

**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 GEOLOGIA  
DOTT. GEOLOG. EMANUELE FRESIA

RESPONSABILE DELLA PROGETTAZIONE  
DOTT. ING. MARCO LORA



Via Carlo Cattaneo, 20 - 37121 VERONA (VR)  
Tel. +39 045 8063611 - Fax. +39 045 8011558  
E-Mail: [technital@technital.it](mailto:technital@technital.it)

**PROGETTO ESECUTIVO**

**TITOLO ELABORATO:**

**Relazioni tecniche e specialistiche  
RELAZIONE GEOLOGICA,  
GEOMORFOLOGICA E SISMICA**

**ELABORATO N° :**

**I1134P-RT-004**

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

**NOME FILE :**

I1134P-RT-004\_1\_Relazione\_Geologica

**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 GEOLOGICA**

## 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
2.3	Principali strumenti di pianificazione territoriale consultati	8
3	DOCUMENTAZIONE DI PIANIFICAZIONE TERRITORIALE	9
3.1	PTCP di Ferrara	9
3.2	PSC Unione Comuni Terre e Fiumi	10
3.3	PUC di Ferrara	15
4	GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA	20
4.1	Premessa	20
4.2	Geologia	20
4.1	Geomorfologia	26
5	IDROGEOLOGIA	32
6	INDAGINI GEOGNOSTICHE	34
7	SISMICITA' DEL TERRITORIO	45
7.1	Caratteri generali	45
7.1	Normativa ed azione sismica	51
7.2	Pericolosità sismica	53
7.1	Risposta sismica locale	56
7.2	Liquefazione dei terreni	61
8	ANALISI DEI DATI GEOGNOSTICI	70
8.1	Prove di laboratorio	70
8.1	Prove CPT	81
8.2	Prove su pozzetti	81
9	MODELLO STRATIGRAFICO DI PROGETTO	83
10	CONCLUSIONI	93

## 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:

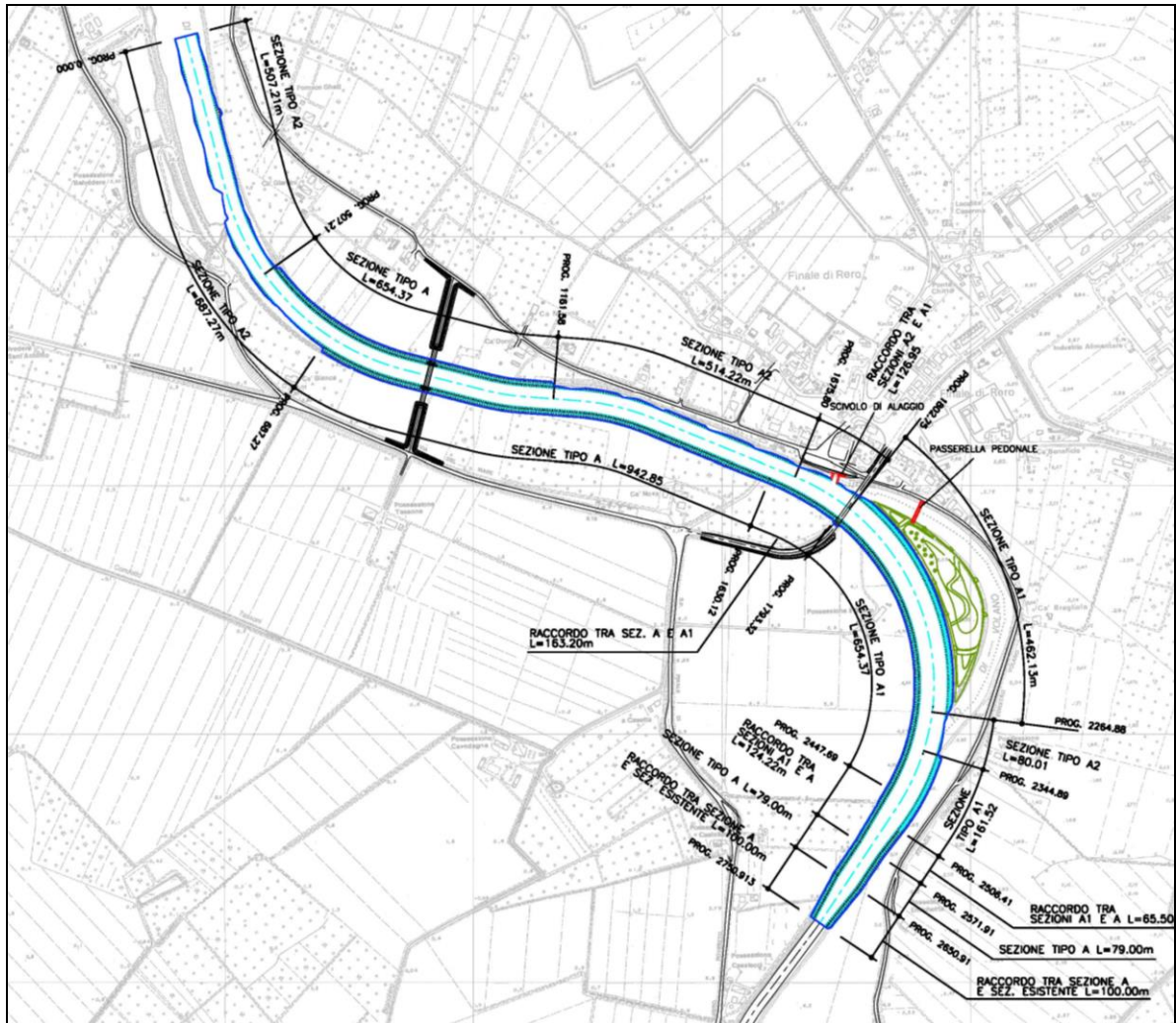
- Adeguamento della conca di navigazione di Valpagliaro alla Va Classe Europea;
- Adeguamento alla Va classe del tratto idroviario compreso tra la conca di Valpagliaro e la sezione terminale della modifica della curva di Finale di Rero (corrispondente alla sezione n° 56 ARNI) assicurando un rettangolo 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 geologica, 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 speci-

fiche 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**

Oggetto del presente rapporto sono i terreni ricadenti nell'area di progetto del primo stralcio dell'idrovia, fra la Conca di Valpagliaro e Final di Rero.

Lo scopo è quello di definire il modello geologico, geomorfologico e idrogeologico al fine di individuare tutti quegli elementi imponenti condizionamenti o vincoli alla progettazione.

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

## 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-008 Relazione geotecnica;
- II134P-CAR006 Planimetria generale con ubicazione indagini;
- II134P-CAR007 Carta geologica e geomorfologica;
- II134P-CAR008 Ponte Final di Rero Profilo geologico e geotecnico.

### **2.3 Principali strumenti di pianificazione territoriale consultati**

- Documentazione geologica, idrogeologica e sismica allegata al Piano Strutturale Comunale (PSC) dell'Unione dei Comuni Terre e Fiumi;
- Documentazione geologica, idrogeologica e sismica allegata al Piano Urbanistico Comunale (PUC) di Ferrara.
- Documentazione geologica, idrogeologica e sismica allegata al Piano Territoriale di Coordinamento Provinciale (PTCP) di Ferrara.

### 3 DOCUMENTAZIONE DI PIANIFICAZIONE TERRITORIALE

Nell'ambito del presente lavoro si è consultata la documentazione in chiave geologica di pianificazione territoriale reperibile, ed in particolare quella relativa al PTCP della Provincia di Ferrara e, ad un maggiore dettaglio, del PSC dell'Unione dei Comuni Terre e Fiumi per la riva sinistra del Po di Volano (comuni di Formignana e Final di Rero) e del PUC di Ferrara per la riva destra.

#### 3.1 PTCP di Ferrara

Dalla carta geologica del PTCP di Ferrara risulta lungo il Po di Volano la presenza di depositi sabbiosi di paleoalveo contornati da sabbie alternate a limi sabbiosi e argillosi, che disegnano fasce allungate e rialzate rispetto al piano campagna circostante. Terreni di natura fine sono prevalenti esternamente a tali fasce.

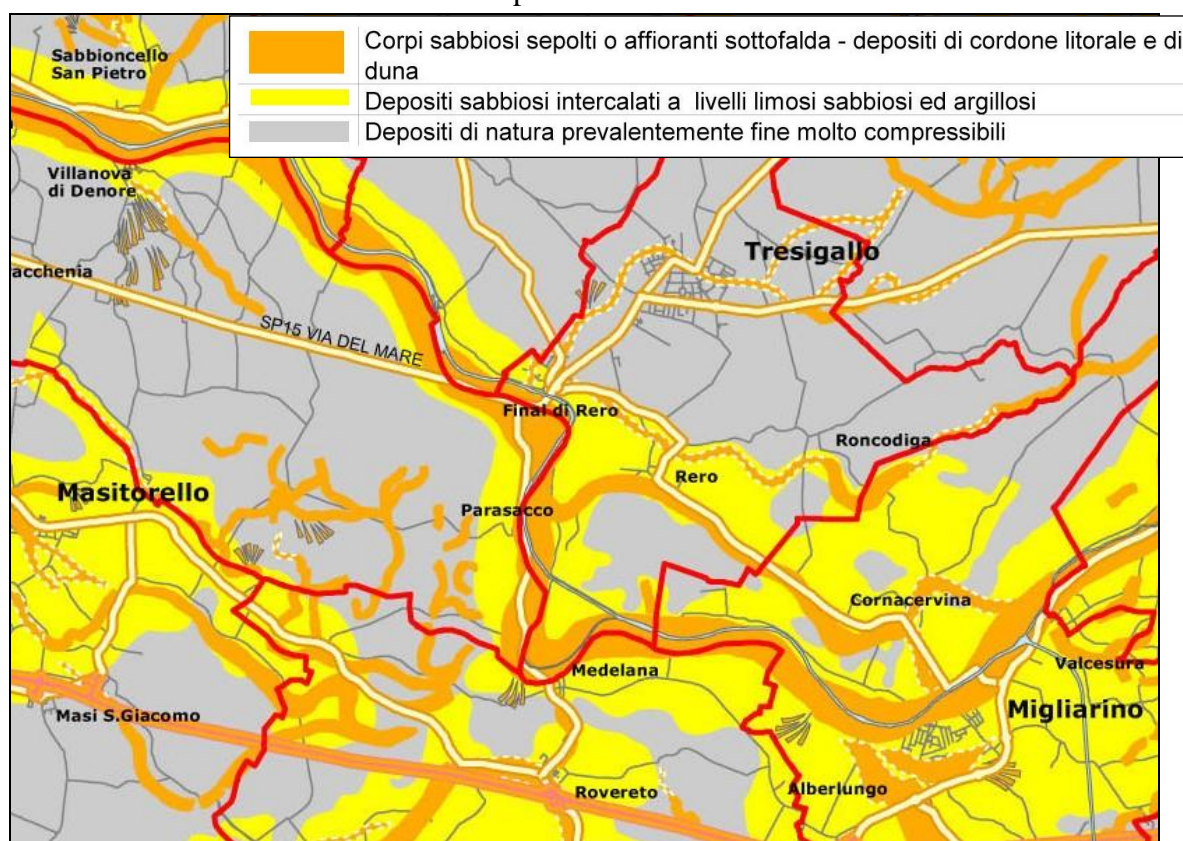


Figura 2 Carta geologica PTCP Ferrara

La carta geomorfologica del PTCP riconosce la presenza di un paleoalveo lungo il percorso Po di Volano con una ramificazione che si stacca appena a sud di Rero. Stretti paleoalvei di incerta ubicazione si riconoscono più a nord e ad est.

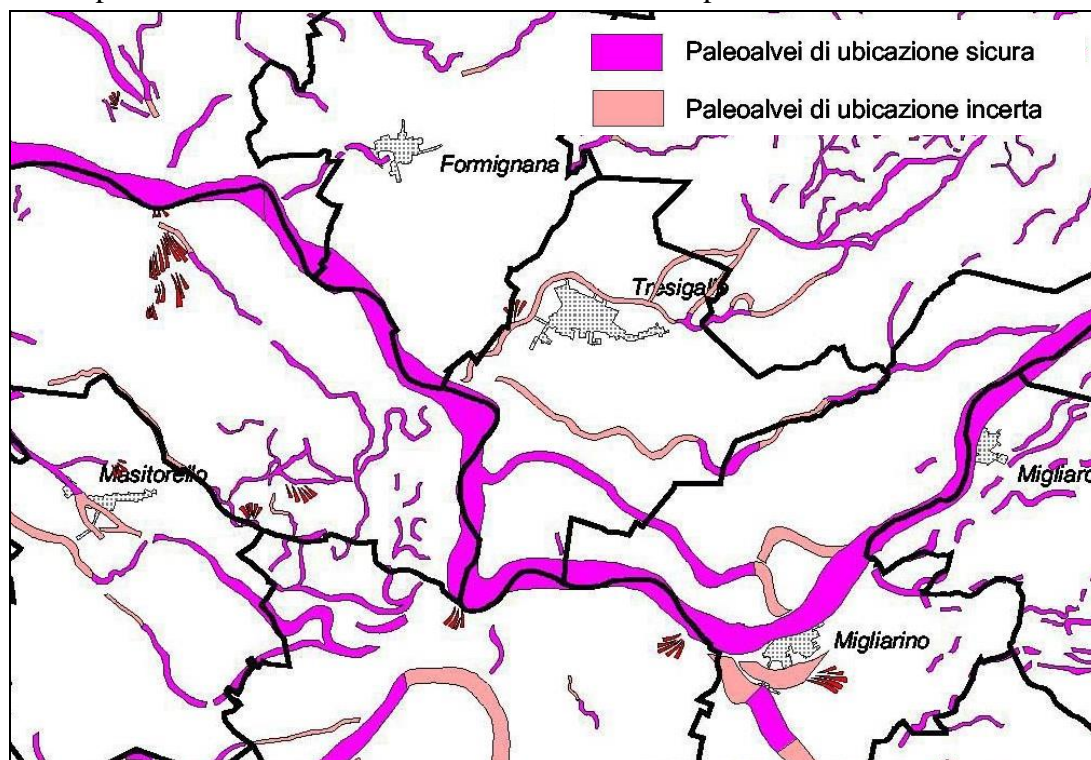
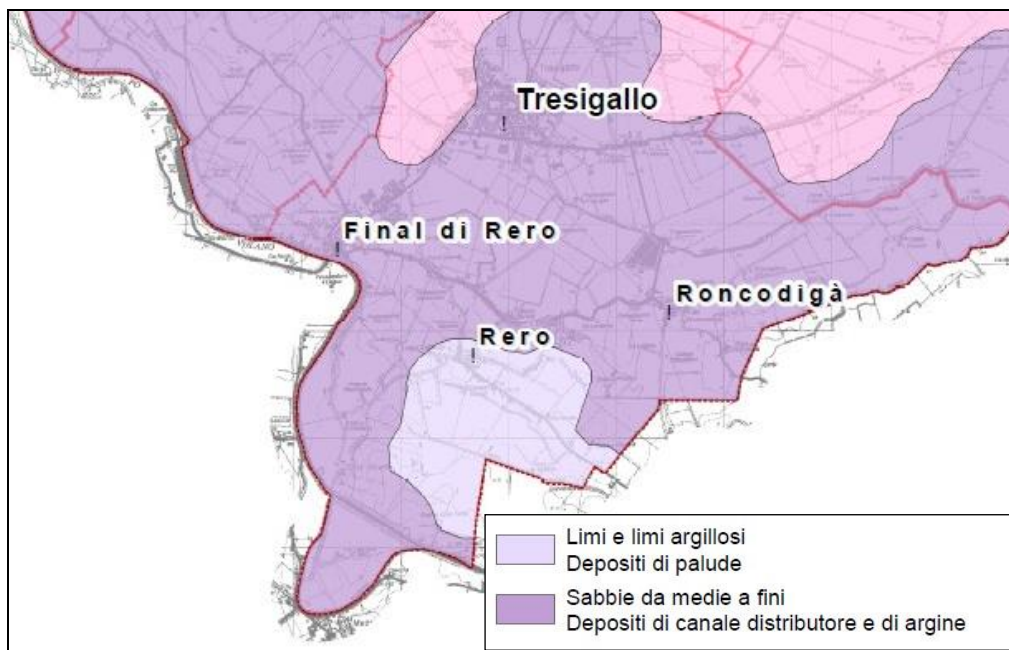


Figura 3 Carta geomorfologica PTCP di Ferrara

### 3.2 PSC Unione Comuni Terre e Fiumi

Con riferimento al PSC dell'Unione dei Comuni Terre e Fiumi la carta geologica riconosce depositi costituiti da sabbie medie e fini con aree a composizione limoso argillosa attribuite a depositi in ambiente di calma che occupano, in particolare, "l'interfluvio" fra i due paleoalvei ad est del sedime di progetto.

Nella carta geomorfologica coerentemente si riscontra un paleoalveo lungo l'idrovia, una seconda diramazione a valle di Rero oltre a paleoalvei di ubicazione incerta.

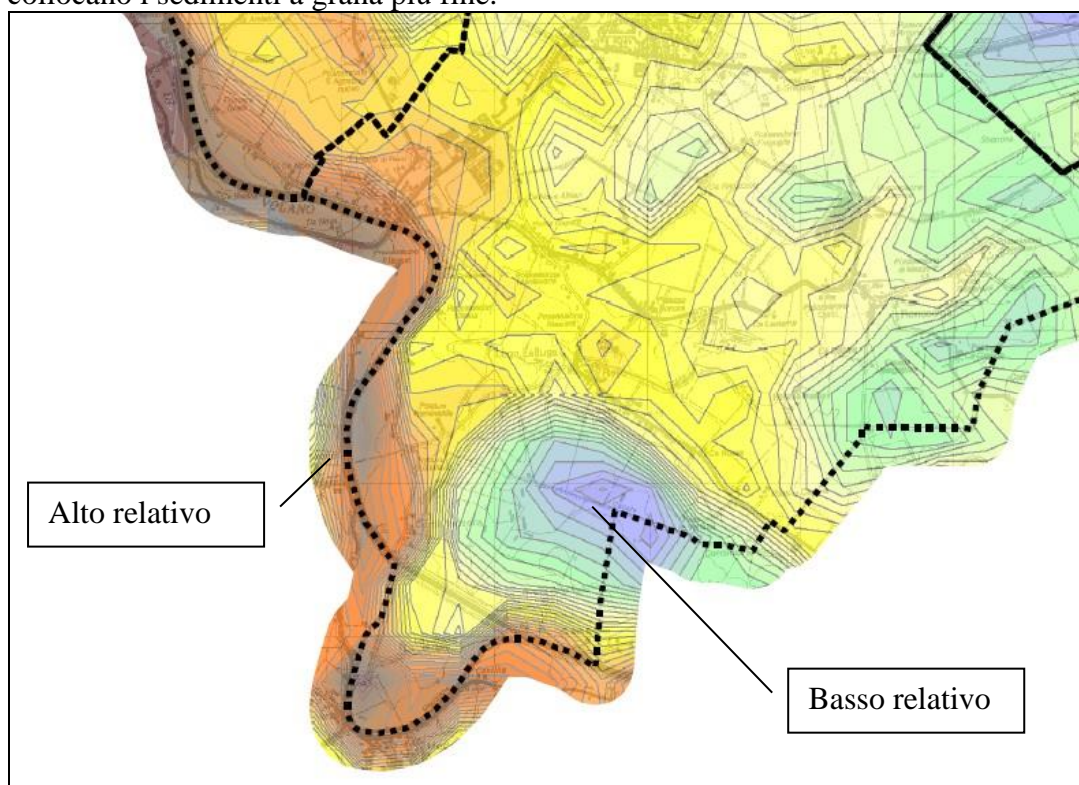


**Figura 4 Carta geologica PSC Comuni Terre e Fiumi**



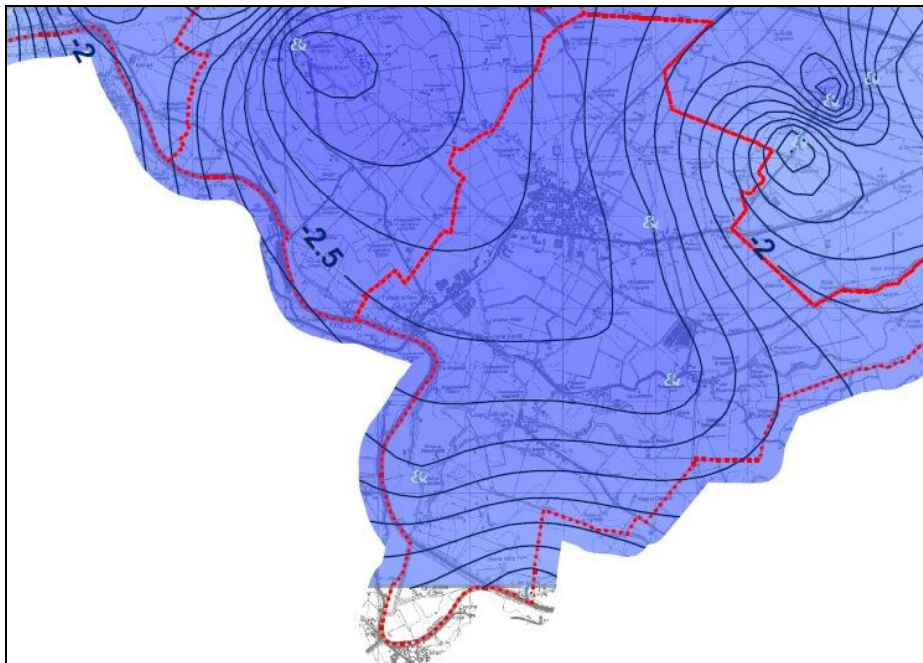
**Figura 5 Carta geomorfologica PSC Comuni Terre e Fiumi**

La carta del microrilievo permette di apprezzare la rispondenza fra la morfologia e le condizioni geolitologiche e geomorfologiche, con la condizione di “alto relativo” del paleoalveo lungo il quale scorre il Po di Volano e di basso nell’interfluvio entro cui si collocano i sedimenti a grana più fine.

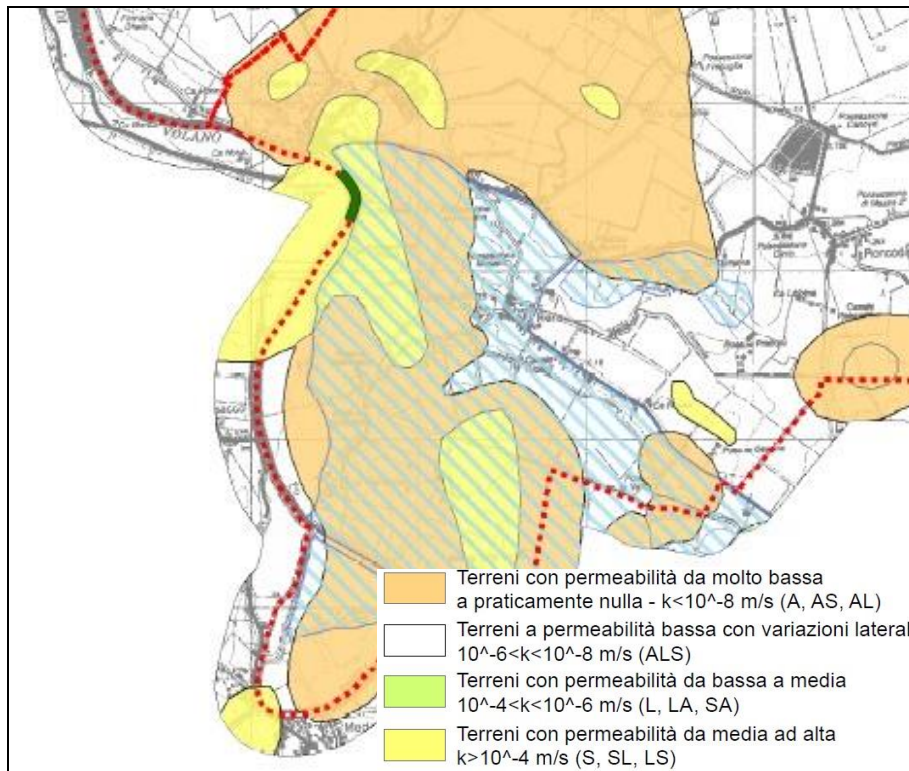


**Figura 6 Carta del microrilievo del PSC Comuni Terre e Fiumi**

La carta delle isobate riporta una profondità media di falda di circa 2,0 – 2,5 m con una serie di irregolarità attribuibili alla presenza di pozzi sparsi nel territorio. Significa una profondità da p.c. circa variabile fra 2 m e 4 m da p.c. in funzione della quota locale. In un contesto di terreni a moderata permeabilità la carta della vulnerabilità idrogeologica riconosce lungo la parte centrale e meridionale dell’idrovia in progetto condizioni di permeabilità da media ad alta ( $K > 10^{-4}$  m/s); da ciò congiuntamente alla bassa profondità della falda possono dedursi condizioni di alta vulnerabilità idrogeologica. Bassa permeabilità ( $K$  fra  $10^{-6}$  e  $10^{-8}$  m/s) nella porzione settentrionale fra Valpagliaro e Final di Rero per una vulnerabilità da media a medio bassa.

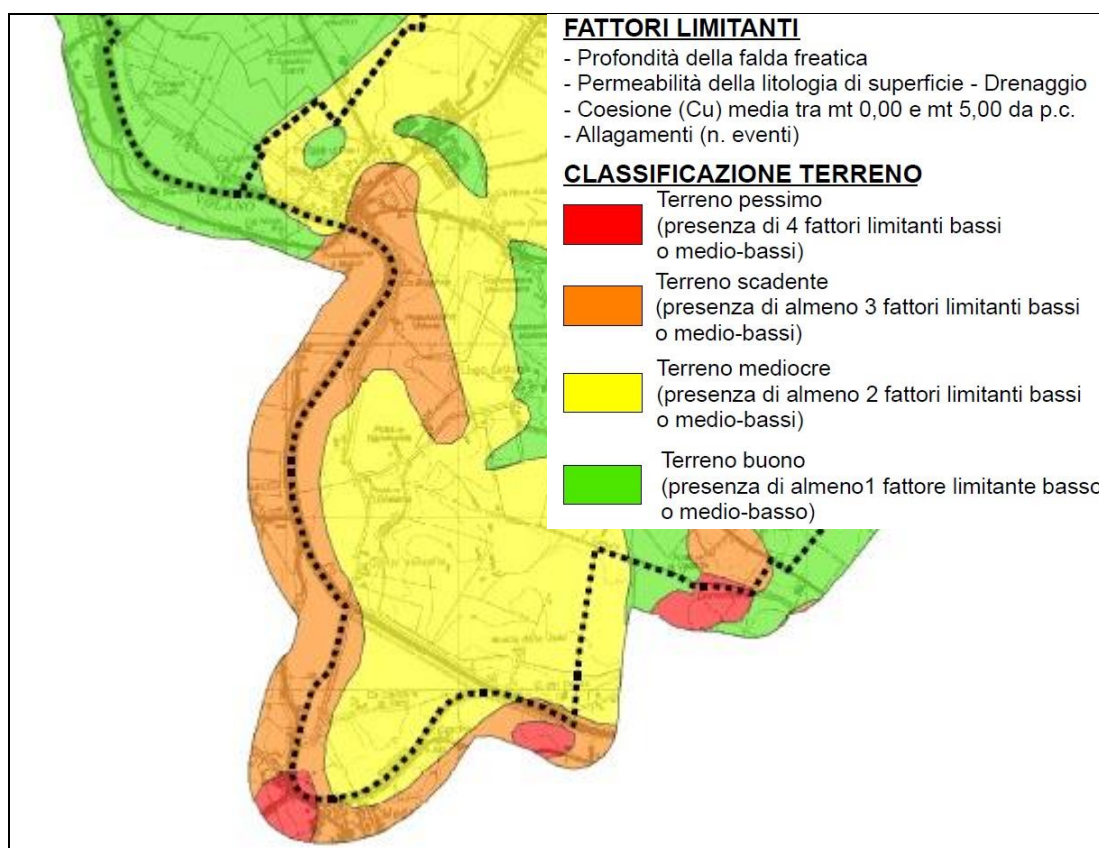


**Figura 7 Carta delle isobate del PSC Comuni Terre e Fiumi**



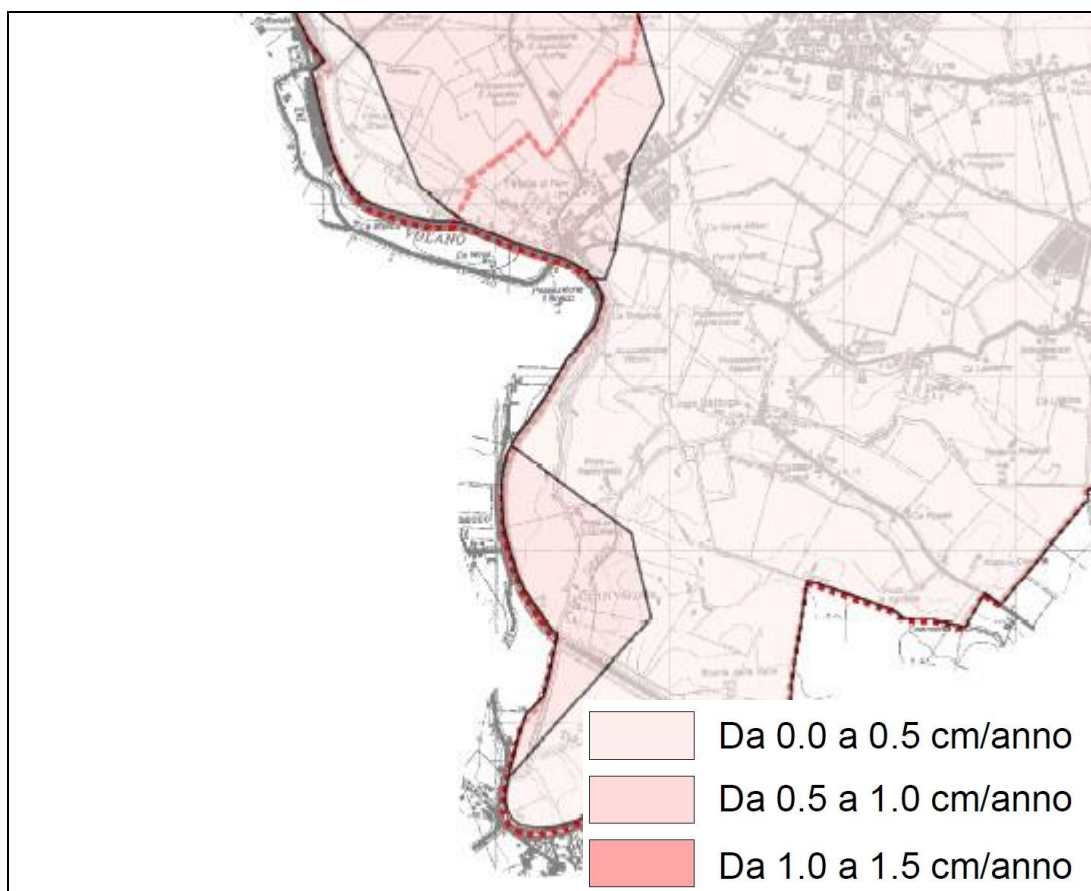
**Figura 8 Carta della vulnerabilità idrogeologica del PSC Comuni Terre e Fiumi**

La carta delle penalità ai fini edificatori del PSC in funzione del numero di elementi limitanti censiti riporta nel settore settentrionale dell'idrovia un terreno definito come buono, e nella porzione centrale e meridionale un terreno scadente.



**Figura 9 Carta delle penalità ai fini edificatori del PSC Comuni Terre e Fiumi**

La carta della subsidenza relativa agli anni 2002-2006 rileva valori generalmente compresi nel range 0-0,5 cm/anno (il più basso cartografato) nel sedime di progetto, con un'area circoscritta intorno all'abitato di Finale di Rero che rientra nel range da 0,5 a 1 cm/anno.



**Figura 10 Carta della subsidenza del PSC Comuni Terre e Fiumi**

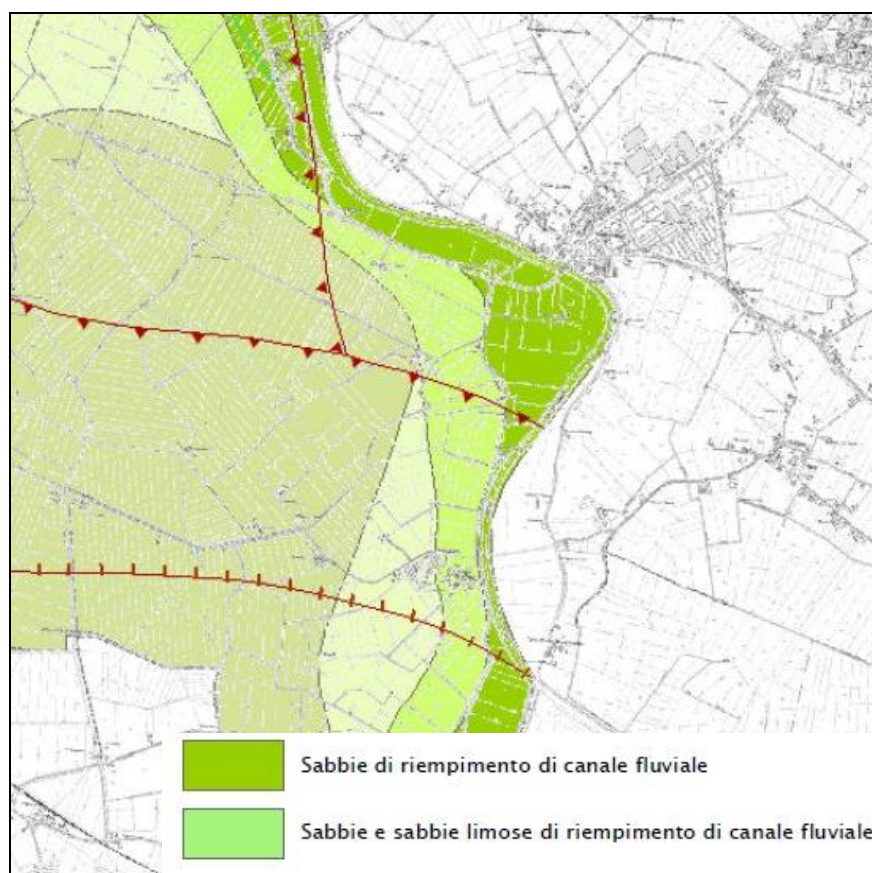
### 3.3 PUC di Ferrara

La documentazione consultata relativa al PUC di Ferrara è in linea con quanto sopra esposto.

La carta geologica riconosce lungo il sedime di progetto prevalenti depositi sabbiosi e/o sabbioso limosi di riempimento di canale fluviale della piana alluvionale e deltizia del Fiume Po. In profondità, al di sotto della coltre alluvionale, ed in seno al substrato roccioso, è nota la presenza di fronti di sovrascorrimento e retroscorrimento.

La carta geomorfologica riporta un paleoalveo chiaramente elevato sul territorio lungo il Po di Volano, un secondo paleoalveo dossivo basso, e ulteriori tracce di paleoalvei spinati e non dossive. Non sono presenti forme di esondazione nel sedime progettuale ma solo più a sud, in prossimità di Medelana.



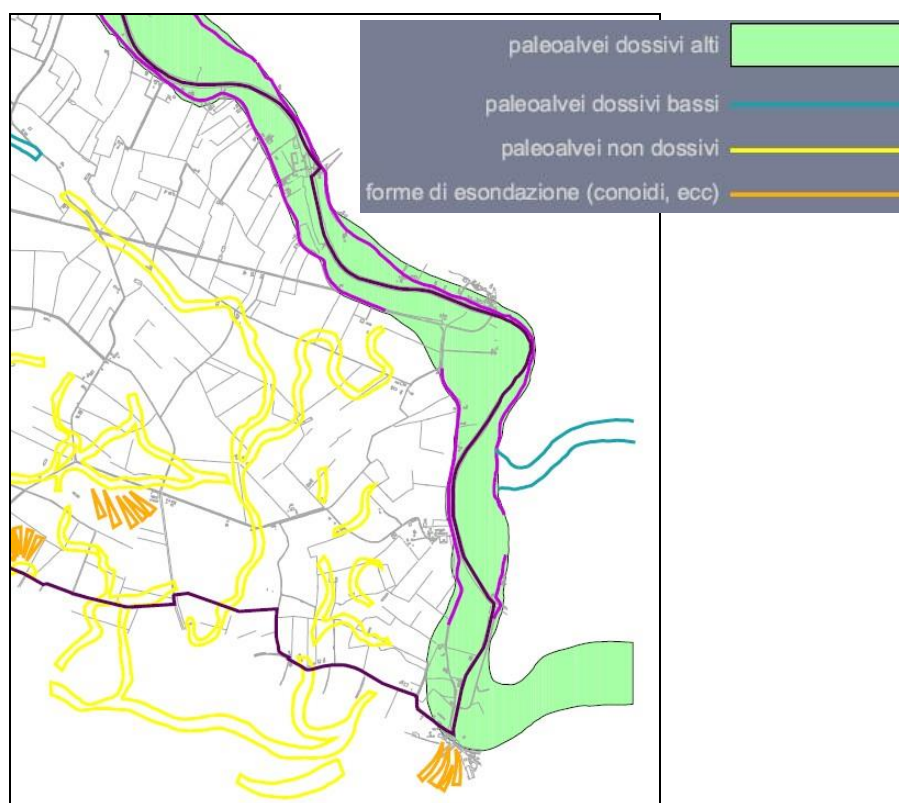


**Figura 11 Carta geologica del PUC di Ferrara**

La carta delle isofreatiche riporta una quota media di falda attorno al Po di Volano di circa 2 m slm che decresce allontanandosi da esso a quote inferiori ad 1m slm, ovvero profondità circa variabili fra 4 m e 2 m da p.c. Questo significa che il Po di Volano sembra costituire un asse di alimentazione per la falda.

Nella carta di sintesi delle penalizzazioni sismiche e idrogeologiche il sedime di progetto corrisponde ad un paleoalveo per il quale, comunque esternamente al tracciato idroviario che costituisce una zona di alto morfologico, si segnala una falda a modesta profondità. Le indagini disponibili riportano un potenziale di liquefazione basso ed un rischio cedimenti presente.

Nella carta della subsidenza relativa al periodo 1990-1999 il limite orientale del territorio comunale è quello che ha i più bassi valori trovandosi oltre l'isocinetica 5mm/anno, mentre i valori più elevati sono nel quadrante NW con punte anche di 9 mm/anno.



**Figura 12 Carta geomorfologica del PUC di Ferrara**

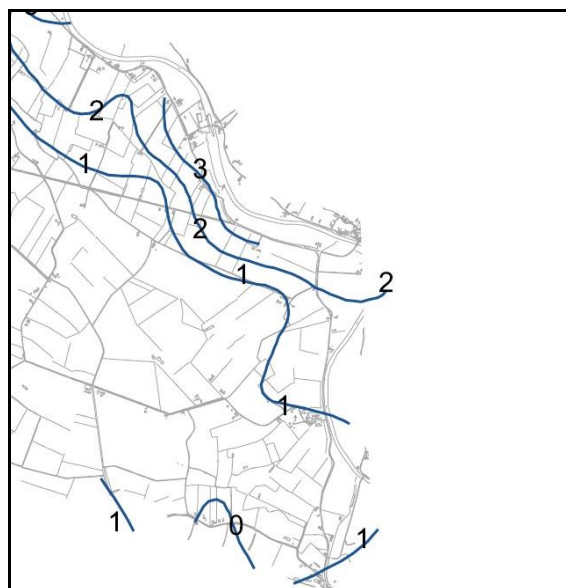


Figura 13 Carta delle isofreatiche del PUC di Ferrera

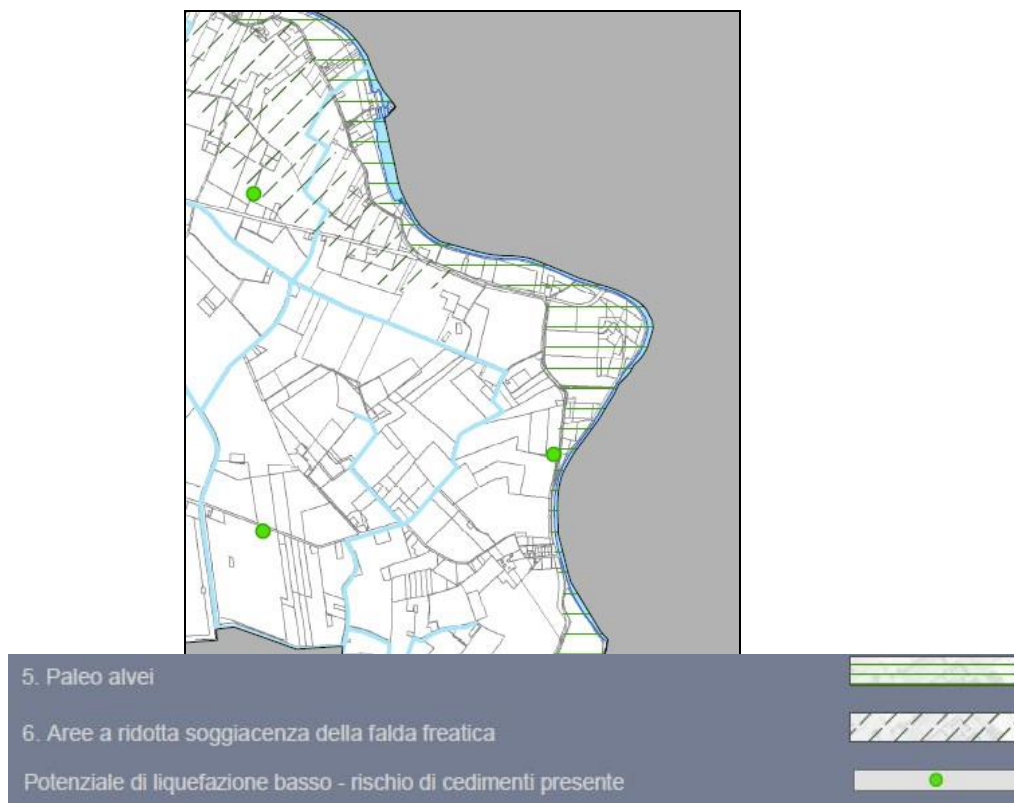
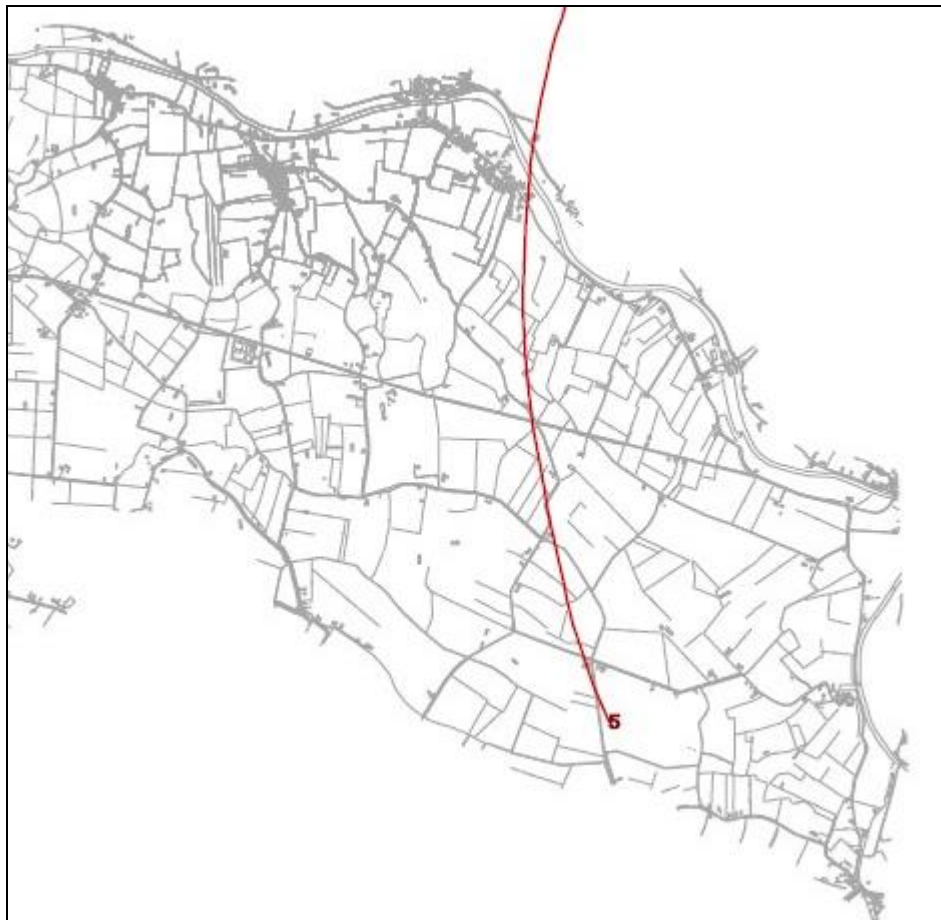


Figura 14 Carta di sintesi delle penalizzazioni sismiche e idrogeologiche del PUC di Ferrera



**Figura 15** Carta della subsidenza del PUC di Ferrara. Isocinetiche di abbassamenti del suolo (mm/anno)

## 4 GEOLOGIA E GEOMORFOLOGIA

### 4.1 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.

### 4.2 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.

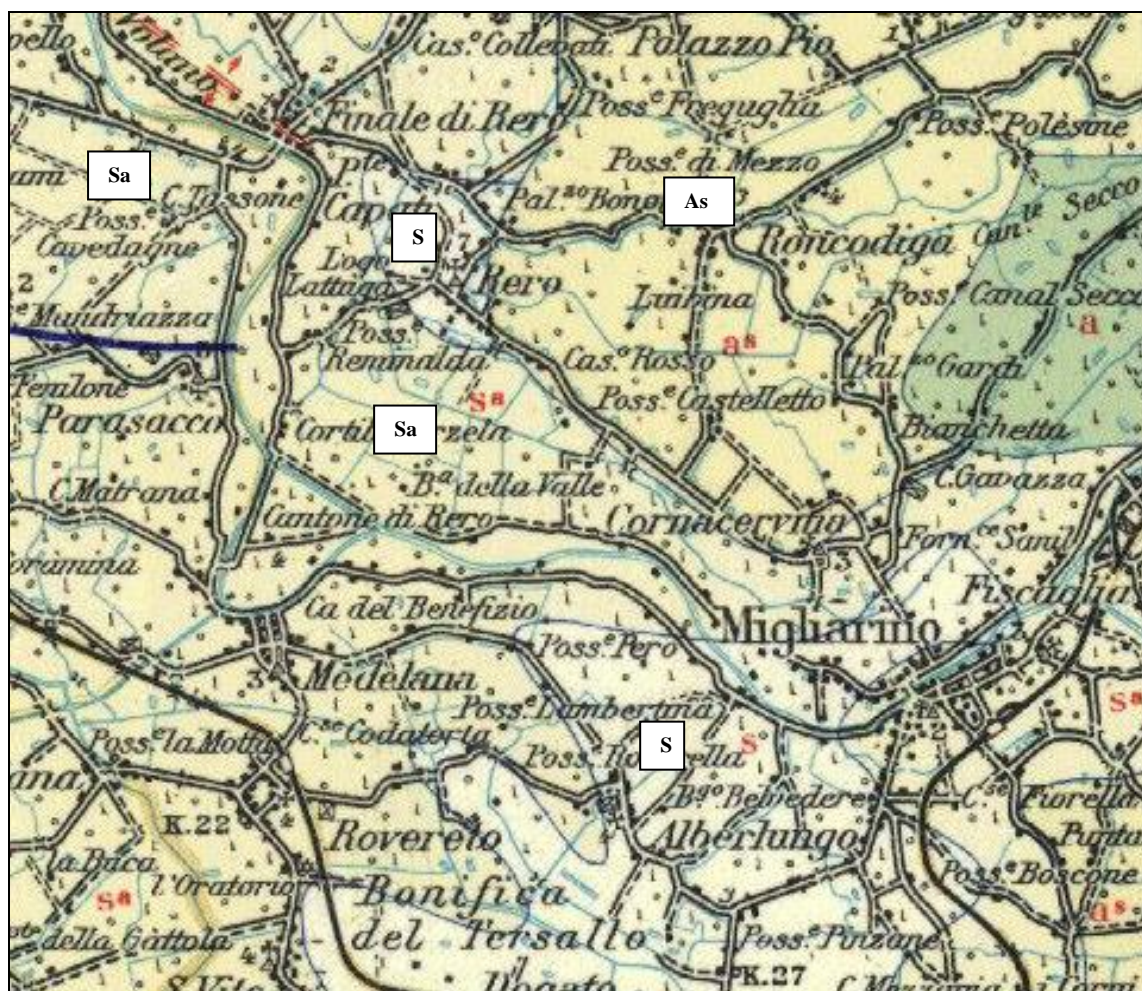


Figura 16. Stralcio del foglio Ferrara della Carta geologica d'Italia fra Finale di Rero e Migliarino

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.

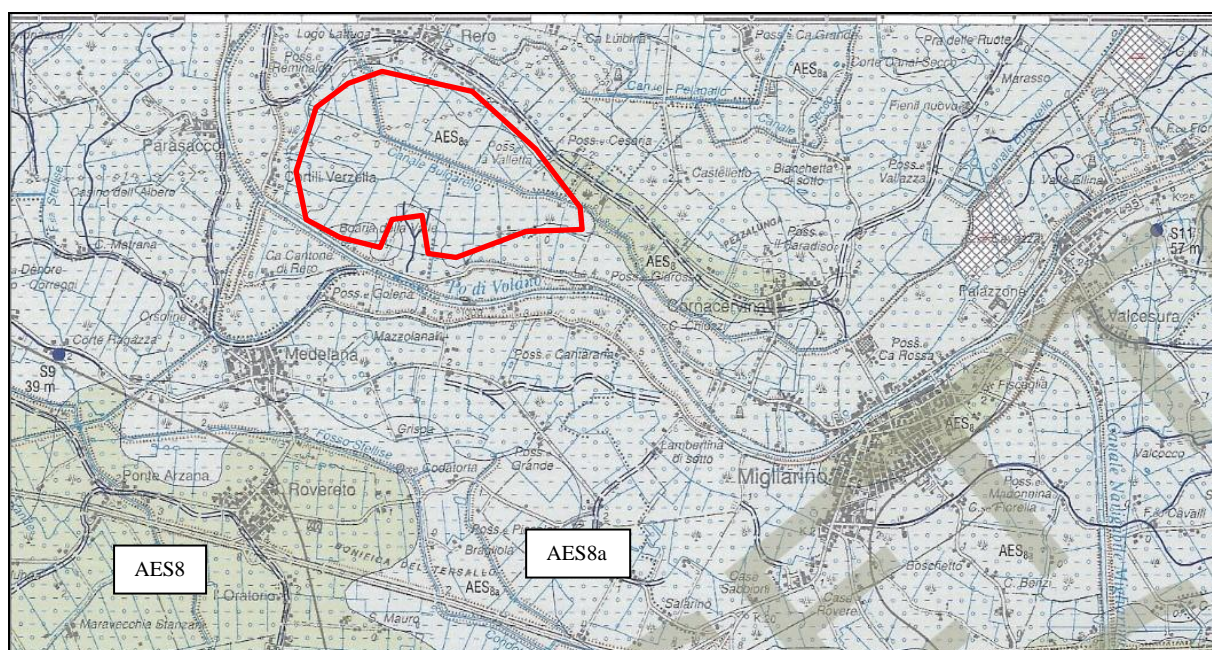
L'ISPRA ha da tempo in elaborazione la carta geologica d'Italia in scala 1:50.000 che rappresenta un vero e proprio approfondimento e aggiornamento della precedente cartografia al 100.000. Lo stato di avanzamento della produzione è molto variabile da regione a regione; in Emilia Romagna la cartografia 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 17, 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 17 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.

Per meglio inquadrare la genesi e l'evoluzione del territorio nelle precedenti fasi progettuali è stato condotto un raffronto fra cartografie afferenti a diversi periodi.

Il primo documento esaminato risale al 1814 e rappresenta la "Carta del Basso Po" stampata a cura dell'IBC e dell'Amministrazione Provinciale di Ferrara in scala 1:32.000. Uno stralcio relativo al territorio in argomento è riportato in figura 18. Qui sono evidenti le tipologie d'uso dei suoli, le sistemazioni idrauliche riferite alla fine del '700, le aree depresse di ristagno temporaneo delle acque (prati e pascoli di colore verde scuro e blu intenso, vedi zona a sud di Rero) le zone soggette a sommersione dei corsi d'acqua, pascoli sortumosi o valli zappative (grigio-verde). L'idrografia è attendibile e minuziosamente definita, così la toponomastica e l'ubicazione delle case iso-

late e dei centri. Tuttavia la stesura dei colori non sempre è decifrabile per cui risulta di difficile lettura la differenziazione delle colture.



**Figura 18. Carta del Basso Po (anno 1814)**

Il secondo documento rappresenta la *“Topografia della Provincia del Ferrarese ..con l’indicazione dei lavori idraulici eseguiti da 1767 al 1836”* dell’Ing. T. Barbantini (lavoro di aggiornamento di una carta precedente del 1825). Uno stralcio relativo all’area in studio è riportato in figura 19.

Sono ben evidenti i centri abitati ed i tracciati delle strade, vengono indicate inoltre le valli, le zone umide e l’idrografia principale (particolarmente definito risulta il paleoalveo del Po di Volano).



**Figura 19. Topografia della Provincia del Ferrarese**

Dall'esame della documentazione descritta si evince come il territorio in esame sia originato da sedimentazioni fluviali che, partendo da una posizione di dosso costituita dai paleoalvei, formano un "catino" dai bordi rialzati. Sono evidenti anche le trasformazioni idrauliche determinate dalla Grande Bonifica Ferrarese (bonifica delle Valli di Ambrogio) con opere di miglioria delle reti di scolo, formazione di arginature e rettifiche dei canali principali.

#### **4.1 Geomorfologia**

Per quanto attiene l'assetto geomorfologico e ad integrazione di quanto riportato nel capitolo relativo alla documentazione di pianificazione territoriale, in figura 20 si ri-

porta uno stralcio della Carta Geomorfologica del PIAE della Provincia di Ferrara. Ancora una volta appare evidente la struttura di alto morfologico, o di dosso, legata all'andamento del Po di Volano già evidente nelle cartografie precedenti, litologicamente 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, già segnalata, dove peraltro (rif: carta geologica) sono prevalenti i depositi argilloso sabbiosi.



**Figura 20** Carta geomorfologica PIAE provincia di Ferrara (stralcio)

Ad integrazione di quanto già rappresentato in figura 6, nella successiva Figura 21 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.

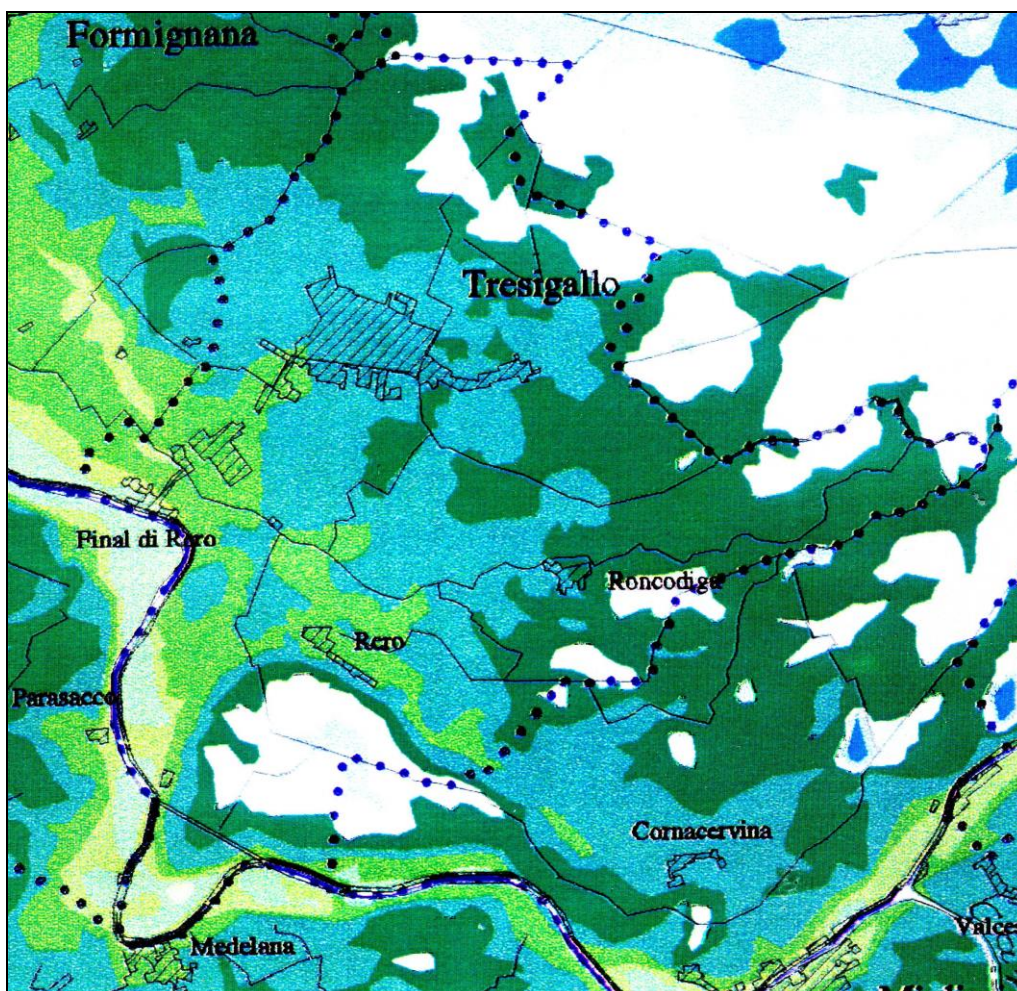


Figura 21 Carta altimetrica della Provincia di Ferrara (stralcio)

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 Roncodigà.

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

Il riconoscimento delle diverse morfologie e litologie presenti sul territorio è possibile anche mediante l'analisi delle foto aeree, sfruttando la discriminazione dei diversi toni di grigio che definiscono zone a diversa umidità, vegetazione e composizione del terreno. Le tracce chiare solitamente corrispondono a materiali con alto potere riflettente e/o ben drenanti, quindi più facilmente asciutti (ad esempio sabbie); le tracce più scure corrispondono a materiali meno riflettenti e meno permeabili, quindi più umidi (per esempio limi ed argille).

I sedimenti grossolani permeabili, poco costipabili e di tonalità più chiara, disegnano morfologie più alte e solitamente allungate che corrispondono ad argini naturali e paleoalvei.

I materiali fini, più costipabili e con maggiore tenore di sostanza organica, sono solitamente testimoni di bacini, stagni ed ambienti di bassa energia e descrivono conseguentemente aree depresse, umide, di colore più scuro.

In termini litostratigrafici le particelle grossolane, come le sabbie, vengono depositate in prossimità degli alvei, in corrispondenza delle zone di sbocco, di rotta o di tracimazione, mentre quelle più fini (limi e argille) vengono deposte assai lontano e in tempi più lunghi. Effetto di tale meccanismo è che i fiumi tendono ad essere limitati da argini naturali, sabbiosi, a giacitura più elevata rispetto alle zone interfluviali.

In prossimità della rete idrica principale gli apporti sedimentari riescono sempre a compensare la subsidenza; in particolare il bilancio tra apporti e subsidenza è positivo. Per contro nelle zone interfluviali tale bilancio risulta negativo, con conseguente formazione di aree depresse a geometria imbutiforme.

Tali variazioni morfologiche hanno favorito, storicamente, spostamenti dei corsi d'acqua i cui apporti sedimentari vengono ripartiti nello spazio (quindi lateralmente) e nel tempo (verticalmente) giustificando la possibile variabilità stratigrafica che contraddistingue queste aree di pianura.

Tale contesto ha contribuito a rendere instabile il territorio e precaria l'attività agricola.

Con l'azione di bonifica fin dai tempi storici si è contrastata la fragilità di tali paraggi portando alla regolarizzazione plano-altimetrica del terreno, all'irrigazione ed alla costituzione di canali drenanti per mantenere il franco agricolo.

In particolare le zone depresse di origine palustre, oggetto di bonifica (Grande Bonificazione Estense) sono distinte in funzione delle caratteristiche geometriche in:

- zone depresse circoscritte;
- zone depresse parzialmente circoscritte.

Tra le prime si cita la depressione già menzionata tra il Po di Volano e di Rero, per le seconde il bordo meridionale delle valli di Ambrogio e Iolanda della Grande Bonificazione Ferrarese. Per quanto esposto risulta evidente come l'originaria distribuzione dei litotipi di superficie sia oggi complicata dal rimaneggiamento delle pratiche agricole, dalle opere di bonifica e dagli interventi per infrastrutture e canalizzazioni.

Gli elementi che si sono conservati, al di là delle trasformazioni temporali e delle interazioni fra le varie componenti antropiche sono:

- paleoalvei (dossi fluviali);
- ventagli di esondazione;
- zone depresse circoscritte e non.

Tra i primi si ricorda ancora una volta il paleoalveo del Po di Volano, per l'importanza ed il ruolo morfologico ed idrogeologico che riveste. Questo corso d'acqua risulta infatti essere un ramo molto antico del Fiume Po che, prima della rotta di Ficarolo avvenuta nel dodicesimo secolo, aveva dimensioni e portate maggiori di quelle odierne. Attualmente il Po di Volano per tutto il percorso rappresenta un importante vettore di acque di scolo e di irrigazione.

Il paleoalveo del Rero attraversa il territorio in direzione Rero-Cornacervina rappresentando probabilmente l'antico corso del Po di Volano menzionato nella "Guida del Ferrarese" di U. Malagù (1982). Ecco pertanto il superstite nome del piccolo borgo di Rero, derivante dall'originario insediamento sviluppatosi sulle rive della omonima corrente fluviale ormai perduta.".

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 trattienga 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.



## 5 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 (vedi anche figura 7). 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.

## 6 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;

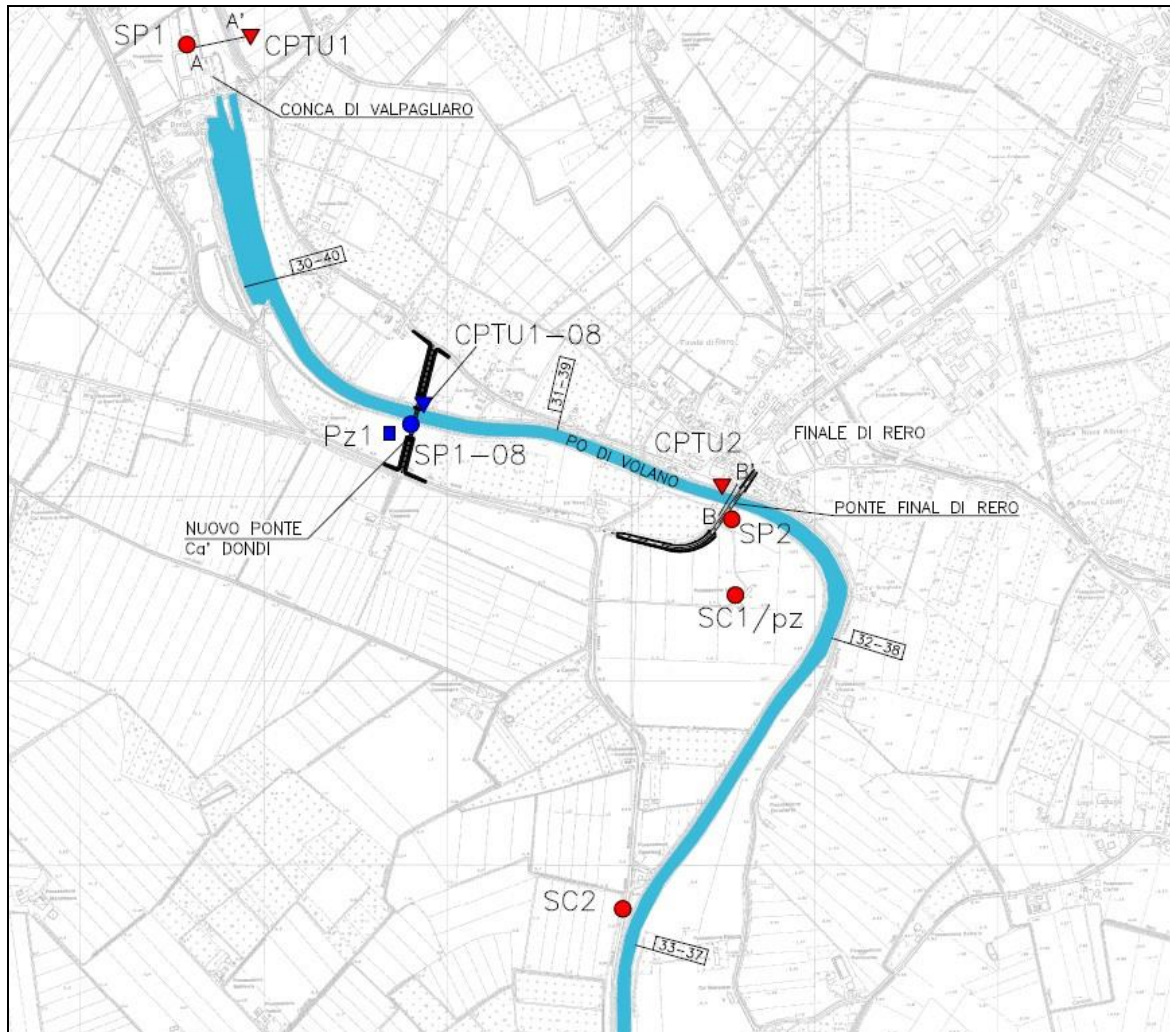
- n° 2 pozzetti esplorativi con prove di carico con piastra in corrispondenza dei rilevati di approccio al ponte di Cà Dondi e Migliarino.

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 22 e 23 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 22 Stralcio planimetrico ubicazione indagini 2004 e 2008**



Figura 23 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 (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-004_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	5,0-5,5,0	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-004_1
----------------------	---------	-----------------------

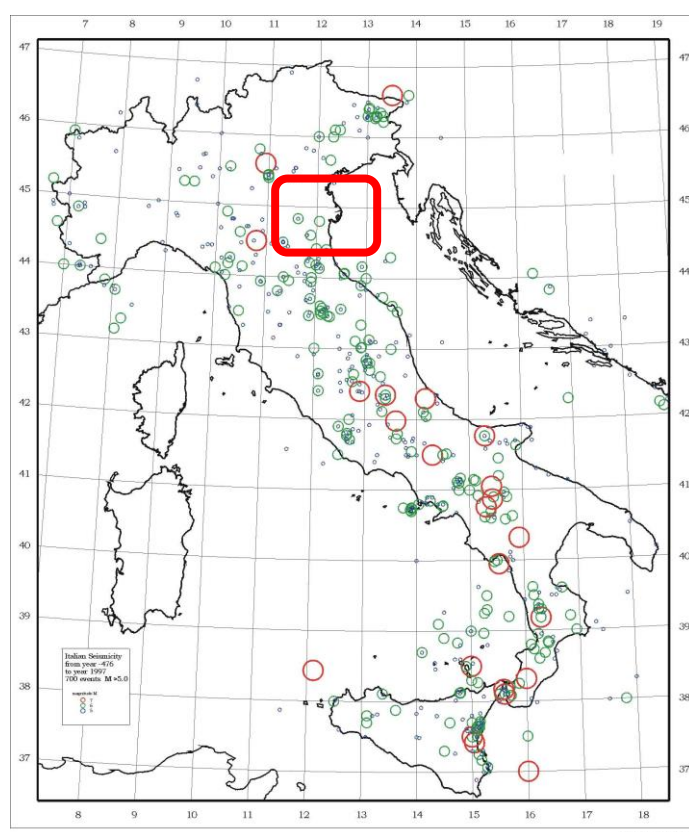
I pozzetti sono stati eseguiti mediante una terna gommata ed hanno raggiunto la profondità di 1,5 m da p.c.

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.

## 7 SISMICITA' DEL TERRITORIO

### 7.1 Caratteri generali

La figura seguente mostra schematicamente la distribuzione nazionale degli eventi sismici più significativi registrati dal 476 AC al 1997 DC per Magnitudo  $\geq 5$ .



**Figura 24. Sismicità dell'Italia dal 476 AC al 1997 DC (eventi con  $M > 5$ )**

Dal punto di vista geologico strutturale l'area in studio ricade all'interno della "Dorsale Ferrarese" dove, al di sotto delle potenti coltri alluvionali, è presente un sistema orogenicamente legato alla catena appenninica, fagliato da importanti linee sismotettoniche, la cui genesi è riconducibile a forze compressive che da sud ovest spingono verso nord est. Lo spessore dei sedimenti quaternari è importante, per cui questo materasso contribuisce significativamente all'attenuazione dell'energia sismica; questo fattore ha probabilmente una pari rilevanza rispetto alle amplificazioni dovute al passag-

gio da corpi più rigidi a corpi più molli nel condizionare le modalità di propagazione dell'energia sismica.

Si può quindi intuire come l'Emilia Romagna non sia esente da una per quanto relativamente modesta sismicità storica. Il ferrarese in particolare è stato interessato da una sequenza sismica nel maggio 2012, ma già precedenti cronache riportano di eventi sismici associati a danni, ad esempio nel febbraio 1346 quando “*cascarono molte case, palazzi e torri*”.. (Giacomo da Marano XIX sec). Così fu anche per il terremoto del 1570 di magnitudo calcolata 5,5 il cui evento principale del 17 novembre diede inizio ad una sequenza sismica durata quattro anni; la documentazione storica oltre agli effetti distruttivi su edifici e monumenti ricorda una brusca variazione del Po a Stellata e fenomeni di liquefazione dei terreni. Altri e successivi eventi degni di nota registrati a Ferrara sono avvenuti nel 1695 (M=4) nel 1743 (M=4,6) e nel 1787 (M=4).

A livello regionale i maggiori terremoti ( $M \geq 5$ ) si sono verificati nel settore sud orientale, in particolare nell'Appennino Romagnolo e lungo la costa riminese. Altri settori interessati da sismicità frequente, ma generalmente di minore energia, sono il margine appenninico padano fra la Val d'Arda e Bologna, l'arco della dorsale ferrarese ed il crinale appenninico (Fonte: *Note illustrative della Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna, anno 2004*).

La tabella 8 riepiloga le massime intensità macrosismiche osservate nella Provincia di Ferrara (Fonte: *sito web Regione Emilia Romagna*). Si evince come la magnitudo massima registrata su base provinciale in base al catalogo dei terremoti storici sia compresa fra 5,4 e 6,1, con  $M_w = 5,6$  per Ferrara, Formignana, Tresigallo e Migliarino, Comuni nei quali si sviluppa l'idrovia in progetto.

Il Comune di Ferrara è dotato di Piano Strutturale, aggiornato ed integrato nella parte sismica e geotecnica con l'approvazione del Regolamento Urbanistico Edilizio del 15.05.2012, supportato da indagini per la microzonazione sismica di terzo livello e da una relazione e cartografia tecnica del 2013 a cura degli ing. Fioravante e Giretti dell'Università di Ferrara. Le ipotesi di cui si è tenuto conto nelle valutazioni della microzonazione sismica di terzo livello del comune di Ferrara sono di Massima Magnitudo attesa  $M = 6,14$  (in linea con i massimi valori di tabella 9) ed accelerazioni mas-

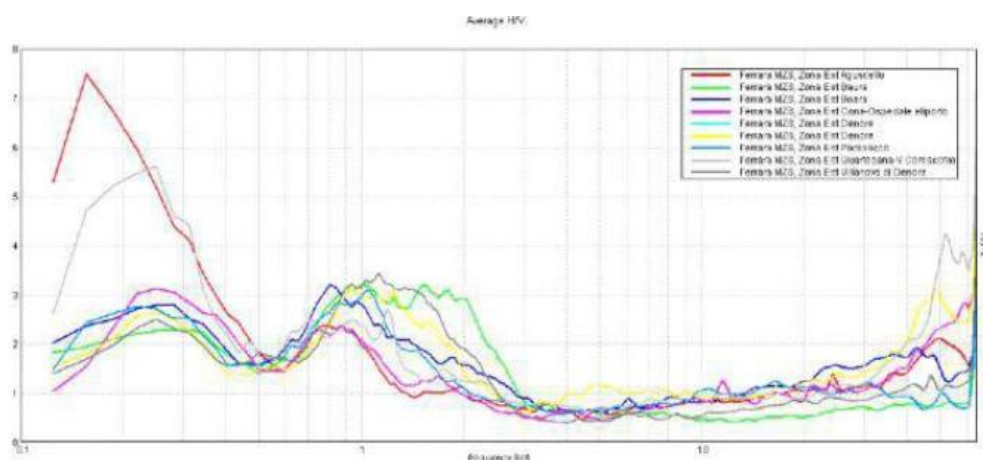
sime attese su suolo rigido (PGA) di 0,132. Questo ha portato al calcolo di fattori di amplificazione  $F_{APGS}$  attorno ad un valore medio di 0,5.

Comune	Lat.	Lon.	Imax	Mw
Argenta	44.61459	11.83658	9	6.1
Argenta	44.61459	11.83658	9	6.1
Bondeno	44.88857	11.41666	8	5.6
Cento	44.72685	11.28937	7	5.2
Codigoro	44.83096	12.10568	?6	4.8
Comacchio	44.69444	12.18290	7	5.2
Copparo	44.89391	11.82986	8	5.6
Ferrara	44.83559	11.61842	8	5.6
Formignana	44.84187	11.85894	8	5.6
Jolanda di Savoia	44.88518	11.97726	7	5.2
Lagosanto	44.76249	12.13965	7	5.2
Masi Torello	44.79369	11.79704	8	5.6
Massa Fiscaglia	44.80818	12.01334	7	5.2
Mesola	44.92060	12.23033	?6	4.8
Migliarino	44.77058	11.93149	8	5.6
Mirabello	44.82534	11.46031	8	5.6
Ostellato	44.74751	11.94085	8	5.6
Poggio Renatico	44.76571	11.48392	8	5.6
Portomaggiore	44.69759	11.80509	8	5.6
Ro	44.94634	11.76146	8	5.6
Sant'Agostino	44.79258	11.38519	8	5.6
Vigarano Mainarda	44.84191	11.49759	8	5.6
Voghiera	44.75737	11.75011	8	5.6
Tresigallo	44.81771	11.89393	8	5.6
Goro	44.85334	12.30076	?6	4.8
Migliaro	44.79835	11.97311	7	5.2

**Tabella 8. Massime intensità macrosismiche osservate per la Provincia di Ferrara**

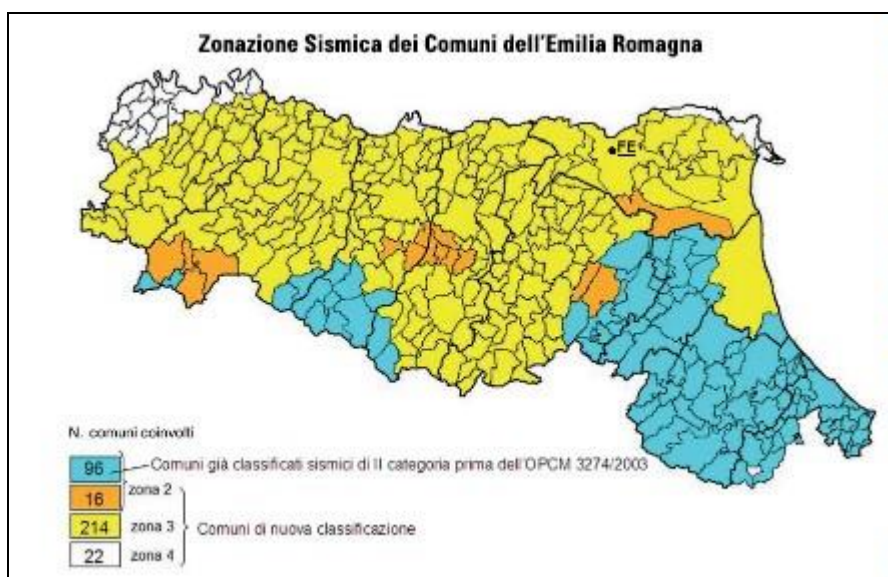
Restando nel territorio comunale di Ferrara e più specificatamente nella sua zona orientale gli studi eseguiti riconoscono due frequenze caratteristiche: un massimo a bassissima frequenza di 0,25 Hz e un altro a bassa frequenza 0,7-1,1 Hz. Questi valori evidenziano due interfacce risonanti a diversa profondità riconosciute come il tetto delle sabbie marine quaternarie a elevata profondità, e la base delle alluvioni del Pliocene medio poste >100-130 m di profondità. La frequenza tipica dei terreni investigati nella zona est del ferrarese compresa fra 0,76 Hz – 0,79 Hz (T=1,27 – 1,32 sec) conferma una discontinuità a profondità nell'ordine di 130-150 m.





**Figura 25 Curve HVSR zona est di Ferrara (Relazione per il PSC)**

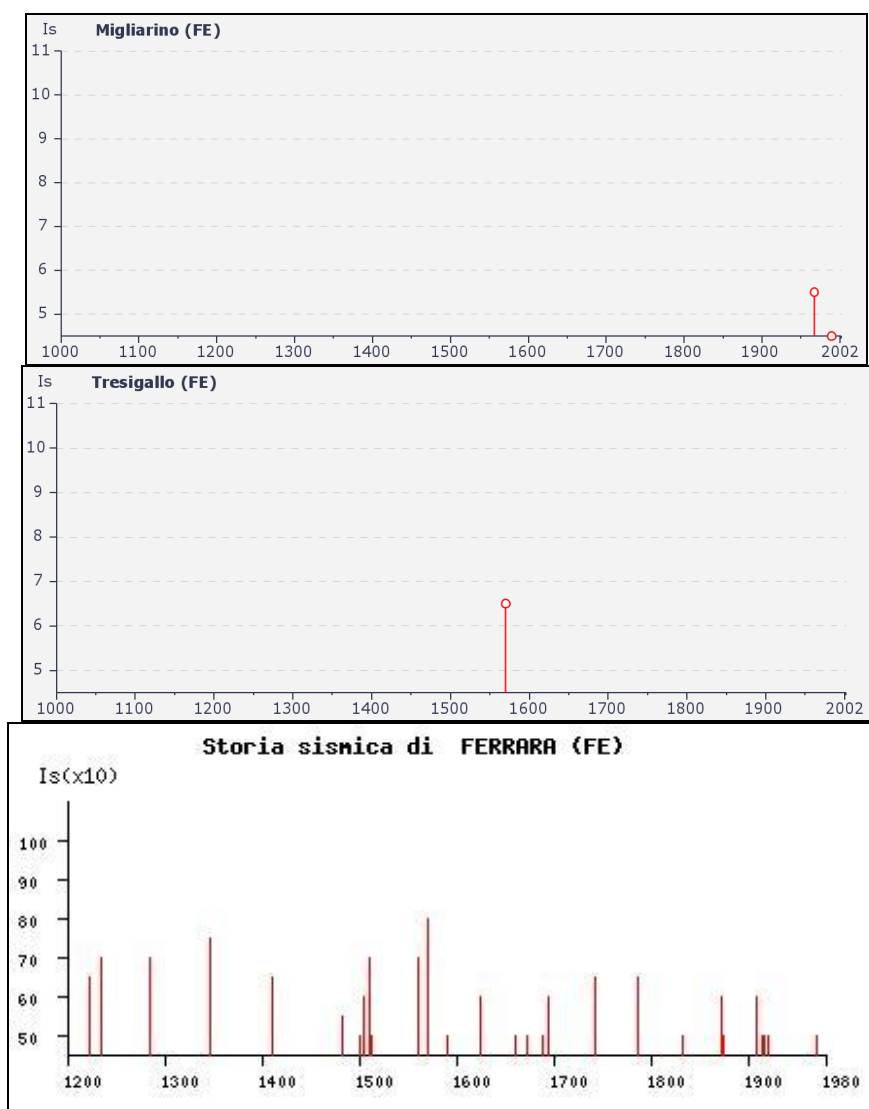
Fino all’OPCM 3274 del marzo 2003 i comuni dell’Emilia Romagna erano classificati per la maggior parte in classe 3 a pericolosità sismica bassa, rientrando in classe 2 a pericolosità media solo quelli posti nei quadranti meridionali e sud orientali. Tutti i comuni della Provincia di Ferrara sono in classe 3, ad eccezione di Argenta classificata in classe 2, ed i comuni di Berra, Mesolo e Goro in classe 4.



**Figura 26 Zonazione sismica comuni dell’Emilia Romagna**

Dalla banca dati del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti per l’abitato di Migliarino e Tresigallo con riferimento a sismi di intensità pari o superiore ad Is (intensi-

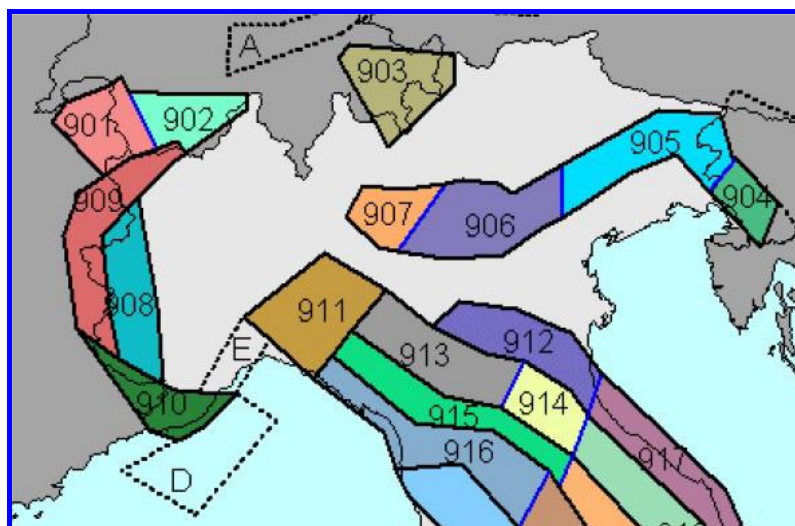
tà al sito – MCS) a 4,5, dall’anno 1000 al 2002 vengono forniti i dati di figura 33. Maggiori informazioni si hanno per la città di Ferrara con 86 registrazioni. La massima intensità registrata in città è pari a 8.0 nell’anno 1570.



**Figura 27** Sismi con  $I_s > 4,5$  a Migliarino, Tresigallo e Ferrara (banca dati INGV)

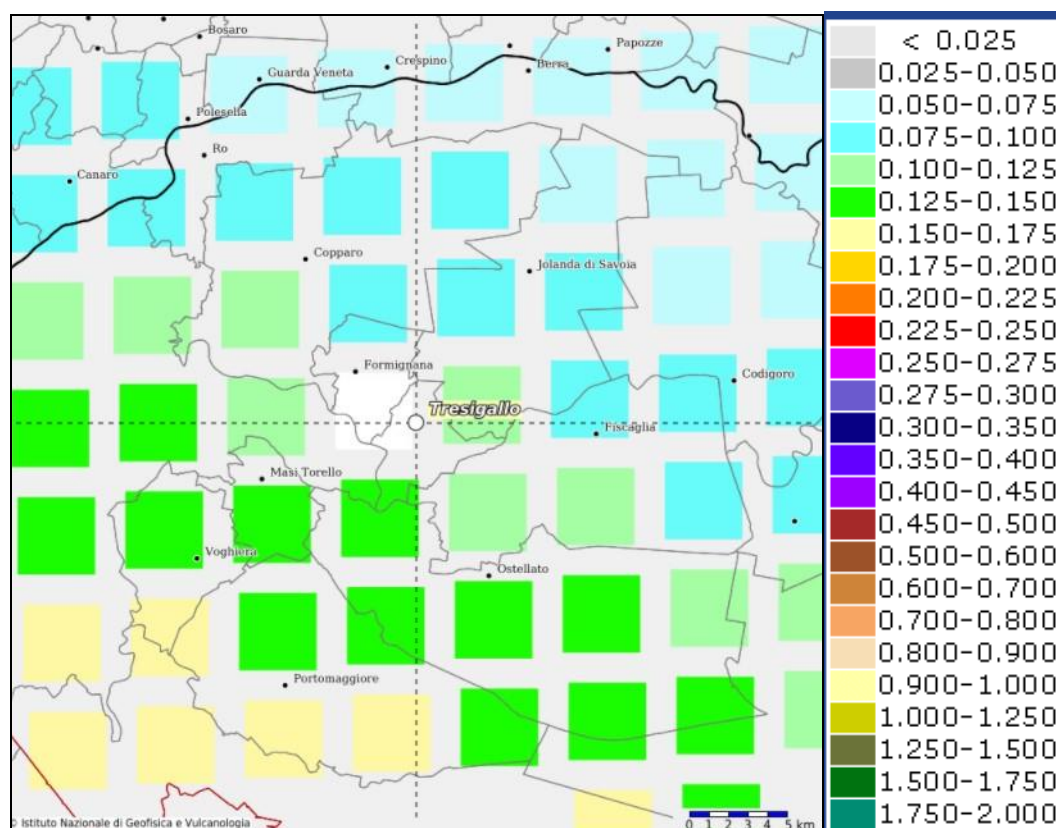
Con la Mappa di Pericolosità Sismica prevista dall’Ordinanza PCM 3274 del 20.03.2003 viene elaborata una nuova zonazione sismogenetica, denominata ZS9, comprendente 42 zone sorgente (ZS) identificate da un numero (da 901 a 936) o da una lettera (da A ad F), ciascuna delle quali corredata da un meccanismo focale preva-

lente e da una profondità. I Comuni di Ferrara, Migliarino e Tresigallo ricadono nella zona sismogenetica 912, che coincide con la Dorsale Ferrarese (figura). In questa zona il monitoraggio strumentale condotto in epoca recente ha registrato una magnitudo massima di 4,6 con una profondità di 7 Km. Si conferma il fatto che la maggior parte dei terremoti ha magnitudo modesta grazie al frequente movimento che ha funzione dissipativa delle energie accumulate. Per contro la magnitudo massima (Mw) prevista dall'INGV per la zona 912 è pari a 6,14, un valore coerente con gli studi di microzonazione sismica di terzo livello effettuati.



**Figura 28 Delimitazione delle ZS nell'ambito della ZS9 nel nord Italia**

La successiva figura mostra i valori di pericolosità sismica secondo l'OPCM 3519 del 28 aprile 2006, All. 1b, per l'area in esame. Nella mappa sono riportati i valori medi (con deviazione standard) corrispondenti ad una probabilità di superamento del 10% in 50 anni (periodo di ritorno di 475 anni) della PGA (acronimo di Peak Ground Acceleration, ovvero accelerazione massima al suolo). Dalla figura si evince come a grande scala l'area relativa ai comuni di Migliarino, Tresigallo e Ferrara ricada a cavallo di  $a_{max}$  compreso fra 0,100 e 0,125 e 0,125 – 0,150. Per Finale di Rero l'accelerazione orizzontale massima attesa è 0,117. Dalla disaggregazione si ottiene una magnitudo massima di 5,0.



**Figura 29** Valori di pericolosità sismica (OPCM del 28 aprile 2006 n. 3519, All. 1b) espressi in termini di accelerazione massima del suolo con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni riferita a suoli rigidi ( $V_{s30} > 800$  m/s, suolo di categoria A).

## 7.1 Normativa ed azione sismica

La progettazione definitiva dell'idrovia era stata sviluppata con riferimento alla classificazione secondo la OPCM 3274 del 2003, procedendo però alle verifiche ai sensi del DM 24/1/1986 e DM 16/1/96 considerando  $a_g = 0,04$  I R (con: coefficiente di protezione sismica  $I = 1$ , e coefficiente di risposta definito dallo strutturista).

Gli ultimi 10 anni hanno registrato una rapida evoluzione della normativa sismica con l'emanazione del DM 14/9/05 "Norme Tecniche per le Costruzioni", con il Decreto 14/1/2008 relativo alle Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2008), ed ancora con le Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC 2018) di cui al Decreto del 17/01/2018 pubblicate sulla Gazzetta Ufficiale del 20/02/2018, adottate nella presente fase progettuale.

Secondo le NTC 2018 e come già con le precedenti NTC 2008 le azioni sismiche debbono essere determinate in relazione al periodo di riferimento VR, che si ricava moltiplicando la vita nominale VN per il coefficiente d'uso CU, rispettivamente come da tabella 2.4.I e 2.4.II delle N.TC. 2018:

$$VR = VN * CU$$

La vita nominale di una costruzione VN è intesa come il numero di anni nel quale la struttura, purché soggetta alla manutenzione ordinaria, deve potere essere usata per lo scopo alla quale è destinata. La vita nominale viene desunta dai contenuti della Tab. 2.4.1 di cui all'Allegato A delle NTC 2018 (riportata in tabella 9) e deve essere precisata nei documenti di progetto.

**Tab. 2.4.I – Valori minimi della Vita nominale  $V_N$  di progetto per i diversi tipi di costruzioni**

TIPI DI COSTRUZIONI		Valori minimi di $V_N$ (anni)
1	Costruzioni temporanee e provvisorie	10
2	Costruzioni con livelli di prestazioni ordinari	50
3	Costruzioni con livelli di prestazioni elevati	100

**Tabella 9 Vita nominale Tab 2.4.I NTC 2018**

Il coefficiente d'uso  $C_u$ , i cui valori sono riportati in tabella 10, esprime la Classe d'uso nella quale sono suddivise le opere con riferimento alle conseguenze di una interruzione di operatività o di un eventuale collasso. In presenza di Azioni Sismiche le costruzioni sono suddivise in quattro classi d'uso la cui definizione è di seguito sinteticamente riportata:

**Tab. 2.4.II – Valori del coefficiente d'uso  $C_u$**

CLASSE D'USO	I	II	III	IV
COEFFICIENTE $C_u$	0,7	1,0	1,5	2,0

**Tabella 10 Coefficiente d'uso Tab 2.4.II NTC 2018**

- Classe I: Costruzioni con presenza solo occasionale di persone, edifici agricoli.
- Classe II: Costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti, industrie con attività non pericolose per l'ambiente, ponti e reti viarie la cui interruzione

non provochi situazioni di emergenza, dighe il cui collasso non provochi conseguenze rilevanti

- Classe III: Costruzioni il cui uso preveda affollamenti significativi, industrie con attività pericolose per l'ambiente, ponti e reti viarie la cui interruzione provochi situazioni di emergenza, dighe il cui collasso provochi conseguenze rilevanti
- Classe IV: Costruzioni con funzioni pubbliche o strategiche importanti, industrie con attività particolarmente pericolose per l'ambiente, reti viarie di tipo A o B (come definite nel D.M. 5 novembre 2001 n.6792) importanti per il mantenimento delle vie di comunicazione, dighe connesse al funzionamento di acquedotti e a impianti di produzione di energia elettrica

Nel caso in studio sulla base di quanto concordato con il committente si è adottato:

$$V_R = V_N * C_U = 100 \times 1,5 = 150 \text{ anni (Ponte Final di Rero)}$$

$$V_R = V_N * C_U = 50 \times 1,0 = 50 \text{ anni (Per le altre opere e per l'idrovia)}$$

## 7.2 Pericolosità sismica

La pericolosità sismica è descritta dalla probabilità che, in un fissato arco di tempo, si verifichi un evento sismico di entità almeno pari ad un valore prefissato; l'intervallo di tempo, espresso in anni, è il Periodo di riferimento ( $V_R$ ), e la probabilità è denominata Probabilità di superamento nel periodo di riferimento ( $P_{VR}$ ).

In ambito progettuale al variare dello stato limite considerato (SLO-SLD-SLV-SLC) è associata una  $P_{VR}$  prefissata come di seguito riportato (tabella 3.2.I delle NTC 2018):

STATO LIMITE		$P_{VR}$ - Probabilità di superamento nel periodo di riferimento
		$V_R$
Stati Limite di Esercizio	SLO	81%
	SLD	63%
Stati Limite Ultimi	SLV	10%
	SLC	5%

**Tabella 11 Probabilità di superamento  $P_{VR}$  al variare dello stato limite considerato**

Dove:

**SLO = Stato Limite di Operatività:** a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, non deve subire danni ed interruzioni d'uso significativi;

**SLD = Stato Limite di Danno:** a seguito del terremoto la costruzione nel suo complesso, includendo gli elementi strutturali, quelli non strutturali, le apparecchiature rilevanti alla sua funzione, subisce danni tali da non mettere a rischio gli utenti e da non compromettere significativamente la capacità di resistenza e di rigidità nei confronti delle azioni verticali ed orizzontali, mantenendosi immediatamente utilizzabile pur nell'interruzione d'uso di parte delle apparecchiature.

**SLV = Stato Limite di Salvaguardia della Vita:** a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte di resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;

**SLC = Stato Limite di prevenzione del Collasso:** a seguito del terremoto la costruzione subisce gravi rotture e crolli nei componenti non strutturali ed impiantistici e danni molto gravi dei componenti strutturali; la costruzione conserva ancora un margine di sicurezza per azioni verticali ed un esiguo margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni orizzontali.

Fissato il periodo di riferimento  $V_R$  e la probabilità di superamento  $P_{VR}$  il periodo di ritorno  $T_R$  si ricava mediante l'espressione:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

Le forme spettrali sono definite, per ciascuna delle probabilità di superamento nel periodo di riferimento  $P_{VR}$ , a partire dai valori dei seguenti parametri su sito di riferimento rigido orizzontale:

- $a_g$  = accelerazione orizzontale massima al sito;
- $F_0$  = valore massimo di fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale;

- $TC^*$  = periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

I parametri  $ag$ ,  $F0$ , e  $TC^*$  per i periodi di ritorno  $TR$  associati a ciascun  $SL$ , che definiscono lo spettro di risposta elastico di riferimento in accelerazione  $Se(T)$  dai quali viene poi ricavato lo spettro di progetto  $Sd(T)$  possono essere dedotti mediante il programma “Spettri-NTC.ver.1.03”, realizzato dal Ministero delle Infrastrutture – Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici (figura) in base alle coordinate sito specifiche o al comune in cui ricadono i lavori.



**Figura 30. Schermata del programma Spettri-NTC.ver.1.03.**

Per il ponte di Final di Rero le cui coordinate WGS84 sono:

Lat: 44,80611

Long: 11,874738

i parametri di riferimento per VR 150 anni e VR = 50 anni sono riepilogati in tabella 12 e 13.



SLATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_o$ [-]	$T_C^*$ [s]
SLO	90	0,056	2,519	0,290
SLD	151	0,071	2,536	0,288
SLV	1424	0,178	2,560	0,289
SLC	2475	0,218	2,523	0,294

**Tabella 12 Parametri spettrali VR = 150 anni**

SLATO LIMITE	$T_R$ [anni]	$a_g$ [g]	$F_o$ [-]	$T_C^*$ [s]
SLO	30	0,035	2,538	0,252
SLD	50	0,043	2,530	0,279
SLV	475	0,117	2,584	0,282
SLC	975	0,154	2,585	0,285

**Tabella 13 Parametri spettrali VR = 50 anni**

## 7.1 Risposta sismica locale

Un ulteriore elemento di valutazione è rappresentato dall'effetto locale prodotto dal contesto geologico-geomorfologico che caratterizza l'area in studio. Ciò significa valutare le differenze di intensità massima dovute a differenti situazioni geologiche e morfologiche locali attraverso procedure il cui insieme costituisce la "risposta sismica locale". L'esame della distribuzione dei danni prodotti da un terremoto nello stesso territorio dimostra infatti che le azioni sismiche possono assumere, anche a distanze di poche decine di metri, caratteristiche differenti in funzione delle modifiche all'onda sismica apportate dalle condizioni locali.

Si denomina quindi come risposta sismica locale l'azione sismica emergente "in superficie" a seguito delle modifiche in ampiezza, durata e contenuto in frequenza subite trasmettendosi dal substrato rigido. Tali modifiche sono da ricondurre principalmente a:

- effetti stratigrafici: legati alla successione stratigrafica, alle proprietà meccaniche dei terreni, alla geometria del contatto tra il substrato rigido e i terreni sovrastanti ed alla geometria dei contatti tra gli strati;

- effetti topografici: legati alla configurazione topografica del piano campagna alla quale in alcuni casi (prossimità della cresta dei rilievi), va attribuita la focalizzazione delle onde sismiche a seguito dei fenomeni di riflessione delle onde sismiche; i fenomeni di amplificazione cresta-base aumentano in proporzione al rapporto tra l'altezza del rilievo e la sua larghezza.

L'effetto della risposta sismica locale correlabile con l'effetto stratigrafico viene valutato attraverso specifiche analisi da eseguire con le modalità indicate al capitolo 7.11.3 delle NTC 2018. In alternativa qualora le condizioni stratigrafiche e le proprietà dei terreni siano chiaramente riconducibili alle categorie definite dalla tabella 3.2.III delle NTC 2018, di seguito riportata, è possibile fare riferimento ad un approccio semplificato che si basa sulla classificazione del sottosuolo in funzione della velocità di propagazione delle onde di taglio  $V_s$ .

Nel caso in studio considerato che: il modello stratigrafico risulta sostanzialmente omogeneo a grande scala, non sono attese significative inversioni di velocità, le superfici di contatto stratigrafico sono suborizzontali o poco inclinate, il bedrock si pone a notevole profondità (> 100 m da p.c.), si è fatto riferimento all'approccio semplificato.

La classificazione del sottosuolo di cui alla tabella 3.2.II si effettua in base alle condizioni stratigrafiche ed ai valori di velocità equivalente di propagazione delle onde di taglio  $V_{s,eq}$  come definita dall'espressione:

$$V_{s,eq} = \frac{H}{\sum_{i=1}^N \frac{h_i}{V_{s,i}}} \quad (3.2.1 \text{ delle NTC 2018})$$

Con:

$h_i$  = spessore strato i-esimo;

$V_{s,i}$  = velocità onde di taglio strato i-esimo;

$N$  = numero strati;

$H$  = profondità bedrock caratterizzato da  $V_s$  non inferiore a 800 m/s

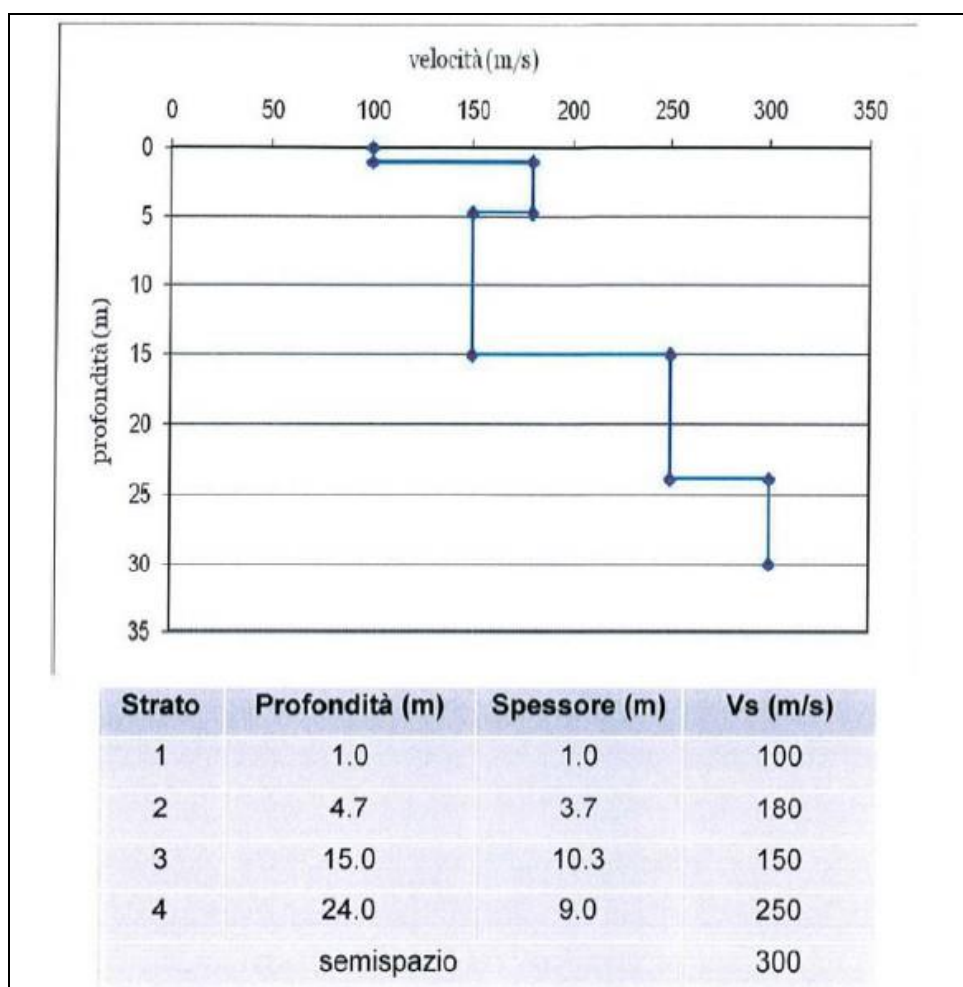
Per depositi con profondità  $H$  del substrato superiore a 30 m, come nel caso in studio, la velocità equivalente delle onde di taglio  $V_{s,eq}$  è definita dal parametro  $V_{s30}$  ottenuto ponendo  $H = 30$ .

**Tab. 3.2.II – Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.**

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.</i>
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.</i>
C	<i>Depositi di terreni a grana grossa medianamente addensati o terreni a grana fina medianamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.</i>
D	<i>Depositi di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.</i>
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D, con profondità del substrato non superiore a 30 m.</i>

**Figura 31 Categorie di sottosuolo ai sensi delle NTC 2018**

Nel caso in studio le campagne geognostiche del 2004 e 2008 sono state eseguite prima dell'emanazione delle NTC 2008, e non è stata quindi prevista un'acquisizione diretta delle  $V_s$ . Nella campagna del 2014 è stata realizzata, in corrispondenza del nuovo ponte di Final di Rero, una Masw che ha restituito  $V_{s30} = 193,3$  m/s, compatibile con una categoria di suolo di fondazione tipo C (tabella 14).



**Tabella 14 Masw campagna 2014**

Si dispone inoltre dei risultati degli studi di microzonazione sismica effettuati nei Comuni di Ferrara e Tresigallo, dove la carta delle velocità delle onde di taglio Vs individua una serie di acquisizioni che riportano valori di Vs30 variabili fra 160 m/s - 195 m/s per il comune di Ferrara, e fra 150 - 278 m/s per Tresigallo, con valori medi superiori a 180 m/s, che confermano i risultati della Masw eseguita ed una categoria di suolo tipo C.

I profili di Vs30 evidenziano spesso un orizzonte superficiale potente circa 3-4 m con velocità leggermente superiore rispetto a quello sottostante. A tale riguardo si precisa che una inversione di velocità nel profilo delle Vs si ottiene quando un terreno rigido sovrasta uno soffice con un rapporto  $Vs_{rig}/Vs_{soffice} > 2$ , con la Vs dello strato rigi-

do > 500 m/s, e nel caso di tutte le rilevazioni effettuate tale rapporto non è mai verificato (rif: Studi di microzonazione sismica II livello Comune di Tresigallo, relazione illustrativa)

Per quanto attiene gli effetti topografici è possibile fare riferimento alla tabella 3.2.IV delle NTC 2018 di seguito riprodotta.

Categorie topografiche	
Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

**Tabella 15 Categorie topografiche**

Poiché l'intervento in progetto s'inserisce in un contesto francamente pianeggiante è possibile assumere una categoria topografica tipo T1, cui corrisponde un Coefficiente di amplificazione topografica ( $S_T$ ) pari a  $S_T = 1,00$  come da tabella.

Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica $S_T$		
Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	$S_T$
T1	—————	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

**Tabella 16 Valori del coefficiente di amplificazione topografica**

Con riferimento ai contenuti della tabella 12 e 13 **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** per la condizione di SLV si ha che:

$$a_g = 0,178 \text{ (Ponte Final di Rero)}$$

$$a_g = 0,117 \text{ (Altre opere)}$$

L'accelerazione massima attesa in superficie deriva dalla:

$$a_{max} = S \times a_g = S_s \times S_T \times a_g$$

$S$  = coefficiente che comprende l'effetto dell'amplificazione stratigrafica  $S_s$  e quella topografica  $S_T$

$a_g$  = accelerazione orizzontale massima sul sito di riferimento rigido.

Sulla base delle formule riportate in tabella 3.2.IV delle NTC il coefficiente di amplificazione stratigrafica  $S_s$  (per suolo di categoria C) nel caso in studio vale 1,427, mentre quello topografico  $S_t$  vale 1,00. Pertanto si ha che:

$$a_{\max} = 0,178 \times 1,427 \times 1,00 = 0,254 \text{ per il ponte}$$

$$a_{\max} = 0,117 \times 1,427 = 0,167 \text{ per scavi e rilevati}$$

I coefficienti sismici orizzontali e verticali da porre a base delle verifiche di stabilità degli scavi e rilevati arginali vengono individuati dalla:

$$k_h = \beta_s \frac{a_{\max}}{g}$$

$$k_v = \pm 0,5 k_h$$

dove  $B_s$  è un coefficiente di riduzione dell'accelerazione orizzontale massima attesa al sito che, ai sensi del paragrafo 7.11.4 delle NTC 2018, per fronti di scavo e rilevati vale 0,38.

Pertanto per le verifiche di stabilità da effettuarsi su scavi e rilevati si ha:

$$K_h = 0,0635$$

$$K_v = 0,0317$$

## 7.2 Liquefazione dei terreni

La presenza di strati di terreni sabbiosi saturi in fondazione richiede alcuni commenti circa la possibilità o meno di sviluppo di fenomeni di liquefazione durante eventuali attività sismiche.

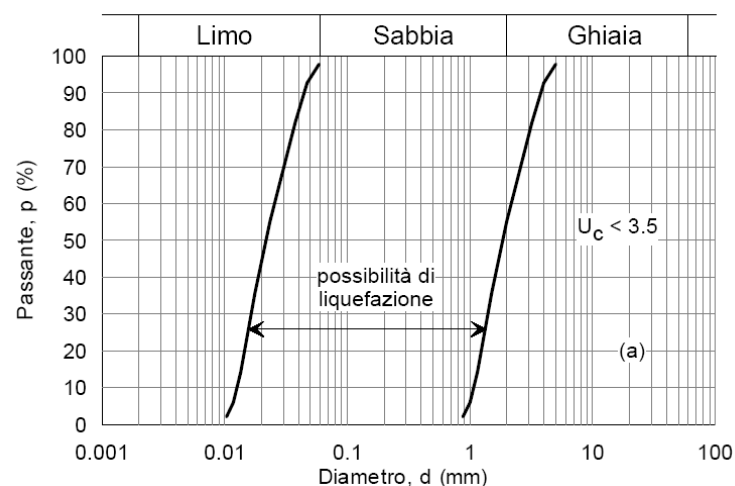
La liquefazione denota una diminuzione di resistenza a taglio e/o rigidità causata dall'aumento di pressione interstiziale in un terreno saturo non coesivo durante lo scuotimento sismico, tale da generare deformazioni permanenti significative o persino l'annullamento degli sforzi efficaci nel terreno.

Vale la pena evidenziare che laddove sono presenti i caratteri predisponenti non è detto che si possano realizzare le condizioni di cause scatenanti; ovvero un terreno sabbioso può avere tutti i requisiti granulometrici e di addensamento per liquefarsi, ma nell'area può non verificarsi mai un sisma con energia sufficiente. Viceversa possono esserci le

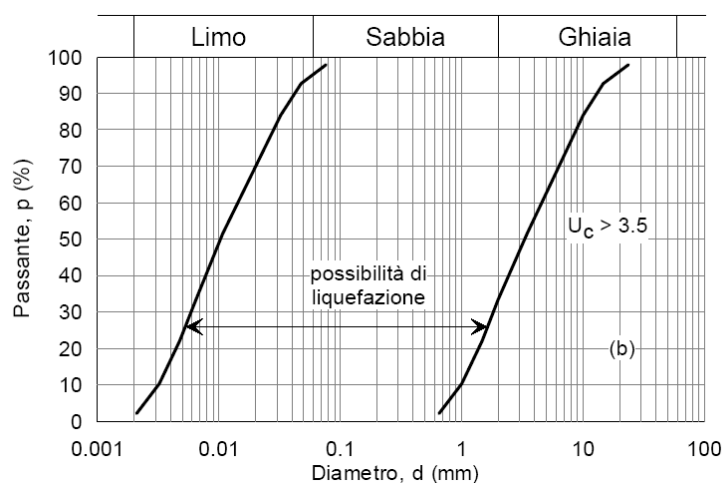
energie sufficienti ma le caratteristiche granulometriche dei litotipi possono essere tali da non essere suscettibili di liquefazione.

L'Aggiornamento delle Norme tecniche per le costruzioni di cui al DM 17/02/2018 indica al punto 7.11.3.4.2 che le verifiche alla liquefazione per le opere possono essere omesse qualora si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

1. accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni di campo libero inferiori a 0.1g;
2. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna suborizzontale e per strutture con fondazioni superficiali;
3. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata  $(N1)_{60} > 30$ , dove  $(N1)_{60}$  è il valore della resistenza determinata attraverso le prove SPT, normalizzata ad una tensione efficace di 100 kPa;
4. distribuzione granulometrica esterna all'ambito dei fusi forniti in figura 32 nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c < 3.5$  ed in figura 33 nel caso di terreni con coefficiente di uniformità  $U_c > 3.5$ ;



**Figura 32 – Fusi granulometrici di terreni suscettibili da liquefazione  $U_c < 3.5$**



**Figura 33 – Fusi granulometrici di terreni suscettibili da liquefazione  $U_c > 3.5$**

Con riferimento al punto (1) la pericolosità sismica della porzione di territorio in studio pur se modesta si traduce con valori di  $a_g$  attesi a piano campagna, in condizioni di campo libero, superiori a 0.1g.

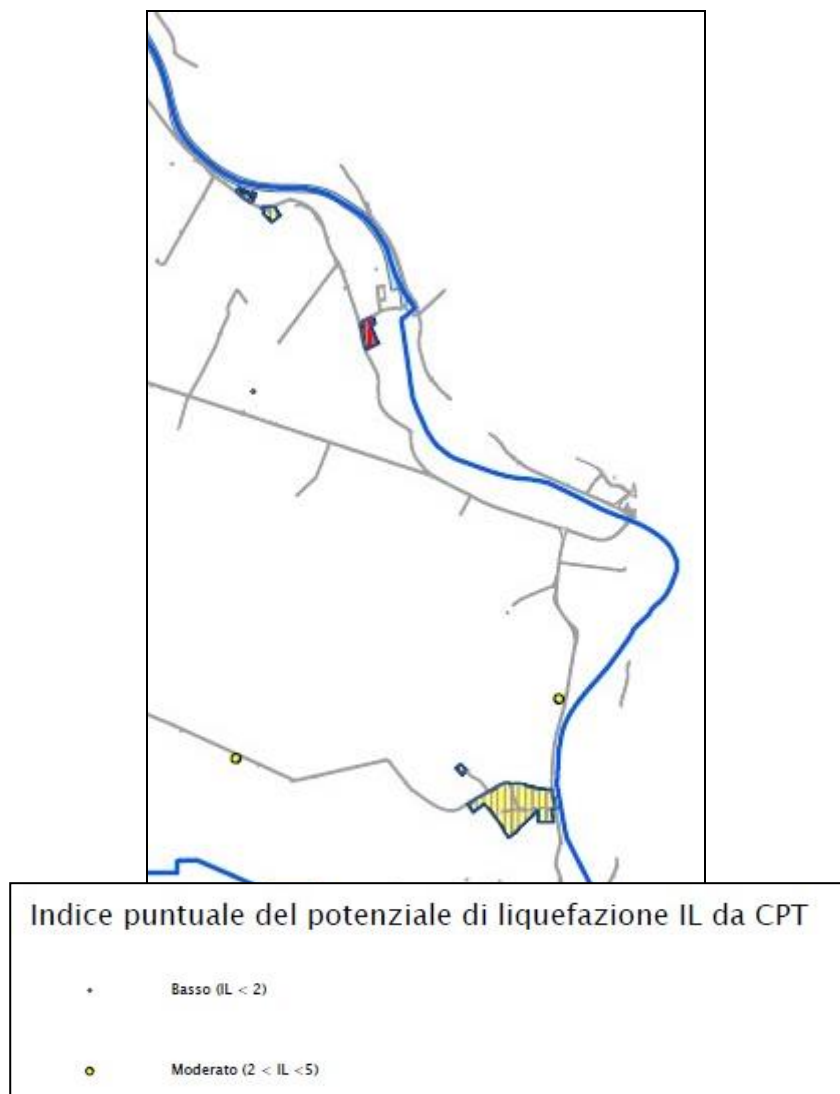
Con riferimento al punto (2) la falda si pone fra le profondità di 2-4 m da p.c. per cui non è motivo di esclusione per i terreni al di sotto di tale quota.

Con riferimento ai punti (3) e (4) i terreni granulari attraversati hanno un contenuto di limo ed argilla non trascurabile e tale da sfavorire la liquefazione. Dalle analisi granulometriche disponibili si evince quanto segue:

- Conca di Valpigliaro: presenza di sabbie e sabbie limose sino a 13 m di profondità in sinistra e 9 m (con frequenti intercalazioni di fine) in destra con frazione fine (FC) limo compresa fra 10 – 32%;
- Località Cà Dondi: presenza di un'alternanza di limi sabbiosi e sabbie limose con argille limose sino a circa 15 m da p.c. in sinistra e 12 m in destra; segue uno strato limoso argilloso di spessore medio 13 m cui seguono ancora sabbie limose. Le prove SPT in sabbie e sabbie limose evidenziano sempre (fatta eccezione per la prova a circa 1 m da p.c. posta sopra falda)  $N_{spt} > 25$ .
- Ponte di Final di Rero: in superficie è presente un livello metrico limoso sabbioso sopra falda cui seguono sabbie e sabbie limose sino a circa 8-10 m, nelle quali si riscontrano valori di FC fino al 35%. Al di sotto si hanno limi argillosi ed ancora sabbie limose a partire da 26 m circa.



Dagli studi di microzonazione sismica consultati risulta un indice puntuale di liquefazione dedotto da prove CPT variabile da basso a moderato, come da stralcio in figura.



**Figura 34** Stralcio carta di microzonazione sismica livello 3 del Comune di Ferrara

Per un maggiore approfondimento si riporta la verifica della suscettibilità alla liquefazione riferita alle prove CPTE condotte in corrispondenza del Ponte di Final di Rero sulla base delle prove penetrometriche del 2014 P1/14 e P2/14.

La suscettibilità nei confronti della liquefazione viene valutata attraverso metodologie di carattere semi-empirico, le quali permettono di eseguire una verifica di tipo puntuale lungo la verticale indagata dall'indagine.

Il coefficiente di sicurezza alla liquefazione è calcolato a diverse profondità attraverso il rapporto tra la resistenza ciclica alla liquefazione (Cyclic Resistance Ratio)  $CRR = \tau_t / \sigma'_{v0}$ , e la sollecitazione ciclica indotta dall'azione sismica (Cyclic Stress Ratio)  $CSR = \tau_{media} / \sigma'_{v0}$ .

$$F_s = CRR / CSR$$

Sono state considerate 2 diverse metodologie specifiche che correlano i risultati delle prove CPT alla resistenza ciclica alla liquefazione CRR, utilizzando il valore di magnitudo pari a 6.14.

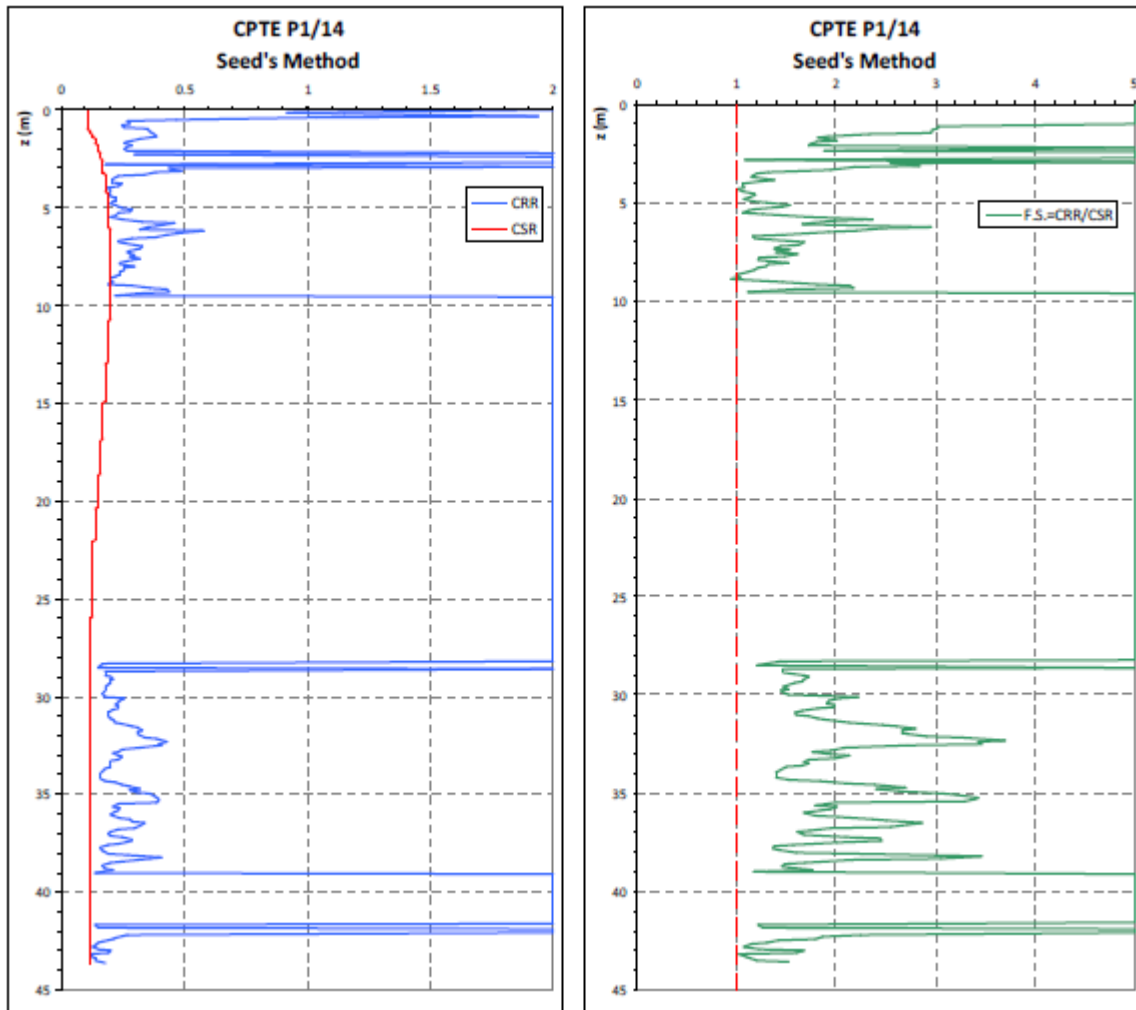
- Seed's Method (Seed and De Alba, 1986, Seed and Idriss, 1982);
- Robertson & Wride's Method (Robertson and Wride, 1997).

I risultati delle verifiche sono rappresentati in forma grafica di seguito; sono state analizzate le intere verticali delle prove CPT eseguite.

I valori di  $F_s$  ottenuti per lo strato sabbioso superficiale risultano sempre  $> 1$ , ad eccezione di tratti localizzati, dello spessore di qualche decina di centimetri, in cui il coefficiente di sicurezza risulta minore di 1, peraltro evidenziato solo con il metodo di Robertson.

Lo strato sabbioso più profondo non presenta problemi in quanto i coefficienti di sicurezza sono sempre superiore a 1.2.

Con riferimento ai criteri usualmente utilizzati per la definizione del rischio da liquefazione tale circostanza è accettabile in quanto sono da ritenere potenzialmente pericolosi gli strati di una certa potenza con una predisposizione a fenomeni di liquefazione. In particolare, con riferimento alle fondazioni del ponte, tale situazione non si ritiene critica. Infatti anche considerando una perdita di resistenza al taglio, e quindi un annullamento della resistenza laterale lungo tali brevi tratti, la riduzione della capacità portante totale risulterebbe trascurabile in relazione ai carichi agenti in fase sismica i quali, tra l'altro, sono inferiori a quelli agenti in condizioni statiche e utilizzati nelle verifiche.



**Figura 35 – Verifica a liquefazione con metodo di Seed per la verticale d'indagine CPTE P1/14**

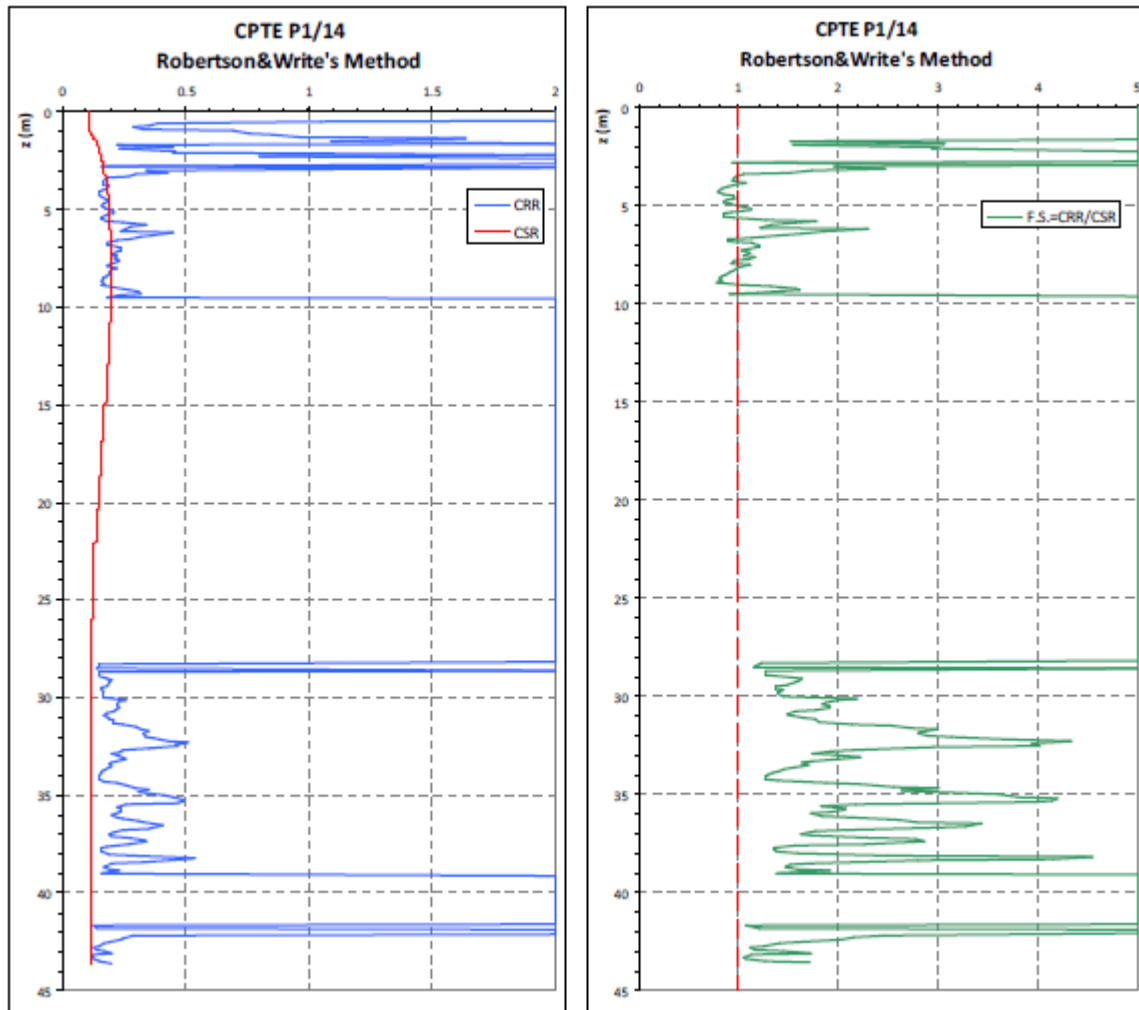


Figura 36 – Verifica a liquefazione con metodo di Robertson & Write per la verticale d'indagine CPTE P1/14

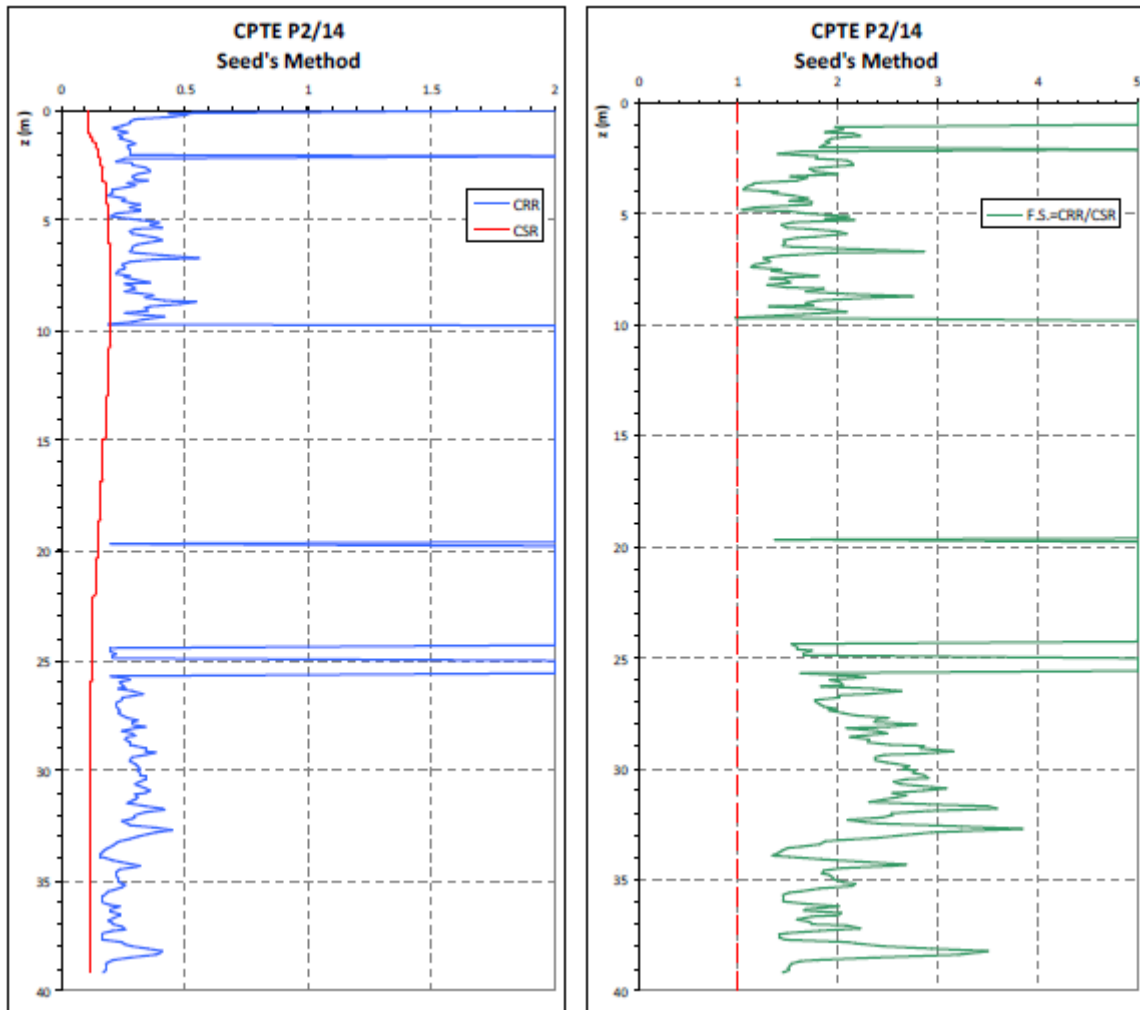


Figura 37 – Verifica a liquefazione con metodo di Seed per la verticale d'indagine CPTE P2/14

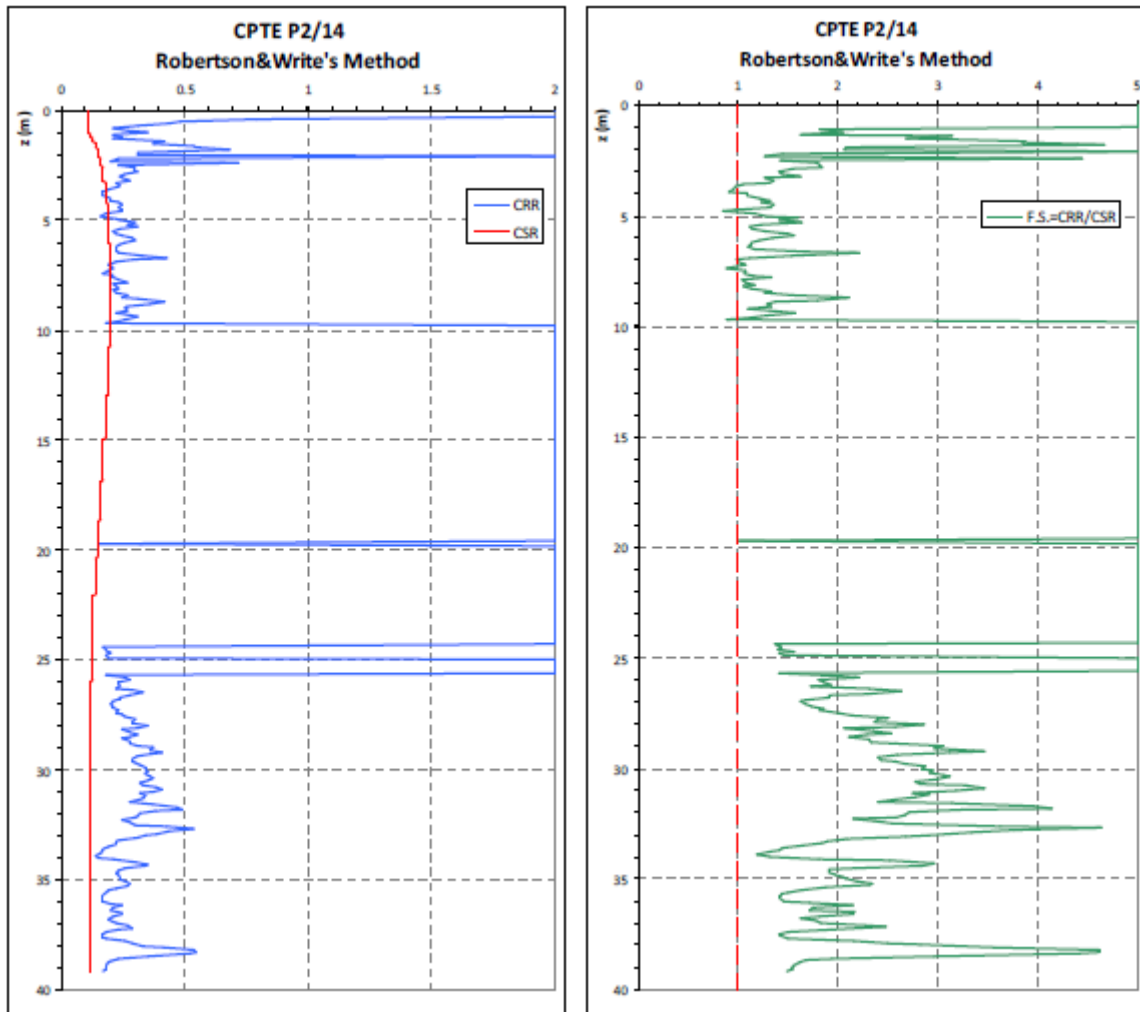


Figura 38 – Verifica a liquefazione con metodo di Robertson & Write per la verticale d’indagine CPTE P2/14



## **8 ANALISI DEI DATI GEOGNOSTICI**

In questo capitolo sono descritte, con riferimento all'insieme delle indagini e prove eseguite lungo l'intera tratta dalla conca di Valpagliaro a Migliarino, le informazioni disponibili poste a base della determinazione delle caratteristiche fisiche dei terreni. Per ulteriori e maggiori dettagli inerenti le caratteristiche di resistenza e deformabilità dei terreni indagati, e per l'interpretazione delle prove in sito, si rimanda ai contenuti della relazione geotecnica.

### **8.1 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 prelevati:

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	limo con argilla	
SC2	Sh 3	9,0-9,5		0	58	42	102	41	61	1,01	CH	limo con argilla organica	
SP1	Sh 5	18,0-18,6		0	59	41	69	30	39	0,61	CH	limo con argilla	
SP1	Sh 6	21,0-21,4		0	83	17	40	27	13	0,65	ML	limo argilloso	
SP2	Sh 5	21,0-21,5		0	77	23	50	30	20	0,51	MH	limo argilloso	
SP2	Sh 6	24,0-24,6		0	59	41	53	20	33	0,92	CH	limo con argilla	
SP2	Sh 7	27,0-27,6		0	63	37	45	23	22	0,77	CL	limo con argilla	
SP3	Sh 1	3,0-3,5		0	88	12	41	27	14	0,36	ML	limo argilloso	
SP3	Sh 2	6,0-6,6		0	88	12	39	26	13	0,24	ML	limo argilloso	
SP3	Sh 3	9,0-9,6		0	67	33	68	30	38	0,83	CH	limo con argilla	
SP3	Sh 7	25,0-25,4		0	53	47	53	21	32	0,90	CH	limo e argilla	
SP4	Sh 2	9,0-9,6		0	84	16	88	42	46	0,57	OH	limo argilloso	
SP4	Sh 3	12,0-12,6		0	67	33	68	38	30	0,74	OH	limo con argilla	
SP4	Sh 4	15,0-15,6		0	70	30	52	31	21	0,30	OH	limo con argilla	
SP4	Sh 5	18,0-18,3		0	86	14	35	25	10	0,23	ML	limo argilloso	
SP4	Sh 8	26,0-26,5		0	42	58	60	24	36	0,84	CH	argilla da limosa a con limo	
SP5/Pz	Sh 1	3,0-3,6		0	82	18	36	24	12	0,73	ML	limo argilloso	
SP5/Pz	Sh 8	30,0-30,6		0	32	68	49	25	24	0,57	CL	argilla con limo	
SC1pz-08	C1	5,00 - 5,50	0,0	3,5	44,3	52,1	73,0	32,0	41,0	1,00	CH	Argilla con limo grigia	
SC1pz-08	C2	7,50 - 8,00	0,0	19,5	61,4	19,1					ML	Limo sabbioso argilloso grigio	
SC1pz-08	C3	9,00 - 9,50	0,0	15,0	61,7	23,4	35,0	18,8	16,2	0,15	CL	Limo argilloso debolmente sabbioso	
SC1pz-08	C4	17,50 - 18,00	0,0	3,4	41,1	55,5	55,2	24,6	30,7	0,33	CH	Argilla con limo grigio marrone	
SC1pz-08	C5	20,50 - 21,00	0,0	6,1	53,2	40,8	56,2	30,0	26,2	0,86	MH o OH	Limo con argilla grigio chiaro	
SC1pz-08	C6	24,00 - 24,50	0,0	3,4	43,0	53,6	69,5	24,6	45,0	0,67	CH	Argilla con limo con resti vegetali	
SC2pz-08	C1	5,00 - 5,50	0,0	54,1	32,7	13,2					ML	Sabbia argillosa con limo marrone	
SC2pz-08	C2	13,50 - 14,00	0,0	2,9	52,9	44,2	44,2	20,9	23,3	0,40	CL	Limo con argilla grigio chiaro e rari	
SC2pz-08	C3	16,50 - 17,00	5,2	29,8	46,6	18,3	33,3	25,0	8,3		ML o OL	Limo argilloso con sabbia fine grigio	
SC2pz-08	C4	20,00 - 20,50	0,1	5,5	44,5	49,9	65,6	29,1	36,5	0,81	CH	Argilla con limo grigio, con rari resti	
SC2pz-08	C5	24,00 - 24,50	0,0	5,6	63,9	30,5	52,9	26,6	26,2	0,81	CH	Limo con argilla a tratti debolmente	
SC2pz-08	C6	31,50 - 32,00	0,0	3,2	37,0	59,8	56,3	22,6	33,7	0,92	CH	Argilla limosa grigio azzurro con	
SC1/Pz	Ri 1	1,5-1,8		26	68	6	-	-	-		ML	limo con sabbia deb. argilloso	
SC1/Pz	Ri 2	5,5-5,8		64	35	1	-	-	-		SM	sabbia con limo	
SC1/Pz	Ri 3	12,0-12,3		96	4	0	-	-	-		SP	sabbia medio fine	
SC2	Ri 4	12,0-12,3		0	66	34	65	33	32	0,43	MH	limo con argilla	
SC3/Pz	Ri 1	1,0-1,3		42	45	13	32	24	8		CL	limo con sabbia deb. argilloso	
SC3/Pz	Ri 2	4,8-5,1		67	30	3	-	-	-		SM	sabbia con limo	
SC3/Pz	Ri 3	11,0-11,3		89	11	0	-	-	-		SM	sabbia limosa	
SP1	Ri 1	3,0-3,3		74	26	0	-	-	-		SM	sabbia con limo	
SP1	Ri 2	6,0-6,3		90	10	0	-	-	-		SM	sabbia limosa	
SP1	Ri 3	9,0-9,3		99	1	0	-	-	-		SP	sabbia medio fine	
SP1	Ri 4	11,2-11,5		0	48	52	143	66	77	0,65	OH	argilla con limo	
SP1	Ri 7	24,5-25,0		66	32	2	-	-	-		SM	sabbia con limo	
SP1	Ri 8	28,0-28,5		82	18	0	-	-	-		SM	sabbia limosa	
SP1	Ri 9	32,0-32,3		97	3	0	-	-	-		SP	sabbia medio fine	
SP2	Ri 1	2,7-3,0		64	35	1	-	-	-		SM	sabbia con limo	
SP2	Ri 2	9,7-10,0		49	44	7	25	23	2	0,53	ML	sabbia con limo deb. argilloso	
SP2	Ri 3	14,7-15,0		54	42	4	-	-	-		SM	sabbia con limo a tratti deb. argillosa	
SP2	Ri 4	16,0-16,3		9	74	17	40	29	11	0,18	ML	limo argilloso deb. sabbioso	
SP2	Ri 8	29,2-29,5		51	43	6	-	-	-		ML	sabbia con limo deb. argillosa	
SP2	Ri 9	33,0-33,3		95	5	0	-	-	-		SP	sabbia medio fine	
SP3	Ri 4	11,0-11,3		36	57	7	-	-	-		ML	limo con sabbia deb. argilloso	
SP3	Ri 5	17,2-17,5		60	35	5	-	-	-		ML	sabbia con limo deb. argillosa	
SP3	Ri 6	24,1-24,4		0	58	42	171	80	91	0,76	OH	limo con argilla	
SP3	Ri 8	27,5-27,8		6	82	12	28	22	6	0,24	ML	limo argilloso deb. sabbioso	
SP3	Ri 9	30,0-30,3		0	83	17	39	28	11	1,13	OL	limo argilloso	
SP4	Ri 1	4,4-4,7		16	77	7	34	26	8	0,10	ML	limo sabbioso deb. argilloso	
SP4	Ri 6	21,1-21,4		0	75	25	49	28	21	0,45	OL	limo con argilla	
SP4	Ri 7	23,6-23,9		0	53	47	55	30	25	0,53	OH	limo con argilla	
SP4	Ri 9	29,5-29,8		0	88	12	-	-	-		ML	limo argilloso	
SP4	Ri 10	34,2-34,5		50	43	7	31	25	6	1,04	ML	sabbia con limo deb. argilloso	



Data: Settembre 2021	Rev.: 1	Doc.: II134P-RT-004_1
----------------------	---------	-----------------------

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 grigio
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 grigio
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 grigio
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 grigio
SC2pz-08	Ri4	10.00 - 10.30	0,0	66,7	33,3	0,0									ML	A2.4	sabbia fine con limo grigio
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 17. Elenco campioni rimaneggiati (RI) ed indisturbati (Sh-CI) con relativa classificazione granulometrica e limiti di Atterberg**

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

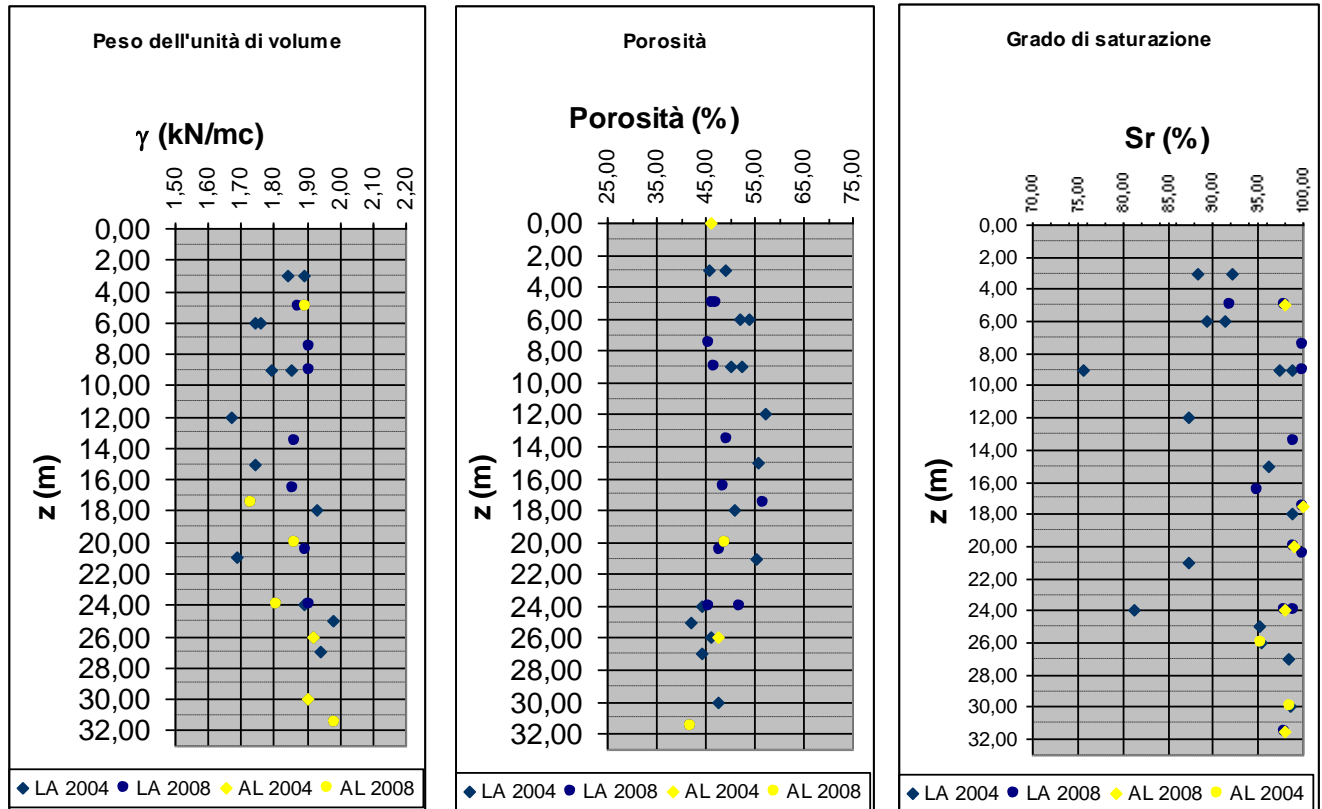
SONDAGGIO	CAMPIONE	PROFONDITA'	massa specifica (Mg/m <sup>3</sup> )	W naturale (%)	$\gamma$ naturale (Mg/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ secco (Mg/m <sup>3</sup> )	$\gamma$ immerso (Mg/m <sup>3</sup> )	porosità (%)	indice dei vuoti	grado di saturazione (%)	sostanza organica
SC2	Sh 1	3,00	2,70	-	-	-	-	0,00	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 18. Campioni indisturbati – parametri fisici**

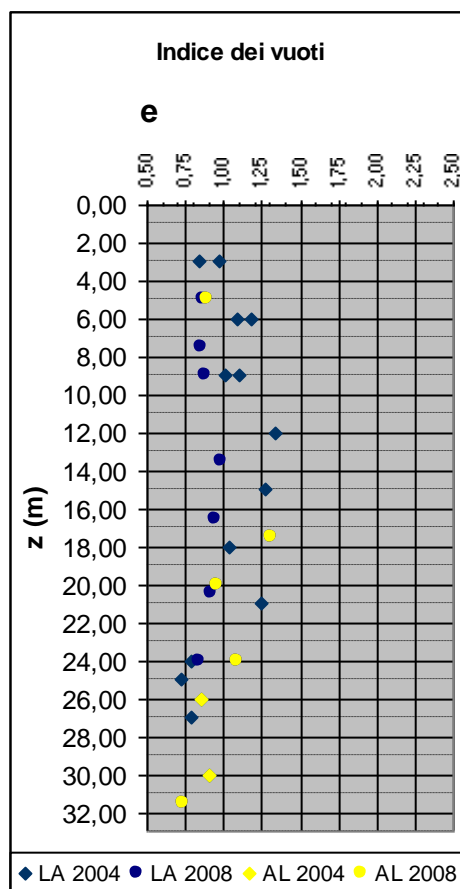
Il peso di volume naturale viene rappresentato in figura seguente distinto nei campioni della campagna del 2004 e 2008, ed ancora in materiali limoso argillosi (sigla LA – contenuto di limo con anche sabbia >50%) e prevalentemente argilloso limosi (sigla AL – contenuto di argilla > 50%). I valori medi sono posti attorno ad 1,9 kN/mc senza particolari variazioni evidenti con la profondità. e fra LA ed AL, termini questi accorpatisi 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 39) 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 40) sono concentrate nel campo delle argille inorganiche di alta plasticità, mentre i limi argillosi (figura 41) nel campo dei limi inorganici di media compressibilità.

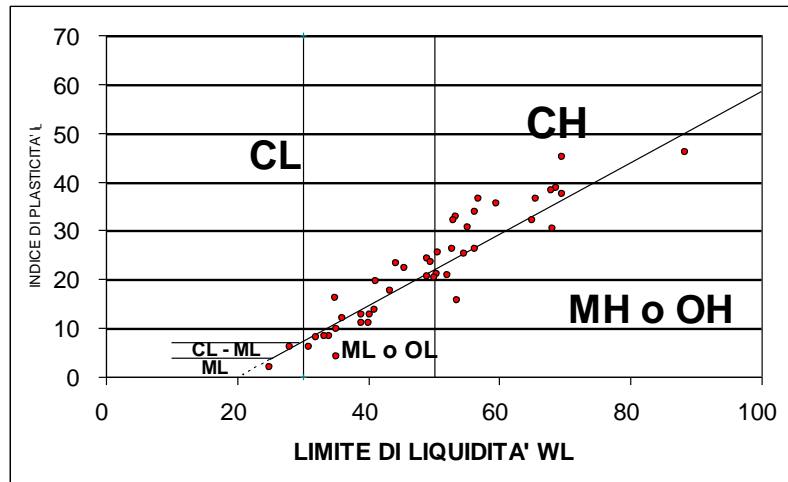


Figura 39. Diagramma di plasticità di Casagrande – tutti i campioni

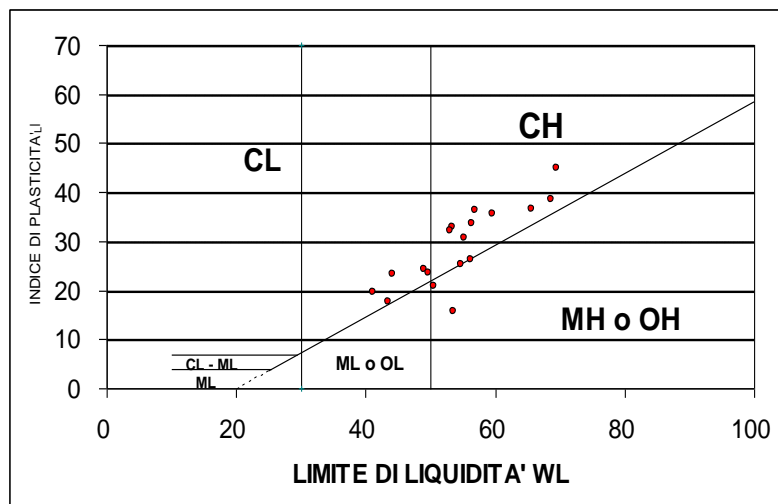
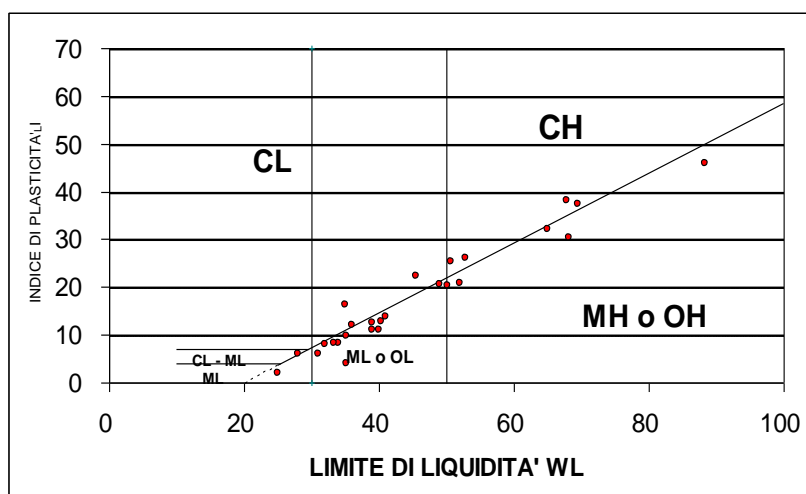


Figura 40. Diagramma di plasticità di Casagrande – Argille limose



**Figura 41. 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 le indagini del 2014, specificamente ubicate in corrispondenza del ponte di Finale di Rero, la figura 42 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 normalconsolidazione per l'unità II e di lieve sovraconsolidazione per l'unità III.

La figura 43 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.

Questi dati 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.

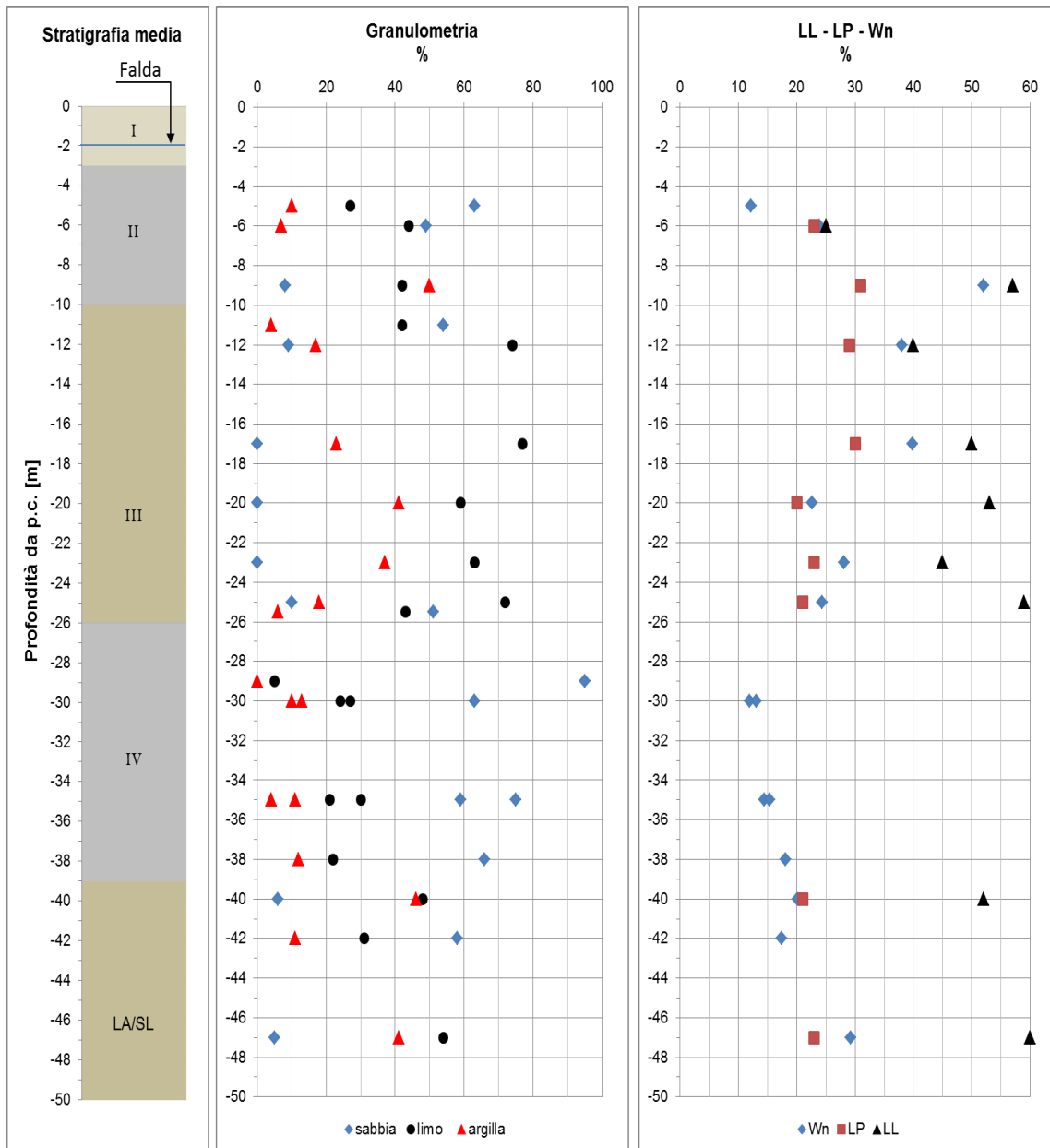


Figura 42 Indagini 2014. Granulometria e plasticità



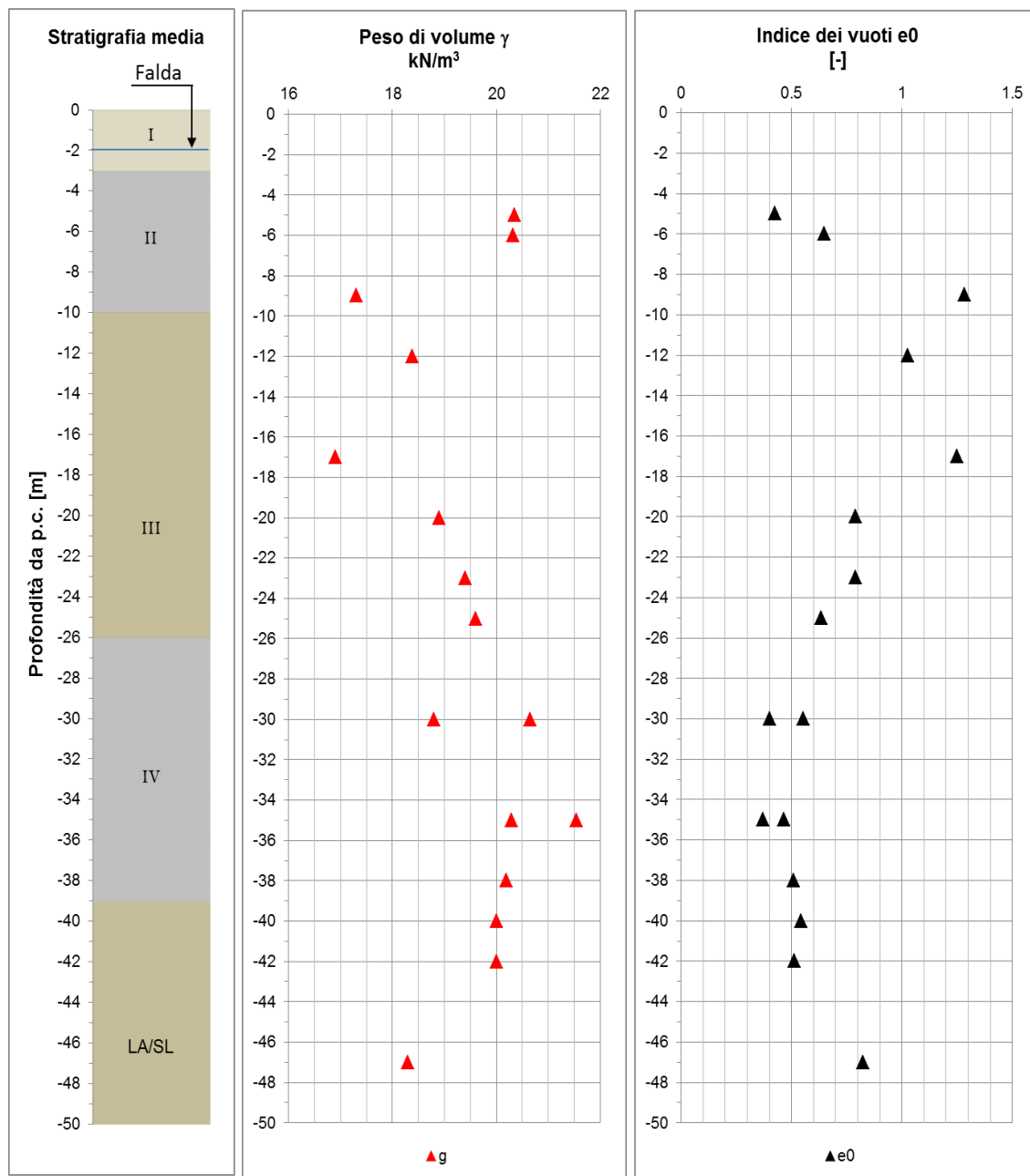


Figura 43 Indagini 2014 Peso di volume e indice dei vuoti

## 8.1 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) possono essere utilizzati per definire una serie di parametri quali la natura litologica, la coesione non drenata, l'indice di sovraconsolidazione, la densità relativa, l'angolo d'attrito, il modulo di deformazione, il modulo di taglio ed il modulo confinato, per la cui valutazione si rimanda ai contenuti della relazione geotecnica.

L'esame dei grafici delle prove permette, in ausilio ai sondaggi e spesso con un dettaglio superiore ai sondaggi stessi, di riconoscere le principali unità stratigrafiche attraversate.

In particolare i valori di resistenza alla punta variano fra 1-3 Mpa nei terreni fini in funzione della profondità, si portano almeno intorno a 5 Mpa nelle sabbie e sabbie limose più superficiali, con punte  $> 10$  Mpa negli strati sabbiosi più profondi ( $> 20$  m da p.c.).

## 8.2 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 nella tabella seguente.

Possiamo riepilogato in tabella si osserva 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.

Data: Settembre 2021	Rev.: 1	Doc.: II134P-RT-004_1
----------------------	---------	-----------------------

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 19. Prove di carico con piastra e densità in situ**

## 9 MODELLO STRATIGRAFICO DI PROGETTO

L'esame dei sondaggi, delle prove di laboratorio e delle diagrafie delle prove penetrometriche ha permesso di ricostruire un modello stratigrafico che nelle aree di stretto interesse progettuale 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%. Classificazione prevalente ai sensi della CNR UNI 10006: A4 o A6;
- 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%. Classificazione UNI 10006 A2.4 o A4 in funzione del contenuto di limo con punte fino ad A1;
- 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%. Classificazione prevalente ai sensi della CNR UNI 10006: A7 e subordinatamente A6
- 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%. Classificazione prevalente ai sensi della CNR UNI 10006: A2.4 o A1 e subordinatamente A4; A6 o A7 per le intercalazioni.

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 indagata.

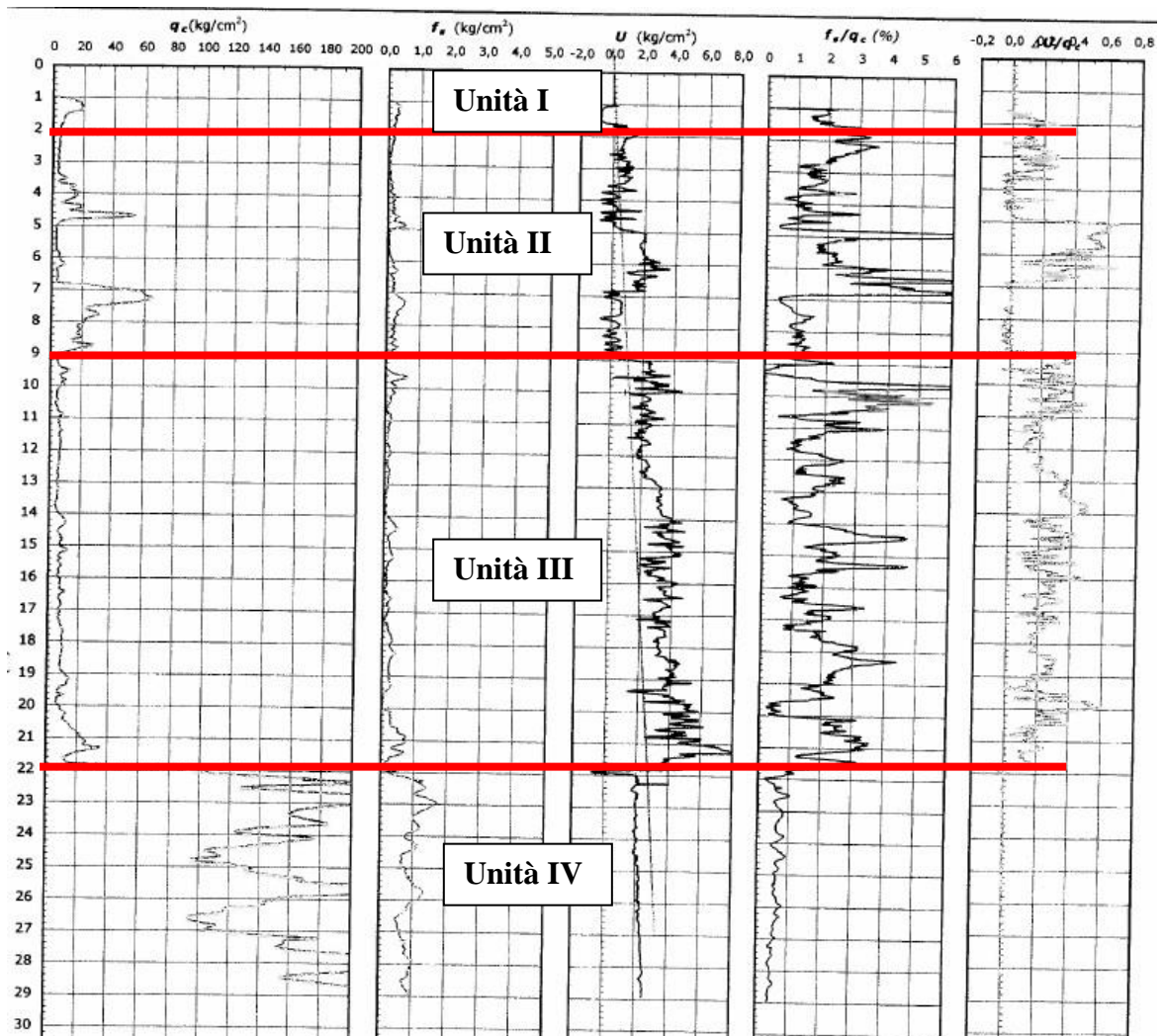
### **Sezione di riferimento A – A' (figura 44)**

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 45)**

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 44 CPTU1-04 (Sezione A-A)**

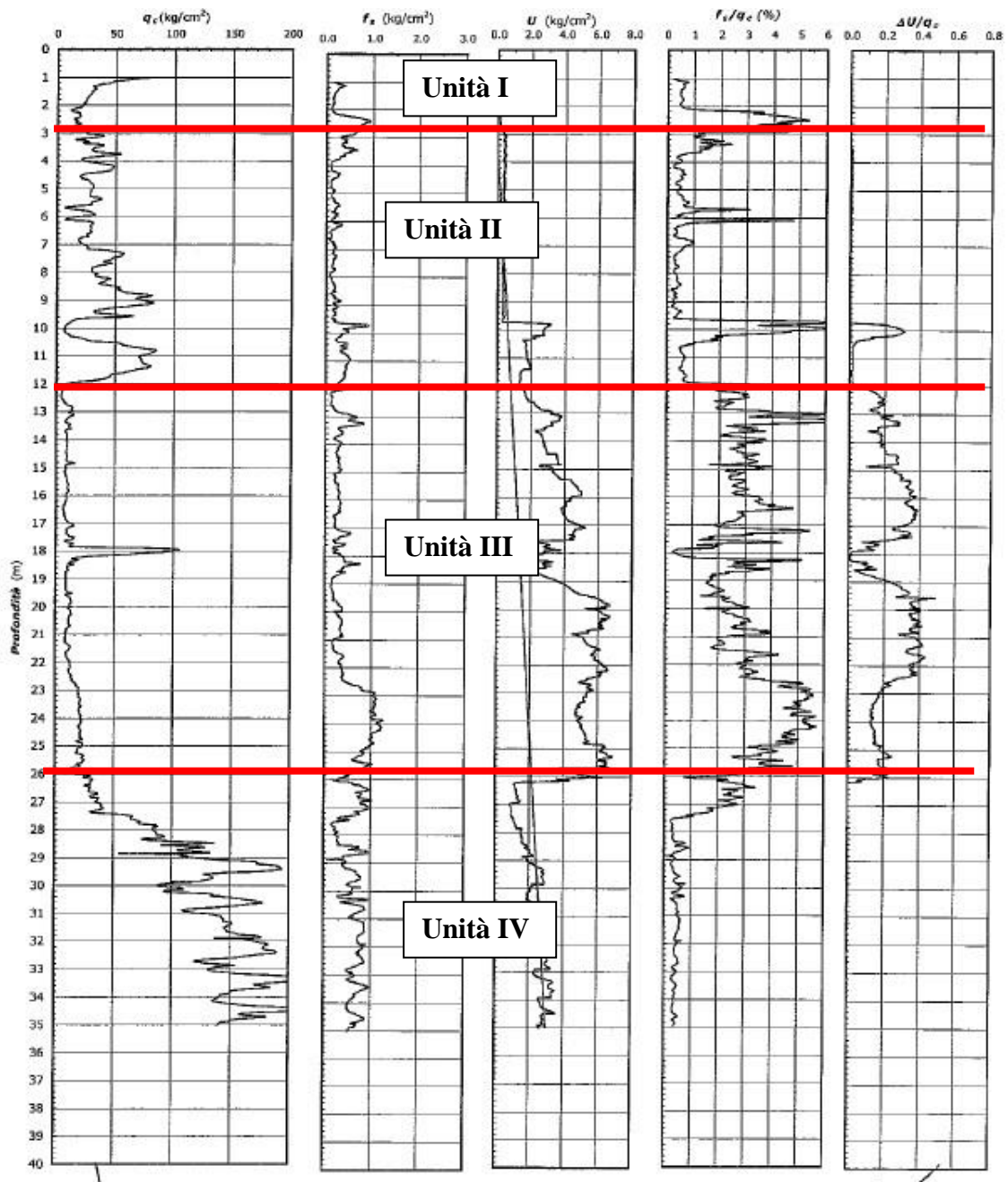


Figura 45 CPTU1-08 (Sezione C-C)

**Sezione di riferimento B – B' (figure 46-49)**

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.



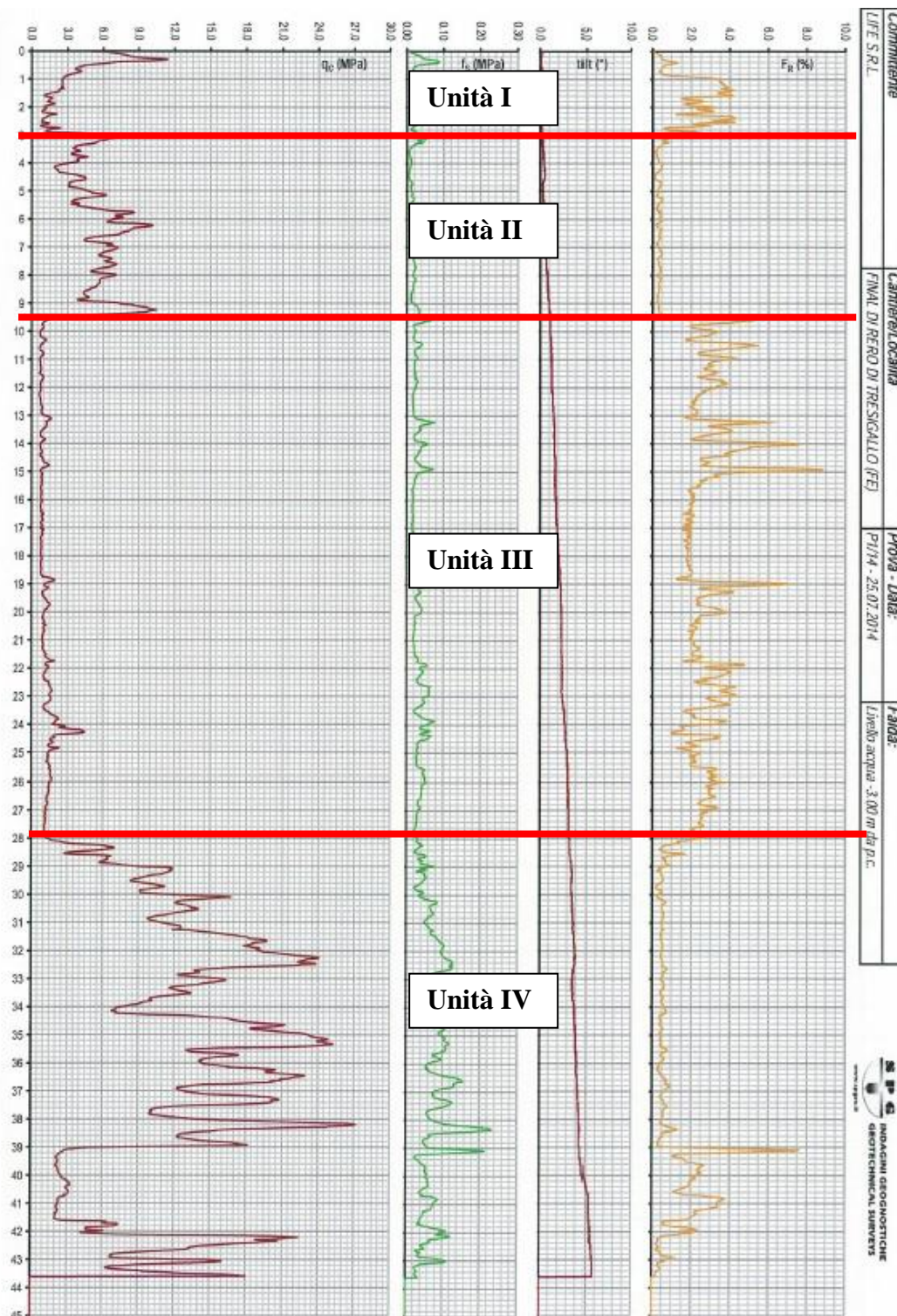


Figura 46 CPT1-14 Ponte Final di Rero sponda destra

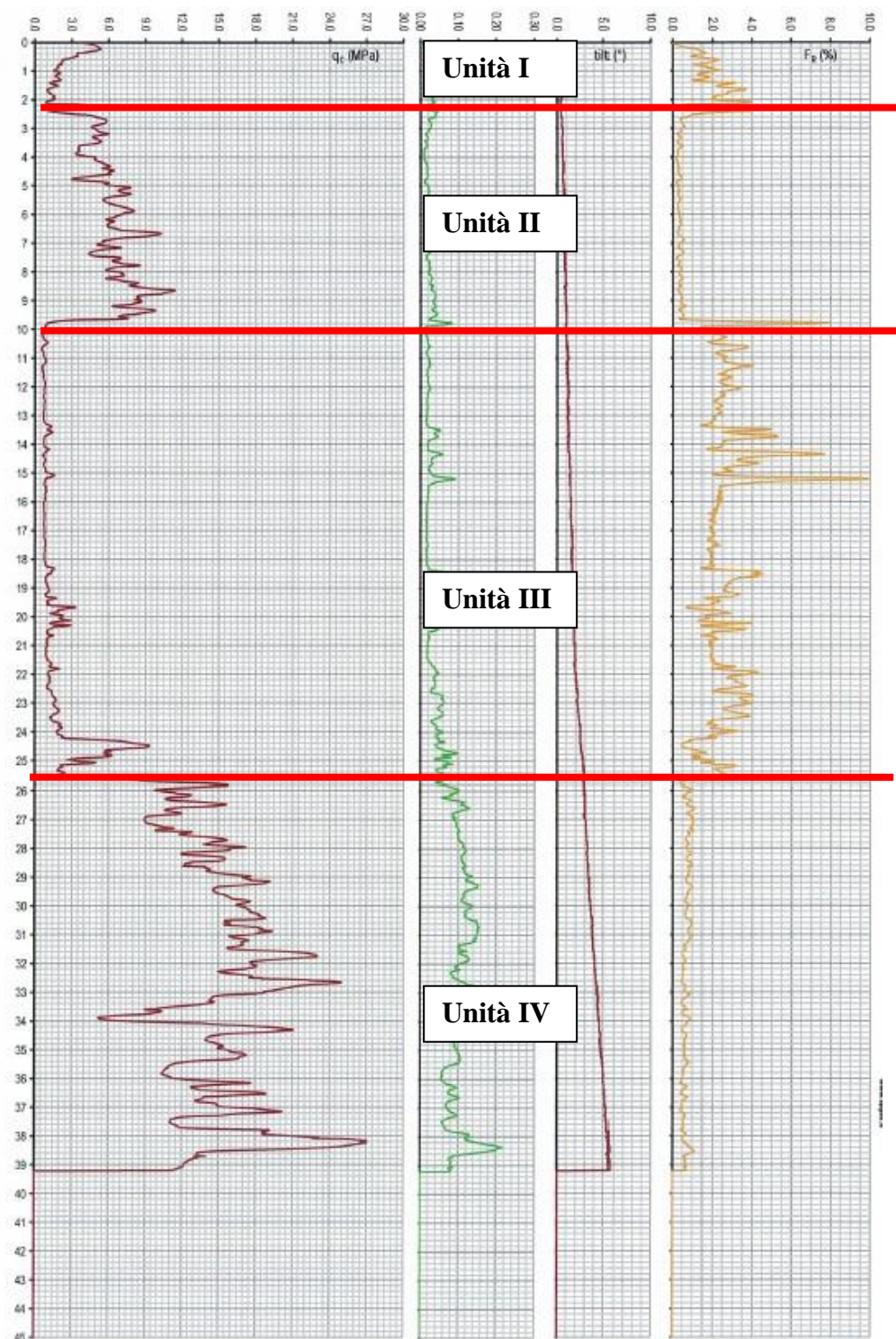


Figura 47 CPT2-14 Ponte Final di Rero sponda destra

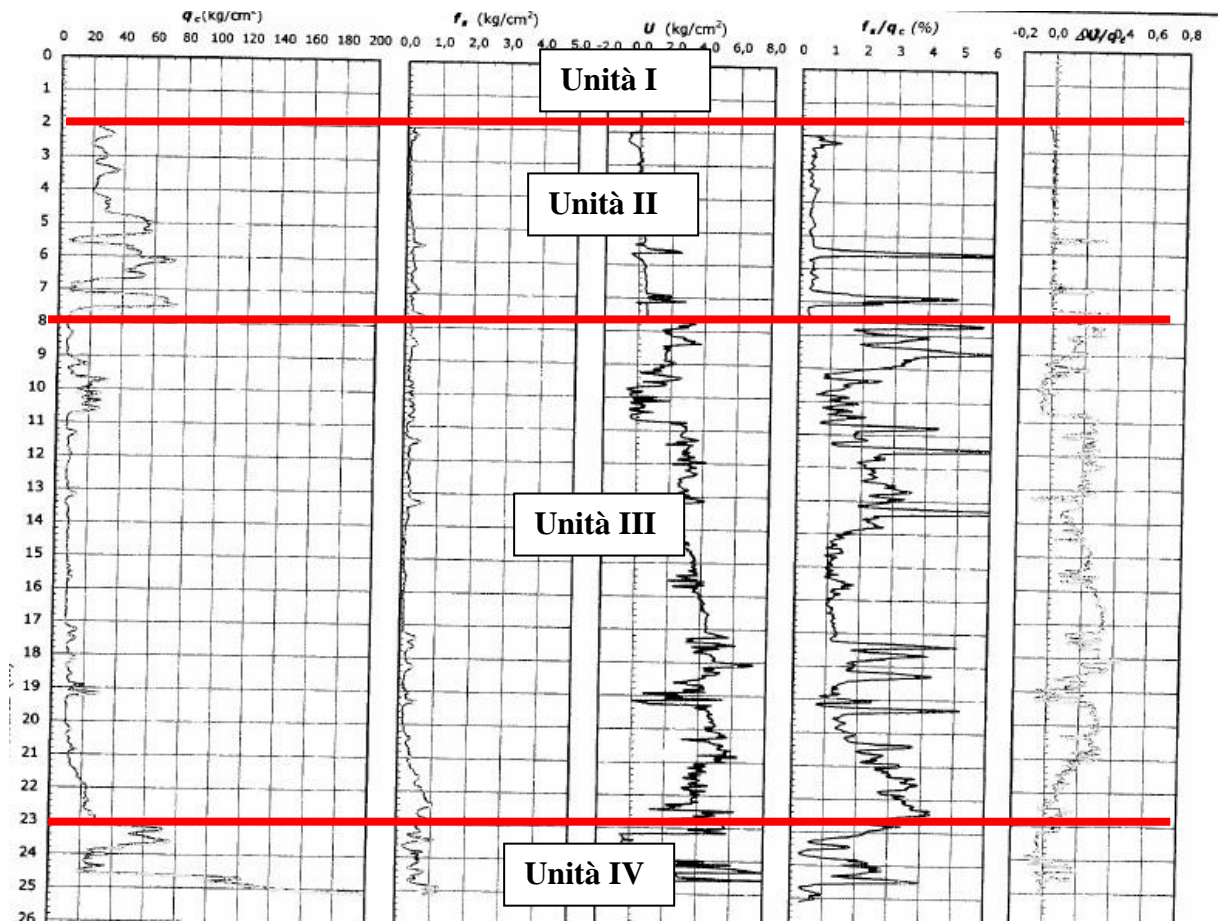


Figura 48 CPTU2-04 Ponte Final di Rero sponda sinistra

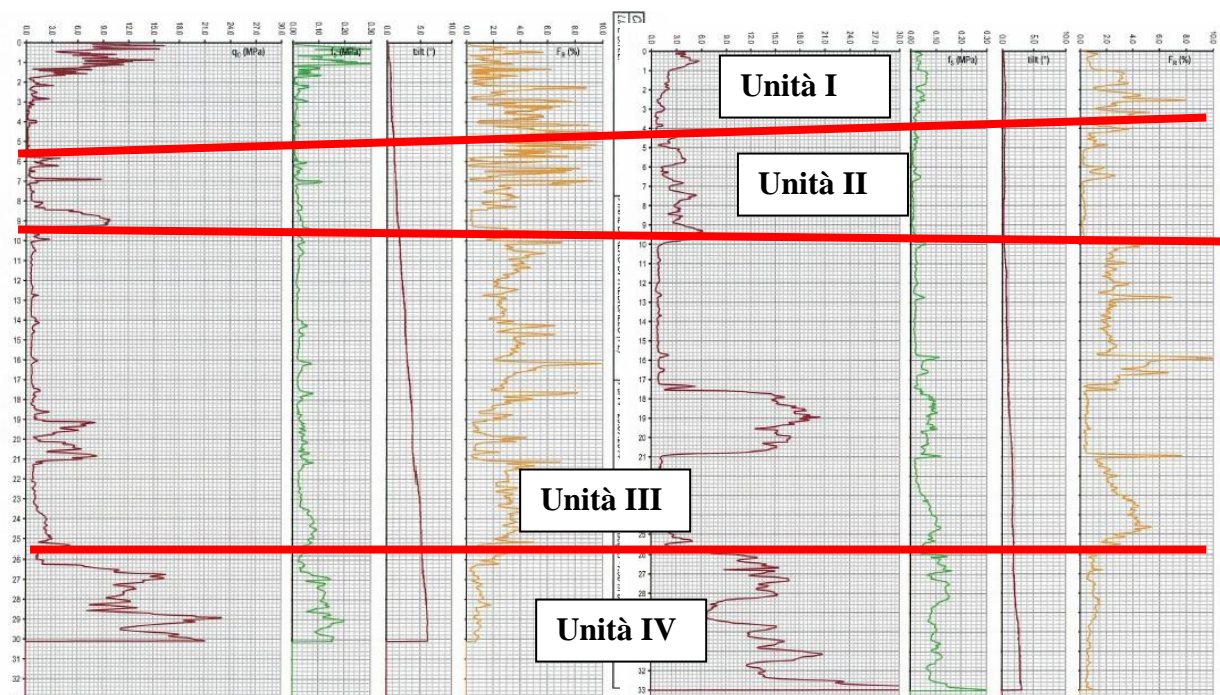


Figura 49 CPT3-14 e CPT4-14 sulle due sponde, zona passerella

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.

## 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.

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.

I terreni di fondazione sulla base delle indagini in sito, sono stati classificati di categoria C, ovvero  $180 < V_{s,30} < 360$  (m/s).

È stata eseguita una verifica dei terreni di fondazione che ha escluso fenomeni di liquefazione.

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 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.

Assestimetri a piastra potranno essere adottati per una verifica del decorso dei cedimenti e delle ipotesi progettuali in corso d'opera.

Sui piani di posa dei rilevati stradali dovrà essere previsto uno scotico e bonifica, stimato in uno spessore di 20+20 cm, limitato all'asportazione del vegetale e alla 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, e la profilatura delle scarpate con altezze modeste (circa 3 m) interrotte da banche larghe 2 m dove mettere a dimora un canneto con funzione di smorzamento del moto ondoso.