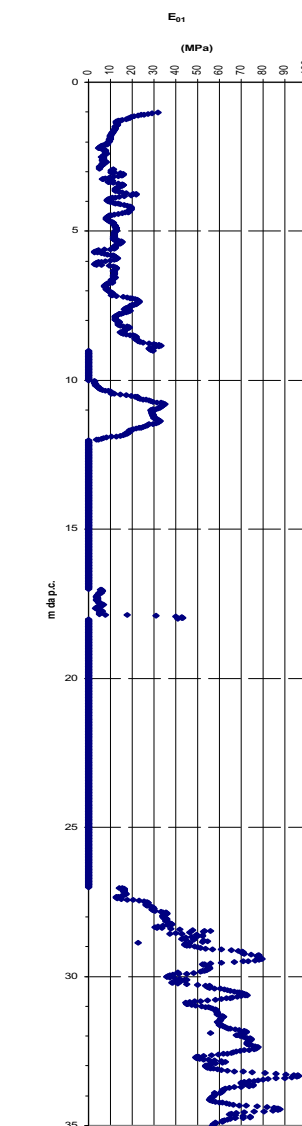
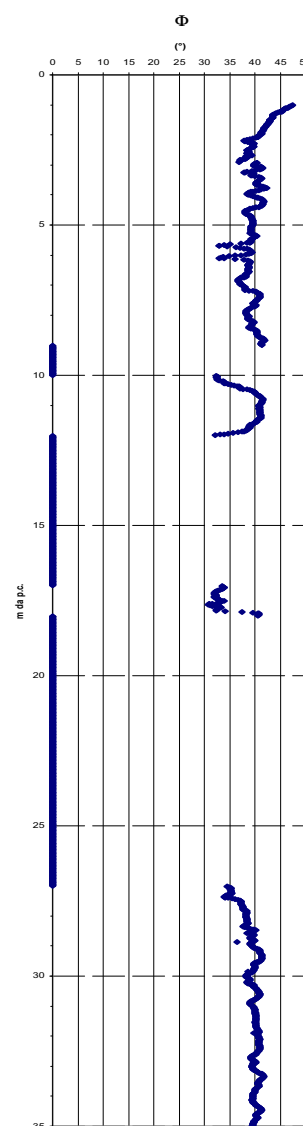
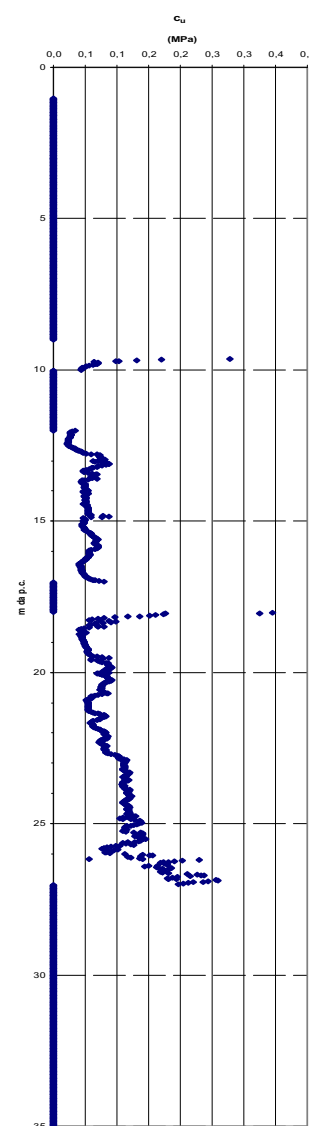
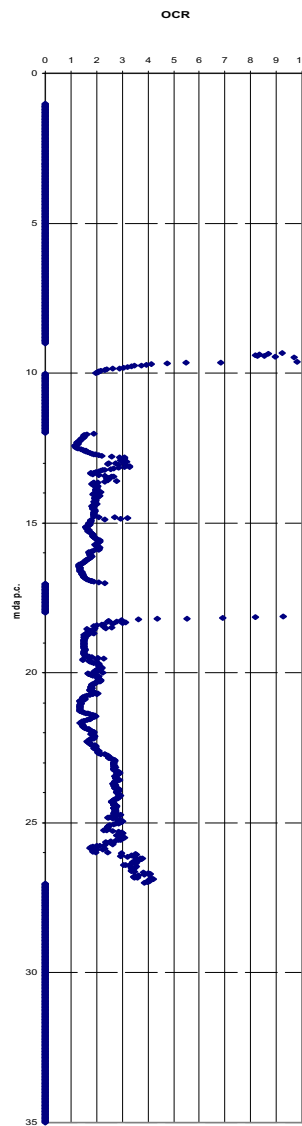
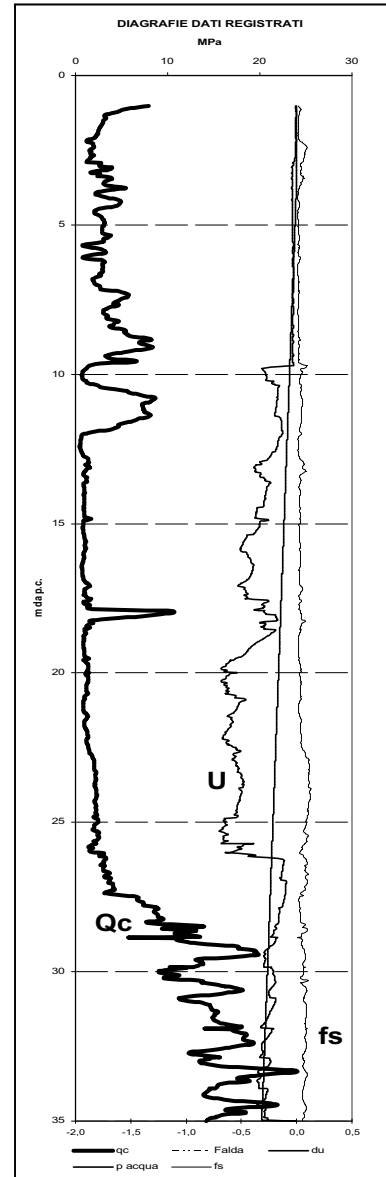
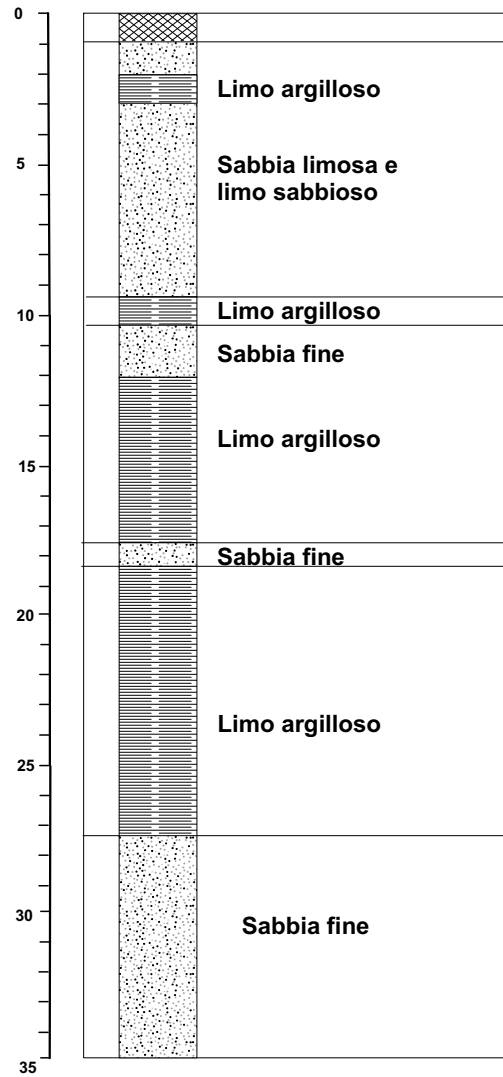
**Gmax** = Modulo di taglio massimo

**E01** = Modulo di elasticità a 0,1% di deformazione verticale

**Dr** = Densità relativa

00				FRESIA E.	FRESIA E.	FRESIA E.
REV. N.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO	
SOSTITUZIONE DELL'ELABORATO N°			SOSTITUITO DALL'ELABORATO N°			
REGIONE EMILIA ROMAGNA						
AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI FERRARA						
ADEGUAMENTO DELL'OPERA FERRARESE, NEL TRATTO DA FINALE DI RERO A M. GLARNO, AL TRAFFICO D'OPERA DI CLASSE V EUROPEA						
PROGETTO DEFINITIVO						
Elaborazione dati prova penetrometrica statica cptu6						
Tav. 6						
ELABORATO N.:			REV. N°00			
DATA: Novem 2008			PROGETTAZIONE:			
CODICE CAD-FILE: cptu6.dsf			DIRETTORE TECNICO: DOTT. ING. M. RACOSTA			
OPERA PROTETTA AI SENSI DELLA LEGGE 22 APRILE 1941 N. 633 TUTTI I DIRITTI RISERVATI QUALSIASIRIPRODUZIONE ED UTILIZZAZIONE NON AUTORIZZATE SARANNO PERSEGUITE A REO D'ILLEGGE						

INTERPRETAZIONE DELLA STRATIGRAFIA

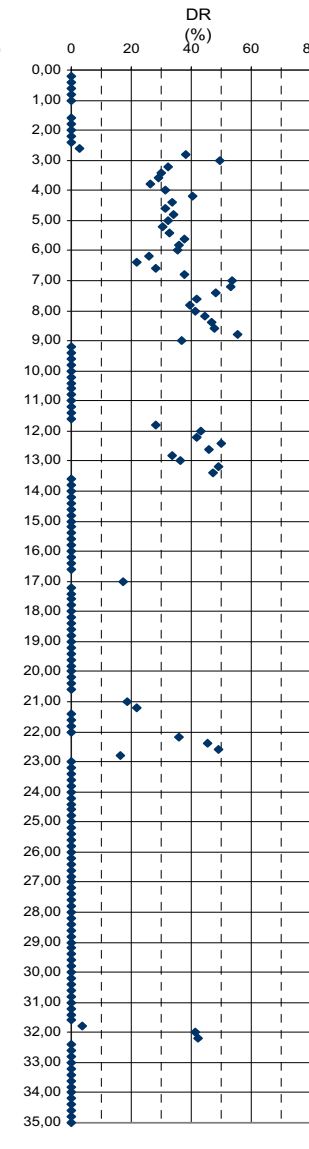
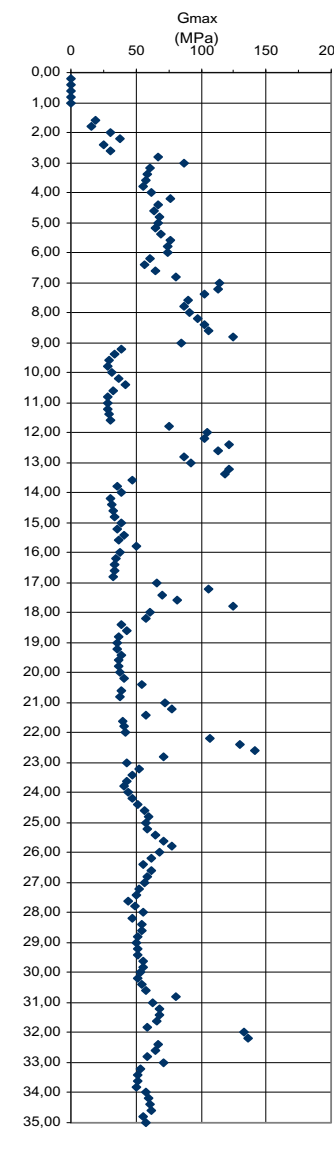
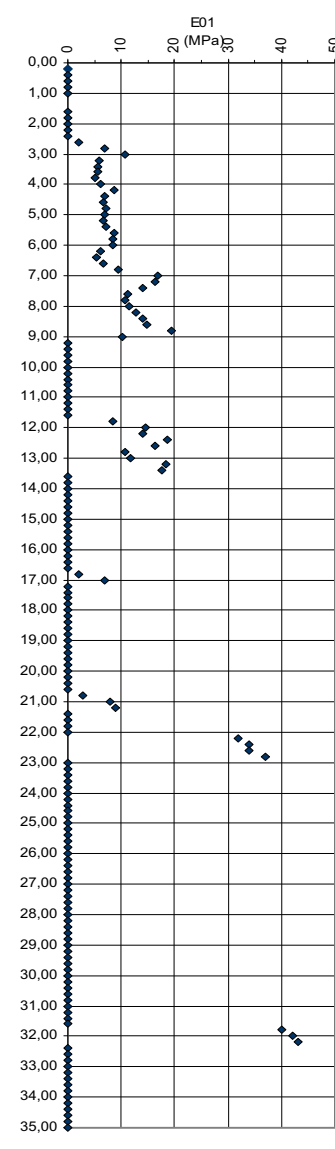
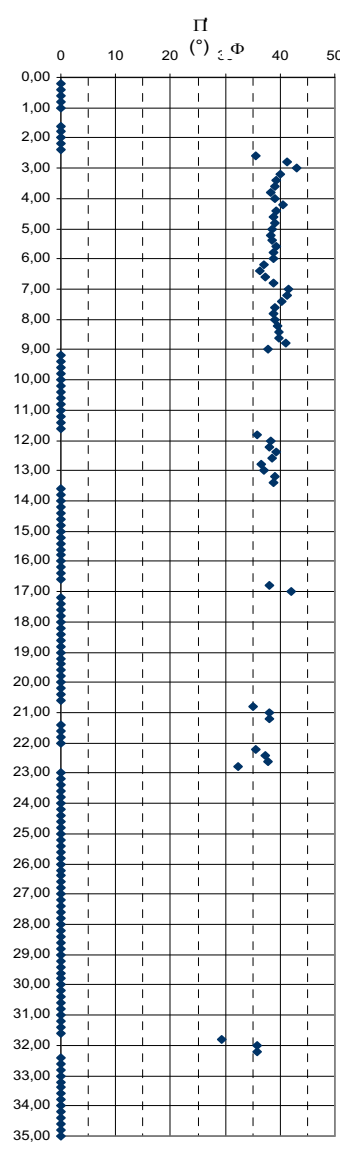
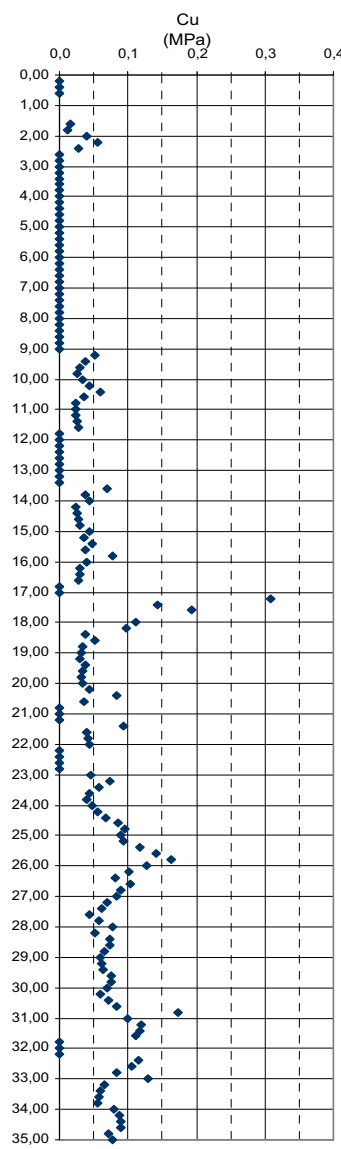
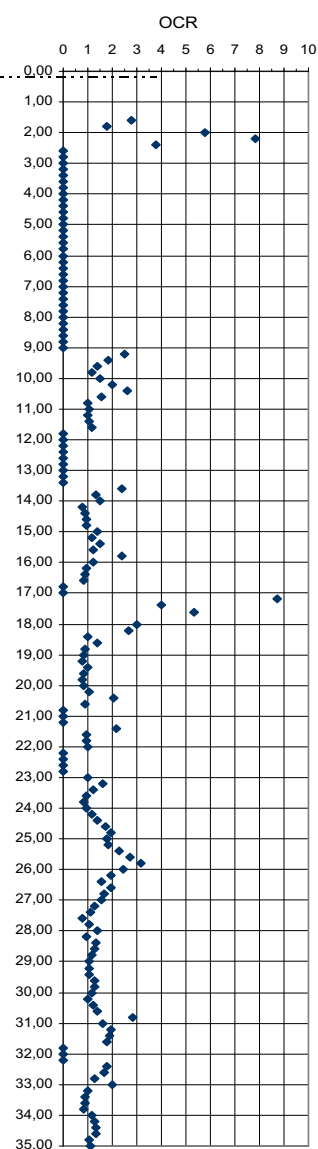
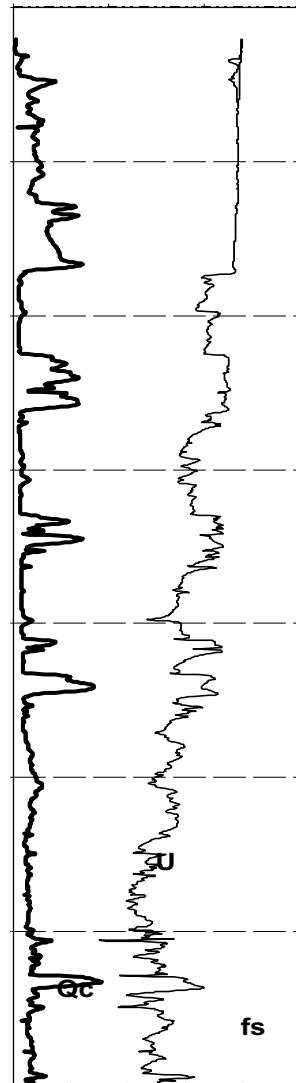
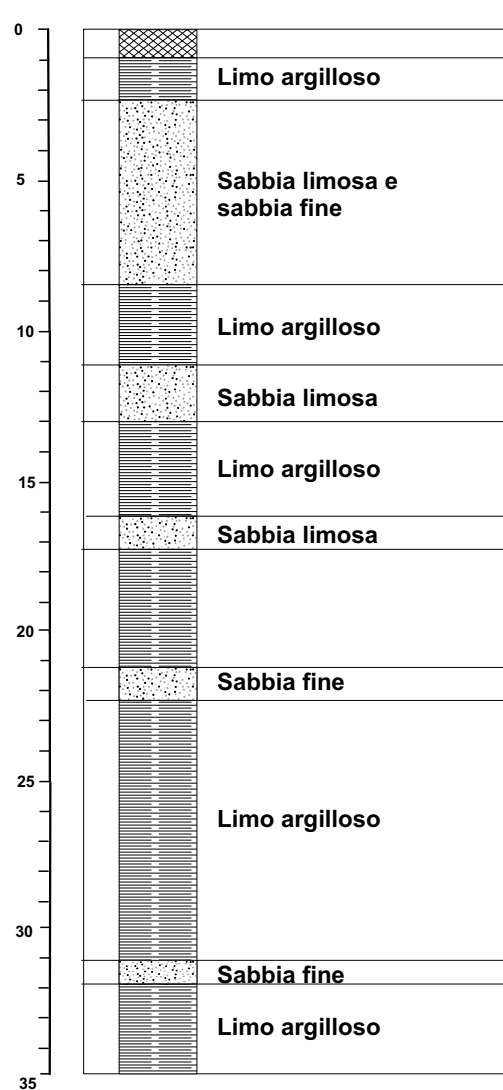


LEGENDA

- OCR = Grado di sovraconsolidazione
- Cu = Resistenza al taglio non consolidata non drenata
- F = Angolo di attrito di picco
- Gmax = Modulo di taglio massimo
- E01 = Modulo di elasticità a 0,1% di deformazione verticale
- Dr = Densità relativa

OP		FRESIA E	FRESIA E.	MATTAROLO
REV. N.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORATO	VERIFICATO APPROVATO
SOSTITUISCE L'ELABORATO N°		SOSTITUISCE L'ELABORATO N°		
REGIONE EMILIA ROMAGNA				
AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI FERRARA				
ADEGUAMENTO DELL'ARCO FERRARESE, NEL TRATTO DA FINALE DI RERO A MELLARNO, AL TRAFFICO DROVARD DI CLASSE EUROPEA				
PROGETTO DEFINITIVO				
Elaborazione dati prova penetrometrica statica cptu1/08				
				Tav. 7
ELABORATO N.		REV. N°00		
DATA	Novembre 2008	PROGETTAZIONE		
CODICE CAD-FILE	cptu1_08.dxf	DIRETTORE TECNICO	:DOTT. ING. M. RACOSTA	
<small>OPERA PROTETTA AI SENSI DELLA LEGGE 22 APRILE 1941 N. 633 TUTTI I DIRITTI RISERVATI QUALSIVISIA PRODUZIONE ED UTILIZZAZIONE NON AUTORIZZATE SARANNO PERSEGUITE A REQUISITO DI LEGGE</small>				

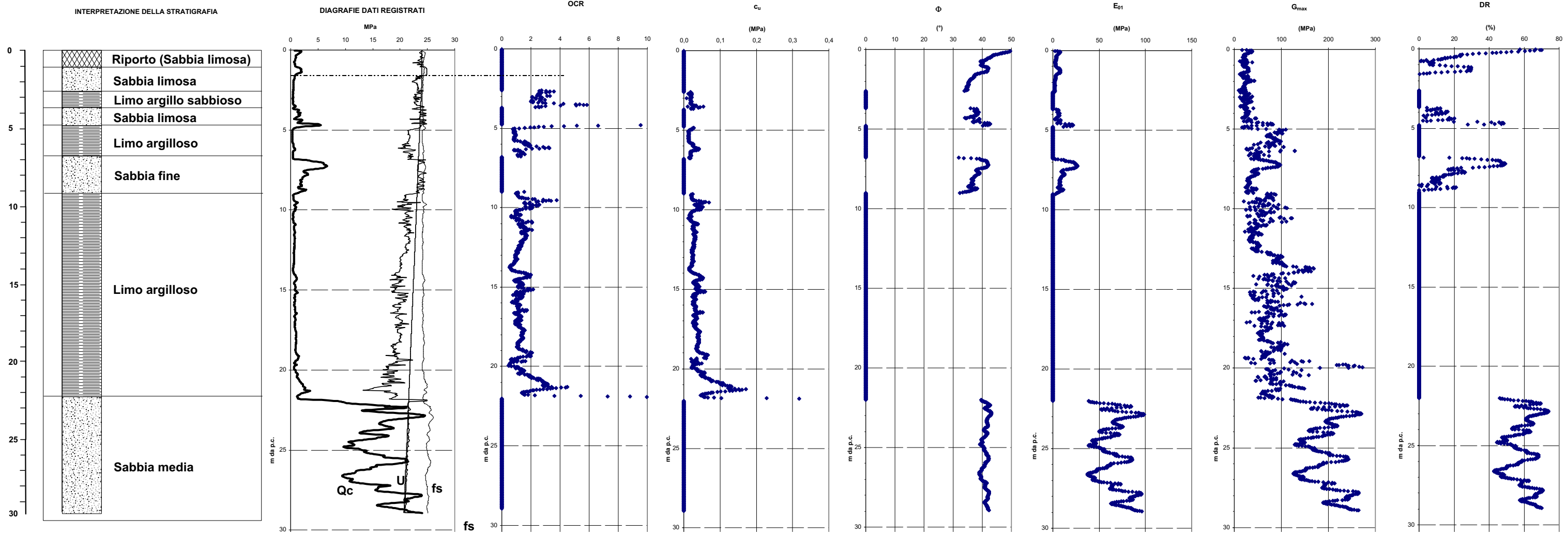
INTERPRETAZIONE DELLA STRATIGRAFIA



LEGENDA

- OCR = Grado di sovraconsolidazione
- Cu = Resistenza al taglio non consolidata non drenata
- F = Angolo di attrito di picco
- Gmax = Modulo di taglio massimo
- E01 = Modulo di elasticità a 0,1% di deformazione verticale
- Dr = Densità relativa

OP			FRESIA E	FRESIA E	MATTAROLO
REV. N.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO
SOSTITUIRE L'ELABORATO N°			SOSTITUIRE L'ELABORATO N°		
REGIONE EMILIA ROMAGNA					
AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI FERRARA					
ADEGUAMENTO DELL'ITROVA FERRARESE, NEL TRATTO DA FINALE DIRERO A MELLARNO, AL TRAFFICO DROVARD DI CLASSE V EUROPEA					
PROGETTO DEFINITIVO					
Elaborazione dati prova penetrometrica statica cptu2/08					
Tav. 8					
ELABORATO N.			REV N°00		
DATA Novem bre 2008			PROGETTAZIONE		
CODICE CAD-FILE cptu2_08.dsf			DIRETTORE TECNICO :DOTT.ING. M. RACOSTA		
<small>OPERA PROTETTA AI SENSI DELLA LEGGE 22 APRILE 1941 N. 633 TUTTI I DIRITTI RISERVATI QUALSIVISIA PRODUZIONE ED UTILIZZAZIONE NON AUTORIZZATE SARANNO PERSEGUITE A REQUISITO DI LEGGE</small>					



**LEGENDA**

**OCR** = Grado di sovraconsolidazione

**$C_u$**  = Resistenza al taglio non consolidata non drenata

**$F$**  = Angolo di attrito di picco

**$G_{max}$**  = Modulo di taglio massimo

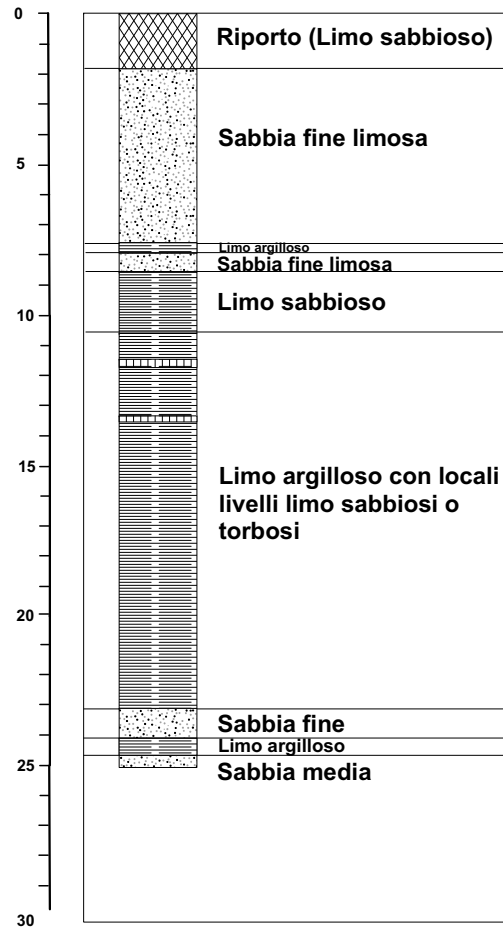
**$E_{01}$**  = Modulo di elasticità a 0,1% di deformazione verticale

**$D_r$**  = Densità relativa

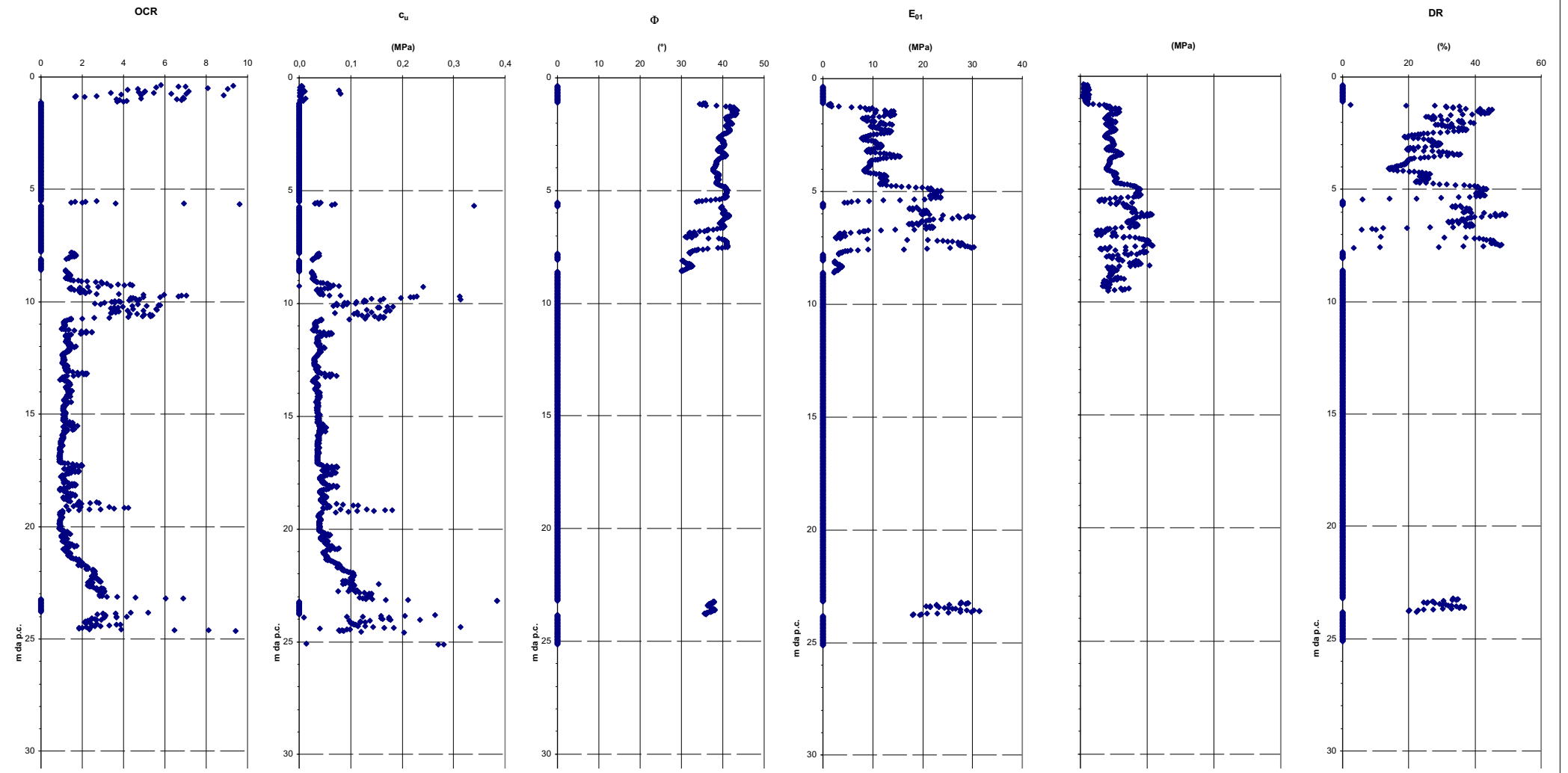
CO		FRESIA E	FRESIA E	FRESIA E
REV. N.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORATO	VERIFICATO / APPROVATO
SOSTITUISCE LABORATORIO N°		SOSTITUITO DALL'ELABORATO N°		
REGIONE EMILIA ROMAGNA AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI FERRARA				
ADEGUAMENTO DELL'ITROVA FERRARESE, NEL TRATTO DA FINALE DI RERO A MELLARNO, AL TRAFFICO DROVARD DI CLASSE V EUROPEA				
PROGETTO DEFINITIVO				
Elaborazione dati prova penetrometrica statica cptu1				Tav. 1
ELABORATO N.		REV. N°00		
DATA	Novembre 2008	PROGETTAZIONE		
CODICE CAD-FILE	cptu1.dsf	DIRETTORE TECNICO :DOTT. ING. M. RACCOSTA		
<small>OPERA PROTETTA AI SENSI DELLA LEGGE 22 APRILE 1941 N. 633 TUTTI I DIRITTI RISERVATI QUALSIASIA RIPRODUZIONE ED UTILIZZAZIONE NON AUTORIZZATE SARANNO PERSEGUITE A RECLAMO DI LEGGE</small>				



INTERPRETAZIONE DELLA STRATIGRAFIA



Qc U fs



**LEGENDA**

OCR = Grado di sovraconsolidazione

Cu = Resistenza al taglio non consolidata non drenata

F = Angolo di attrito di picco

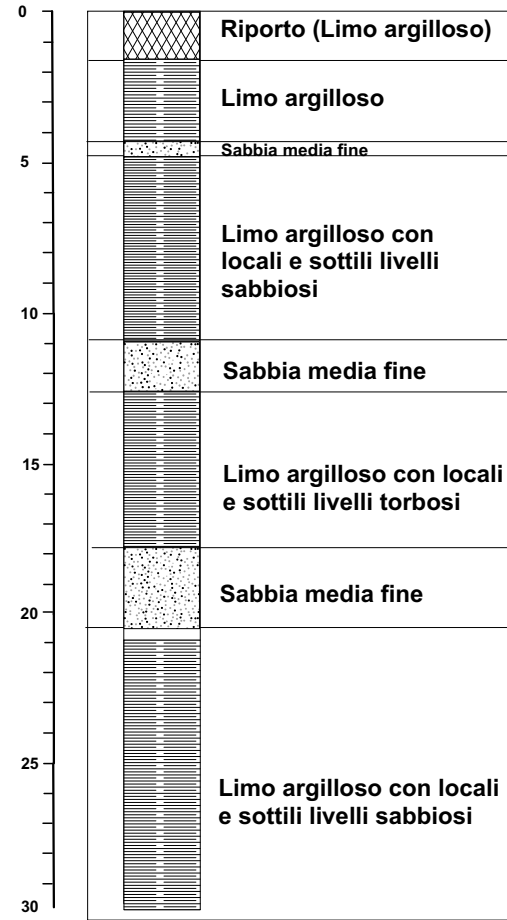
Gmax = Modulo di taglio massimo

E01 = Modulo di elasticità a 0,1% di deformazione verticale

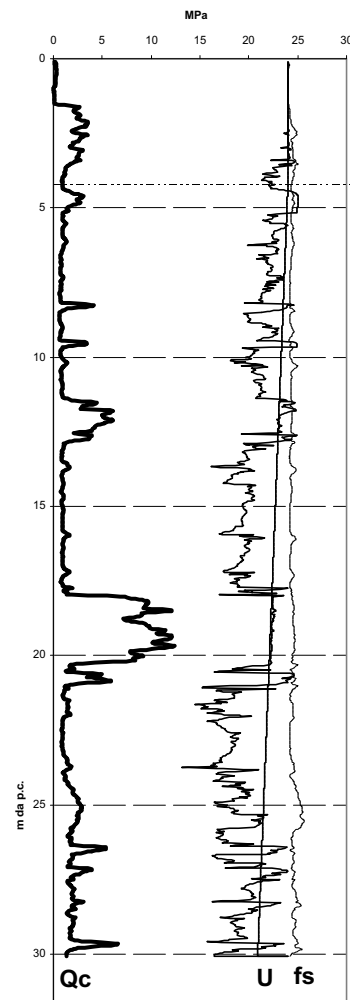
Dr = Densità relativa

CO			FRESIA E	FRESIA E	FRESIA E
REV. N.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO
SOSTITUISCE L'ELABORATO N°			SOSTITUITO DALL'ELABORATO N°		
REGIONE EMILIA ROMAGNA					
AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI FERRARA					
ADEGUAMENTO DELL'ITROVA FERRARESE, NEL TRATTO DA FINALE DIRERO A MELLARNO, AL TRAFFICO DROVARD DI CLASSE V EUROPEA					
PROGETTO DEFINITIVO					
Elaborazione dati prova penetrometrica statica cptu2					
Tav. 2					
ELABORATO N.			REV N°00		
DATA Novem bre 2008			PROGETTAZIONE		
CODICE CAD-FILE cptu2.dsf			DIRETTORE TECNICO :DOTT.ING. M. RACOSTA		
OPERA PROTETTA AISENSIDELLA LEGGE 22 APRILE 1941 N. 633 TUTTI I DIRITTI RISERVATI QUALSIVISIA PRODUZIONE ED UTILIZZAZIONE NON AUTORIZZATE SARANNO PERSEGUITE A RIGORE DILEGGE					

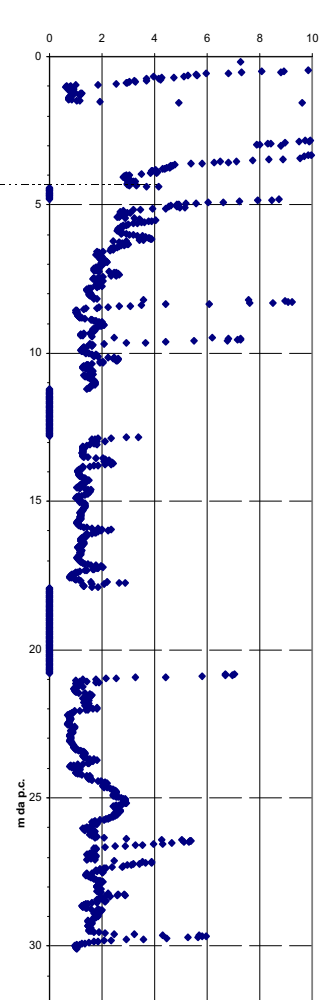
INTERPRETAZIONE DELLA STRATIGRAFIA



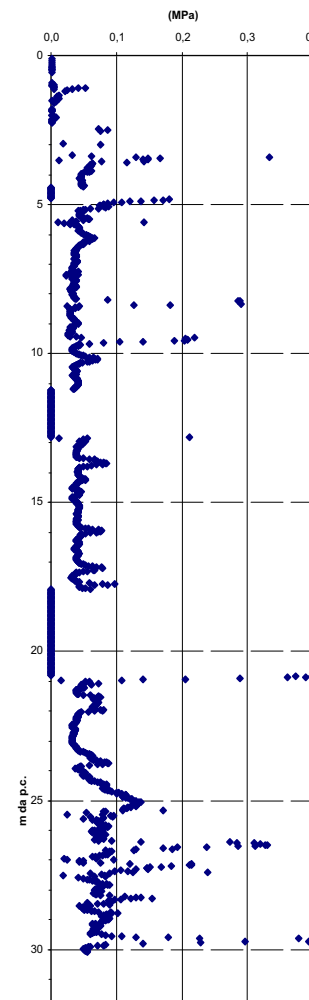
DIAGRAFIE DATI REGISTRATI



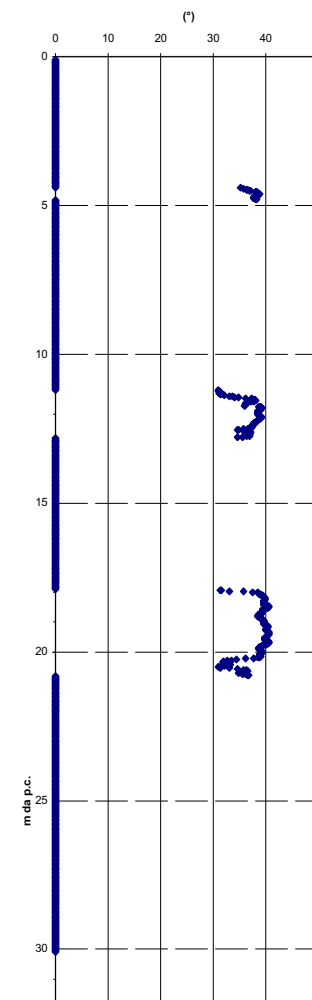
OCR



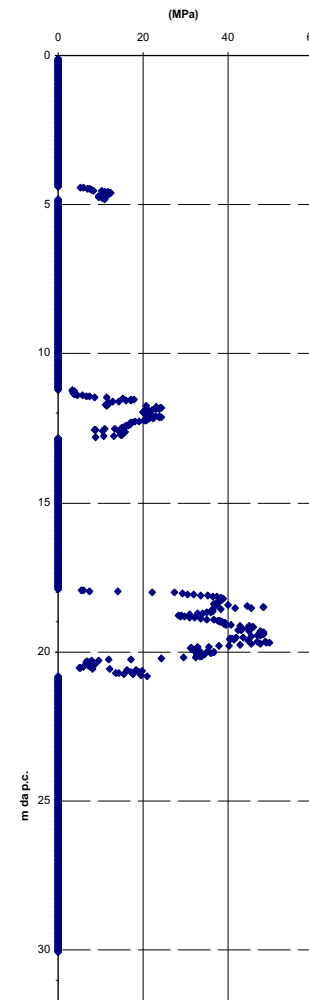
$c_u$



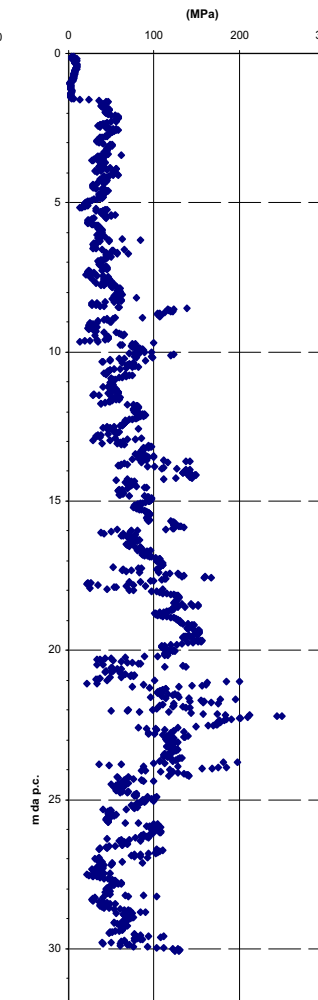
$\Phi$



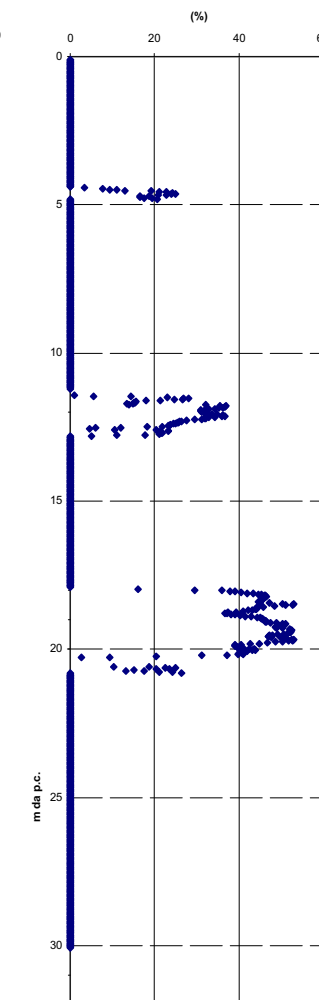
$E_{01}$



$G_{max}$



DR

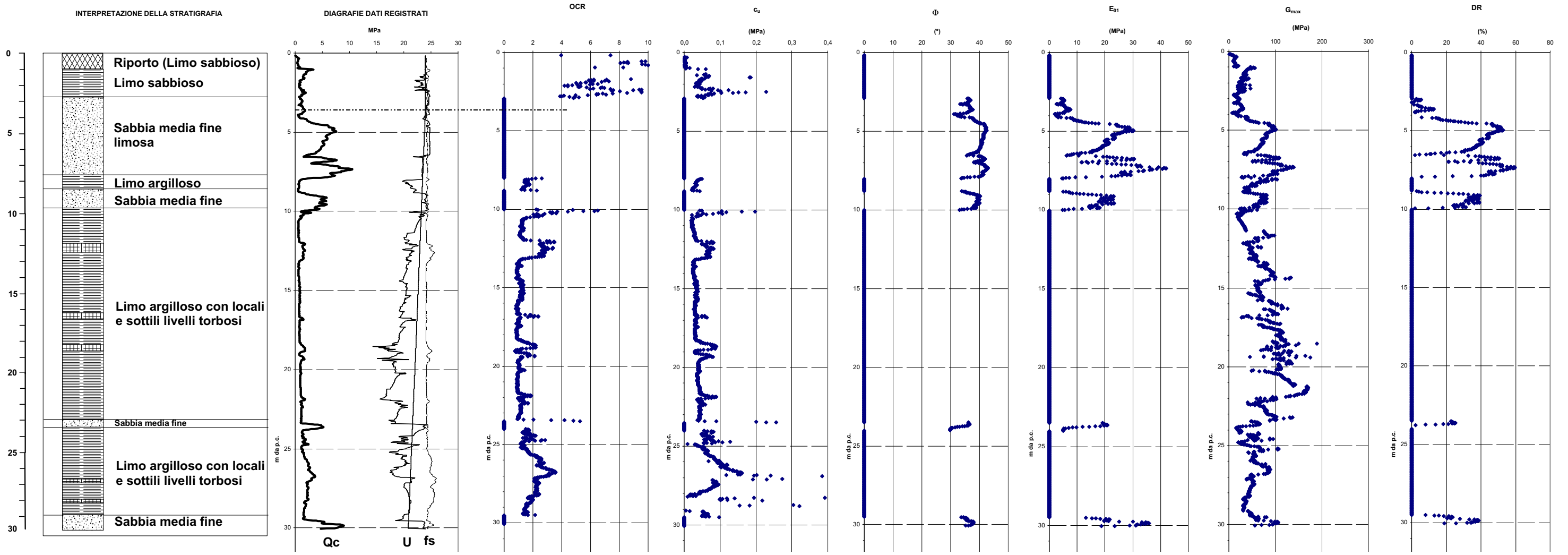


LEGENDA

- OCR = Grado di sovraconsolidazione
- $c_u$  = Resistenza al taglio non consolidata non drenata
- $\Phi$  = Angolo di attrito di picco
- $G_{max}$  = Modulo di taglio massimo
- $E_{01}$  = Modulo di elasticità a 0,1% di deformazione verticale
- Dr = Densità relativa

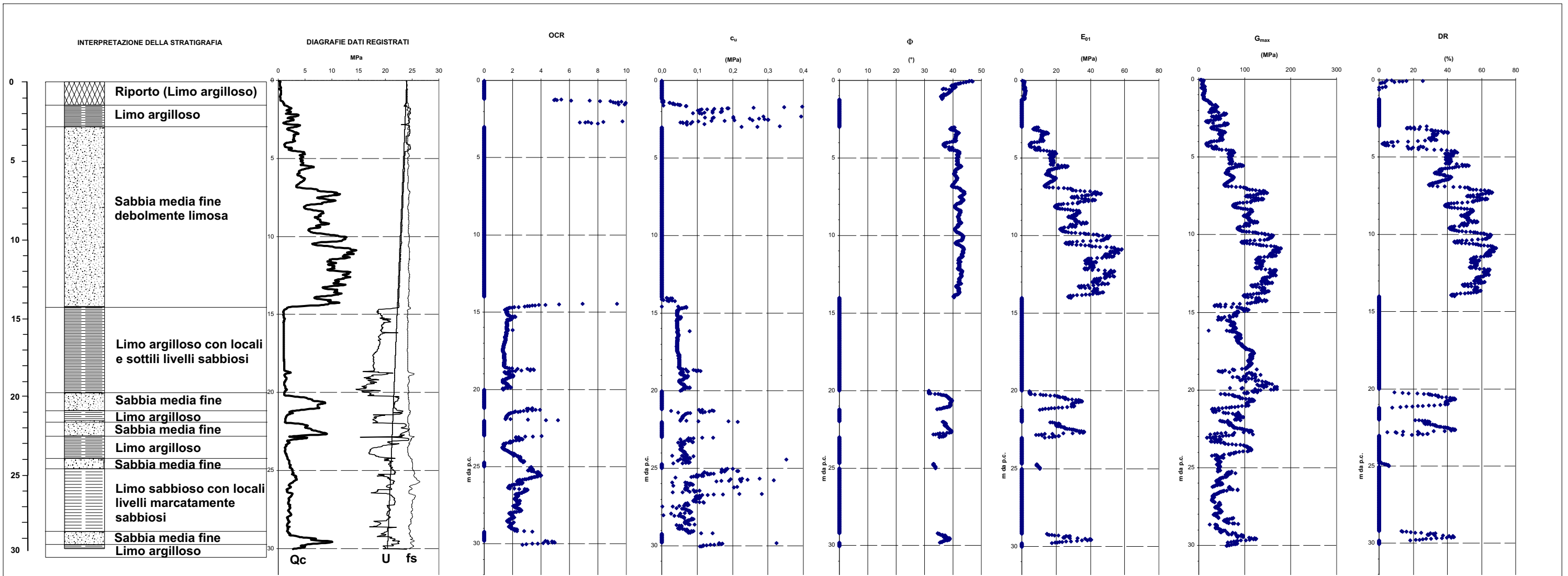
SOSTITUISCE LABORATO N°		SOSTITUITO DALL LABORATO N°	
REGIONE EMILIA ROMAGNA AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI FERRARA			
ADEGUAMENTO DELL'ITROVA FERRARESE, NEL TRATTO DA FINALE D'IRERO A MIELARNO, AL TRAFFICO DROVARD DI CLASSE V EUROPEA			
PROGETTO DEFINITIVO			
Elaborazione dati prova penetrometrica statica cptu3		Tav. 3	
ELABORATO N.	REV N°00		
DATA: Novem bre 2008	PROGETTAZIONE		
CODICE CAD-FILE: cptu3.dsf	DIRETTORE TECNICO: DOTT. ING. M. RACOSTA		
OPERA PROTETTA A ISENSIDELLA LEGGE 22 APRILE 1941 N. 633 TUTTI I DIRITTI RISERVATI QUALSASIRIPRODUZIONE ED UTILIZZAZIONE NON AUTORIZZATE SARANNO PERSEGUITE A RIGORE DILEGGE			





LEGENDA	
<b>OCR</b>	= Grado di sovraconsolidazione
<b>Cu</b>	= Resistenza al taglio non consolidata non drenata
<b>F</b>	= Angolo di attrito di picco
<b>Gmax</b>	= Modulo di taglio massimo
<b>E01</b>	= Modulo di elasticità a 0,1% di deformazione verticale
<b>Dr</b>	= Densità relativa

REV. N.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO
00					
SOSTITUIRE L'ELABORATO N°			SOSTITUIRE DALL'ELABORATO N°		
REGIONE EMILIA ROMAGNA					
AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI FERRARA					
ADEGUAMENTO DELL'ITROVA FERRARESE, NEL TRATTO DA FINALE DI RERO A MGLARNO, AL TRAFFICO DROVARD DI CLASSE V EUROPEA					
PROGETTO DEFINITIVO					
Elaborazione dati prova penetrometrica statica cptu4					
Tav. 4					
ELABORATO N.:			REV N°00		
DATA	Novembre 2008	PROGETTAZIONE			
CODICE CAD-FILE	cptu4 dsf	DIRETTORE TECNICO	:DOTT. ING. M. RACOSTA		
<small>OPERA PROTETTA AI SENSI DELLA LEGGE 22 APRILE 1941 N. 633 TUTTI I DIRITTI RISERVATI QUALSIVISIA PRODUZIONE ED UTILIZZAZIONE NON AUTORIZZATE SARANNO PERSEGUITE A REQUE DILEGGE</small>					



**LEGENDA**

**OCR** = Grado di sovraconsolidazione

**$C_u$**  = Resistenza al taglio non consolidata non drenata

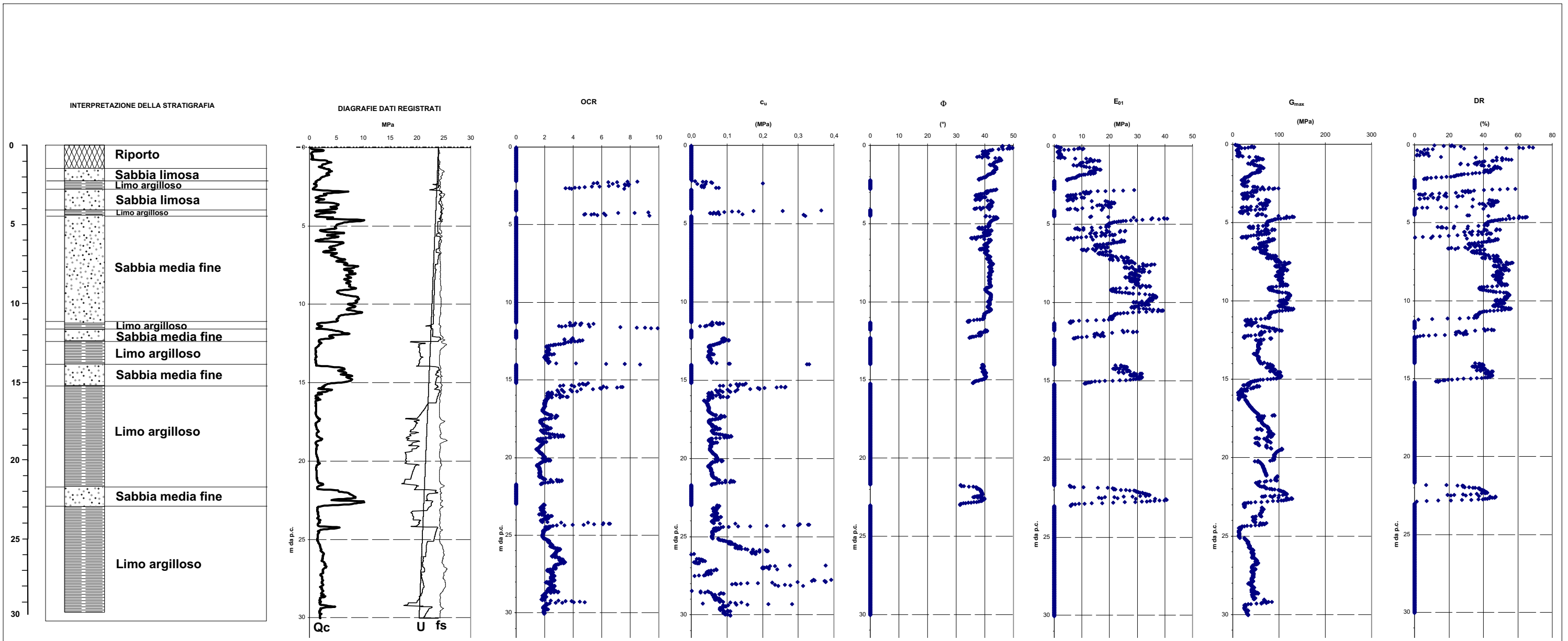
**F** = Angolo di attrito di picco

**$G_{max}$**  = Modulo di taglio massimo

**$E_{01}$**  = Modulo di elasticità a 0,1% di deformazione verticale

**Dr** = Densità relativa

OG				FRESA E.	FRESA E.	FRESA E.
REV. N.	DATA	DESCRIZIONE	LABORATO	VERIFICATO	APPROVATO	
SOSTITUIRE LABORATO N°			SOSTITUIRE DALL'LABORATO N°			
REGIONE EMILIA ROMAGNA						
AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI FERRARA						
ADEGUAMENTO DELL'UTROVA FERRARESE, NEL TRATTO DA FINALE D'IRERO A MELARNO, AL TRAFFICO DROVARD DI CLASSE V EUROPEA						
PROGETTO DEFINITIVO						
Elaborazione dati prova penetrometrica statica cptu5						
Tav. 5						
ELABORATO N.			REV. N°00			
DATA	Novembre 2008	PROGETTAZIONE				
CODICE	cptu5 dsf	DIRETTORE TECNICO	: DOTT. ING. M. RACCOSTA			
CAD FILE	cptu5 dsf	<small>OPERA PROTETTA AI SENSI DELLA LEGGE 22 APRILE 1941 N. 633 TUTTI I DIRITTI RISERVATI QUALSIASI PRODUZIONE ED UTILIZZAZIONE NON AUTORIZZATE SARANNO PERSEGUITE A REQUE D'ILLEGGE</small>				



**LEGENDA**

**OCR** = Grado di sovraconsolidazione

**Cu** = Resistenza al taglio non consolidata non drenata

**F** = Angolo di attrito di picco

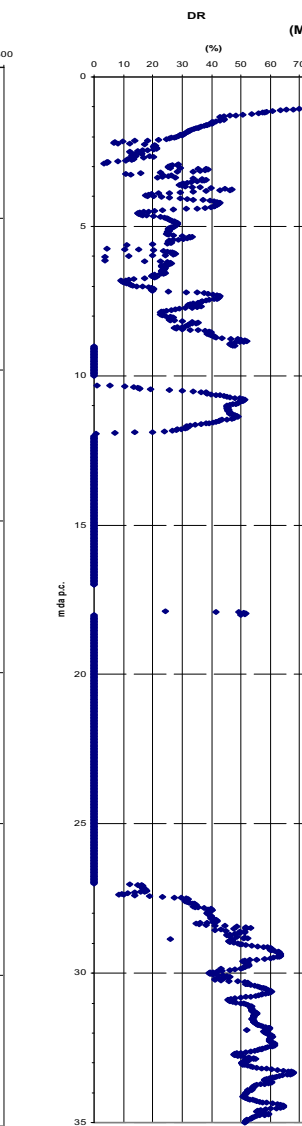
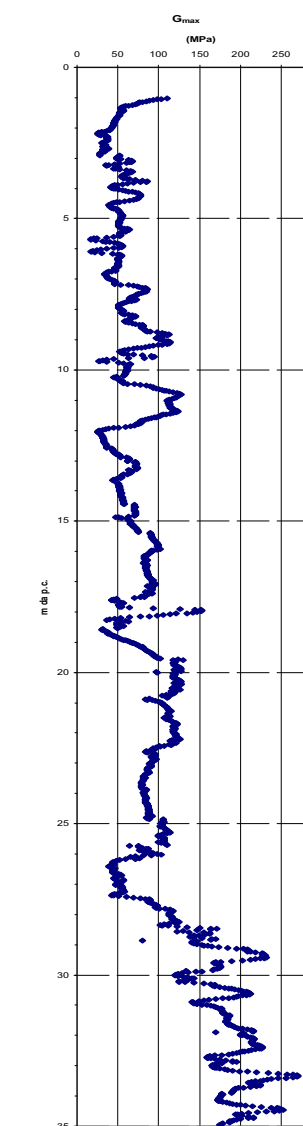
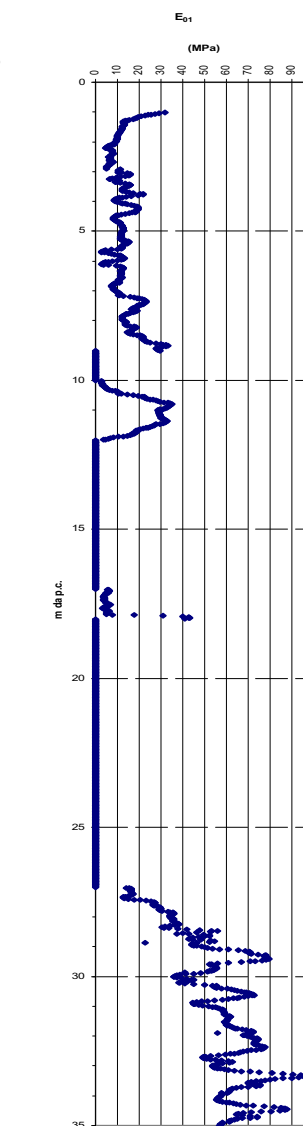
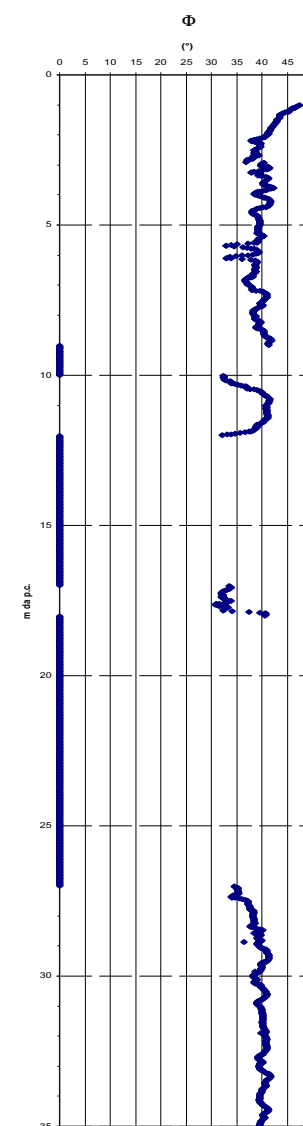
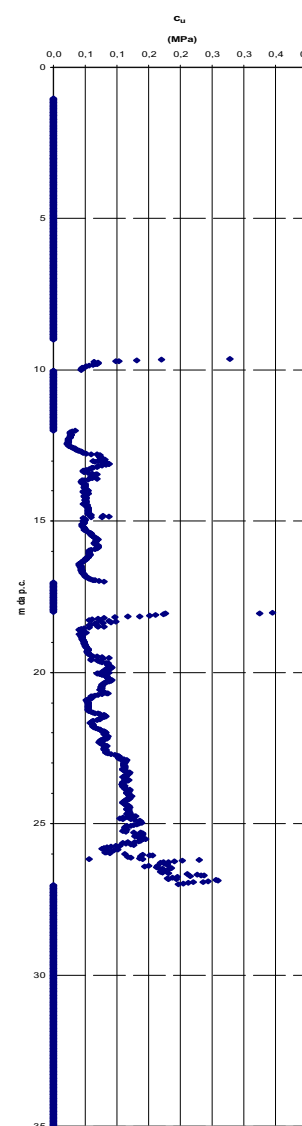
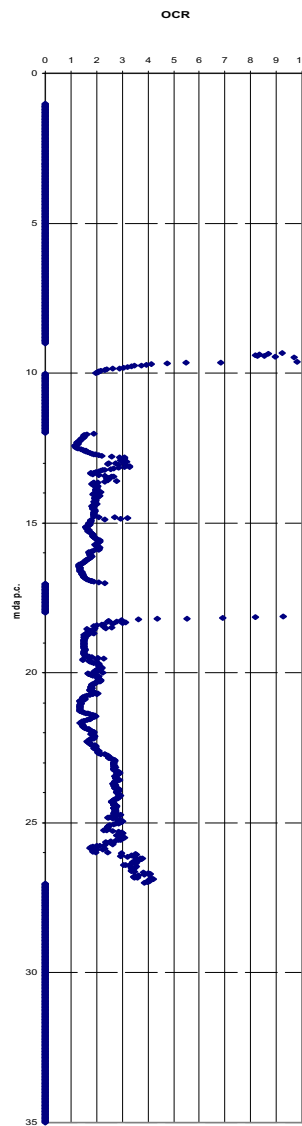
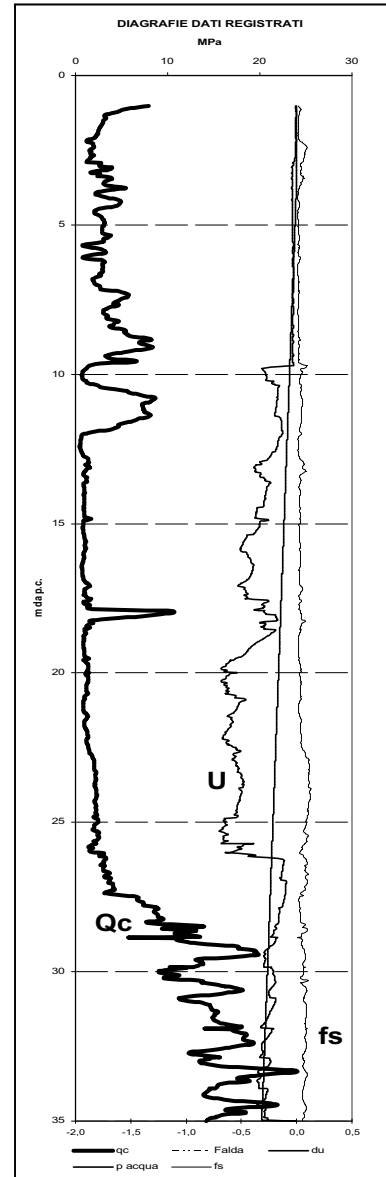
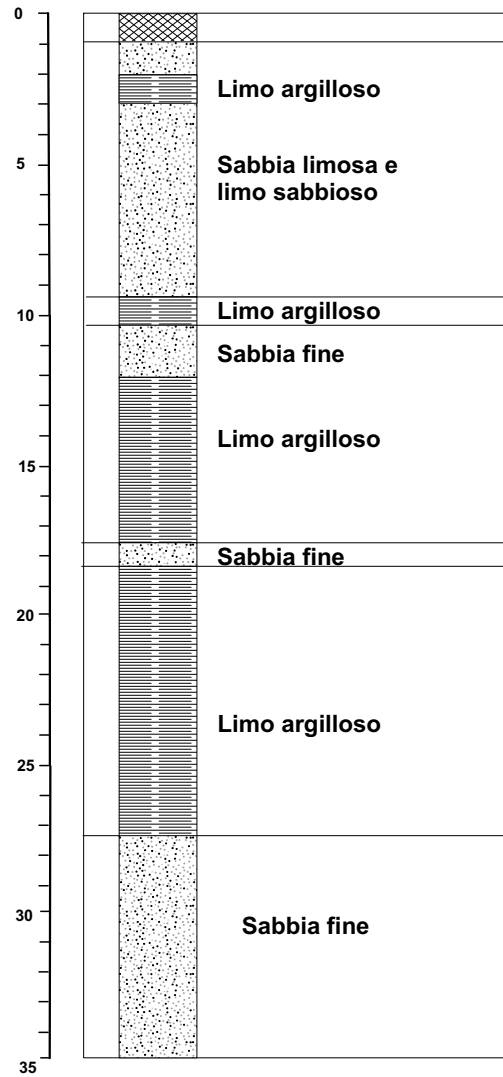
**Gmax** = Modulo di taglio massimo

**E01** = Modulo di elasticità a 0,1% di deformazione verticale

**Dr** = Densità relativa

00				FRESIA E.	FRESIA E.	FRESIA E.
REV. N.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO	
SOSTITUZIONE DELL'ELABORATO N°			SOSTITUZIONE DALL'ELABORATO N°			
REGIONE EMILIA ROMAGNA						
AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI FERRARA						
ADEGUAMENTO DELL'OPERA FERRARESE, NEL TRATTO DA FINALE DI RERO A M. ELARNO, AL TRAFFICO DROVARD DI CLASSE V EUROPEA						
PROGETTO DEFINITIVO						
Elaborazione dati prova penetrometrica statica cptu6						
Tav. 6						
ELABORATO N.:			REV. N°00			
DATA: Novem brr 2008			PROGETTAZIONE:			
CODICE CAD-FILE: cptu6 dsf			DIRETTORE TECNICO: DOTT. ING. M. RACOSTA			
OPERA PROTETTA AI SENSI DELLA LEGGE 22 APRILE 1941 N. 633 TUTTI I DIRITTI RISERVATI QUALSIASIR PRODUZIONE ED UTILIZZAZIONE NON AUTORIZZATE SARANNO PERSEGUITE A RHOE DILEGGE						

INTERPRETAZIONE DELLA STRATIGRAFIA

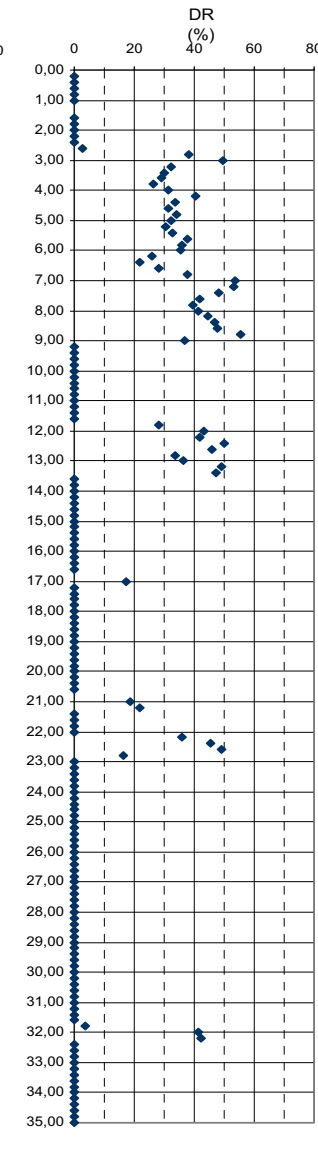
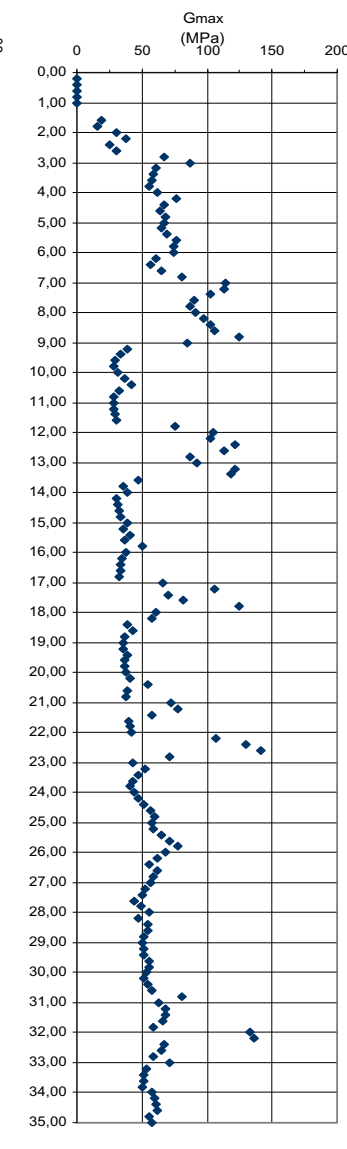
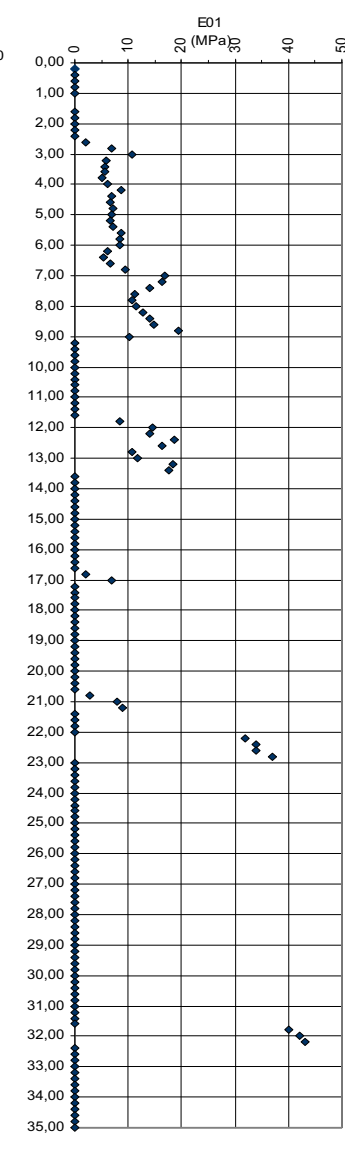
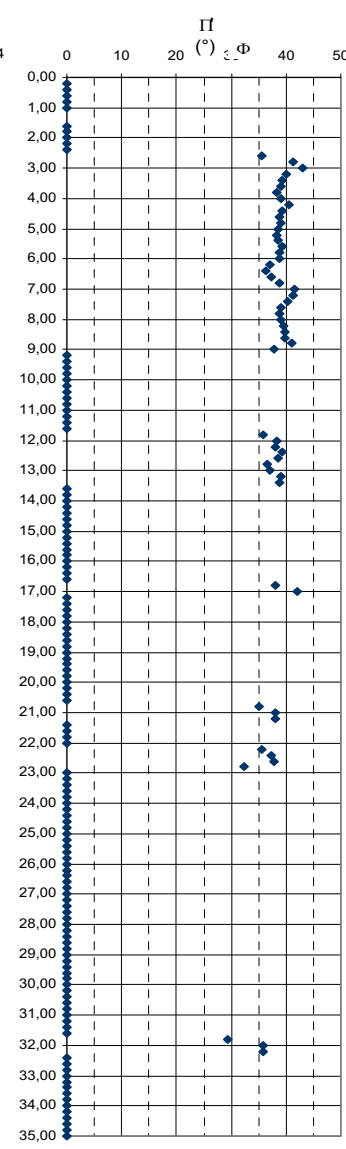
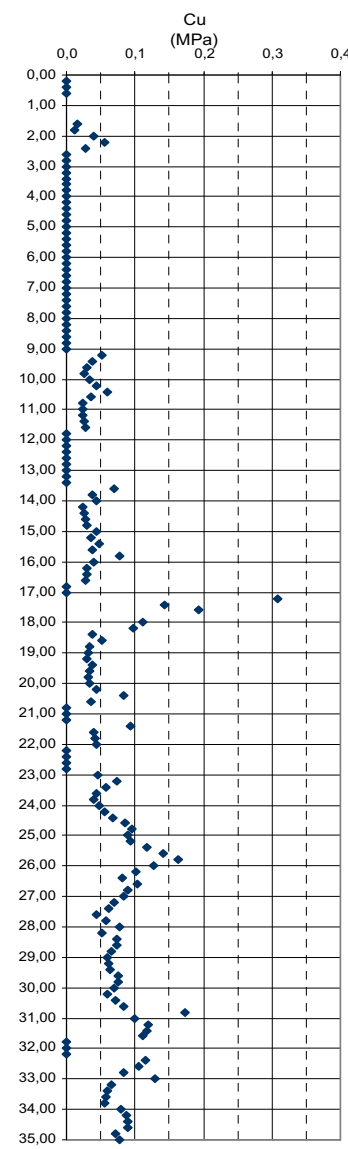
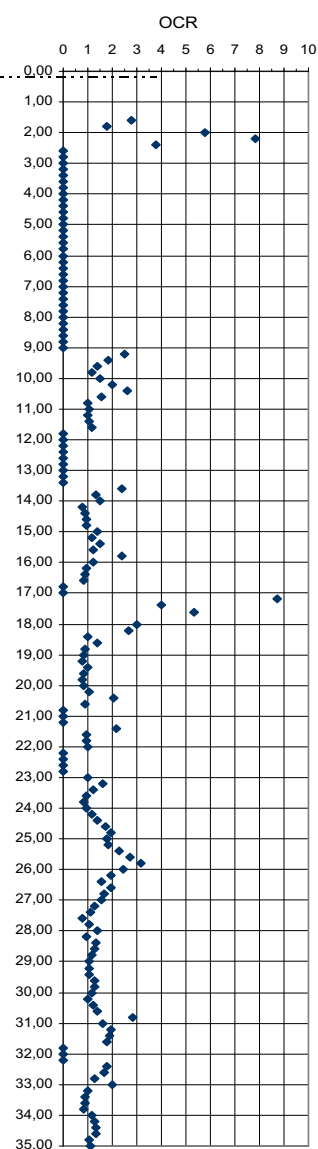
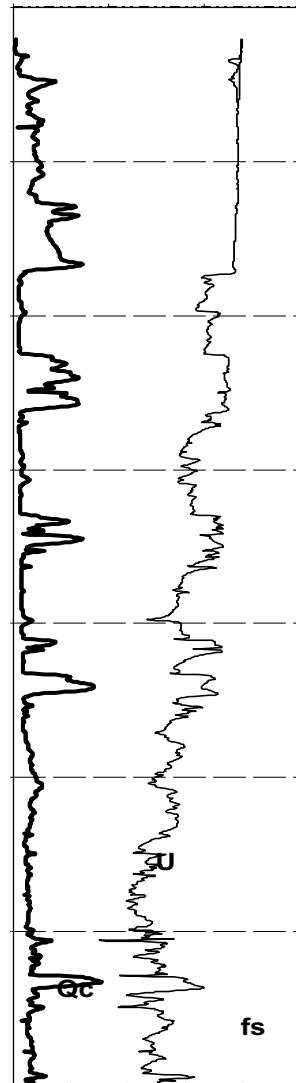
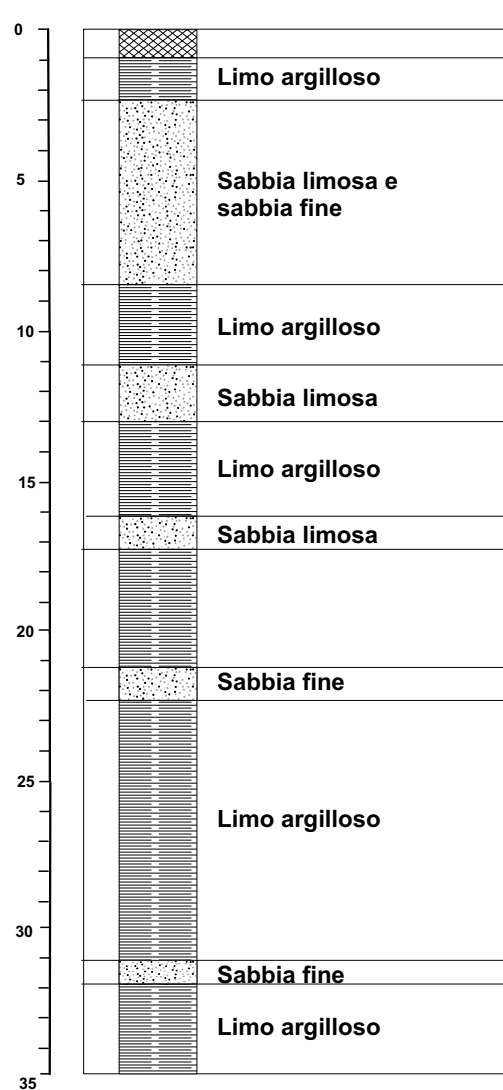


LEGENDA

- OCR = Grado di sovraconsolidazione
- Cu = Resistenza al taglio non consolidata non drenata
- F = Angolo di attrito di picco
- Gmax = Modulo di taglio massimo
- E01 = Modulo di elasticità a 0,1% di deformazione verticale
- Dr = Densità relativa

OP		FRESIA E	FRESIA E	MATTAROLO
REV. N.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORATO	VERIFICATO APPROVATO
SOSTITUISCE L'ELABORATO N°		SOSTITUISCE L'ELABORATO N°		
REGIONE EMILIA ROMAGNA				
AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI FERRARA				
ADEGUAMENTO DELL'ARCO FERRARESE, NEL TRATTO DA FINALE DI RENO A MELLARNO, AL TRAFFICO DROVARD DI CLASSE V EUROPEA				
PROGETTO DEFINITIVO				
Elaborazione dati prova penetrometrica statica cput1/08				
				Tav. 7
ELABORATO N.		REV. N°00		
DATA	Novembre 2008	PROGETTAZIONE		
CODICE CAD-FILE	cput1_08.dxf	DIRETTORE TECNICO	DOTT. ING. M. RACOSTA	
<small>OPERA PROTETTA AI SENSI DELLA LEGGE 22 APRILE 1941 N. 633 TUTTI I DIRITTI RISERVATI QUALSIVISIA PRODUZIONE ED UTILIZZAZIONE NON AUTORIZZATE SARANNO PERSEGUITE A RIGORE DI LEGGE</small>				

INTERPRETAZIONE DELLA STRATIGRAFIA



LEGENDA

- OCR = Grado di sovraconsolidazione
- Cu = Resistenza al taglio non consolidata non drenata
- F = Angolo di attrito di picco
- Gmax = Modulo di taglio massimo
- E01 = Modulo di elasticità a 0,1% di deformazione verticale
- Dr = Densità relativa

OP			FRESIA E	FRESIA E	MATTAROLO
REV. N.	DATA	DESCRIZIONE	ELABORATO	VERIFICATO	APPROVATO
SOSTITUIRE L'ELABORATO N°			SOSTITUIRE L'ELABORATO N°		
REGIONE EMILIA ROMAGNA					
AMMINISTRAZIONE PROVINCIALE DI FERRARA					
ADEGUAMENTO DELL'ITROVA FERRARESE, NEL TRATTO DA FINALE DI RERO A MELLARNO, AL TRAFFICO DROVARD DI CLASSE V EUROPEA					
PROGETTO DEFINITIVO					
Elaborazione dati prova penetrometrica statica cptu2/08					
Tav. 8					
ELABORATO N.			REV N°00		
DATA Novem bre 2008			PROGETTAZIONE		
CODICE CAD-FILE cptu2_08.dsf			DIRETTORE TECNICO : DOTT. ING. M. RACOSTA		
<small>OPERA PROTETTA AI SENSI DELLA LEGGE 22 APRILE 1941 N. 633 TUTTI I DIRITTI RISERVATI QUALSIVISIA PRODUZIONE ED UTILIZZAZIONE NON AUTORIZZATE SARANNO PERSEGUITE A REQUISITO DI LEGGE</small>					