



Studio Servizi Tecnici
Settore geologia e ambiente

DOTT. GEOL. THOMAS VERONESE

Via Roma, 10

44021 CODIGORO (Ferrara)

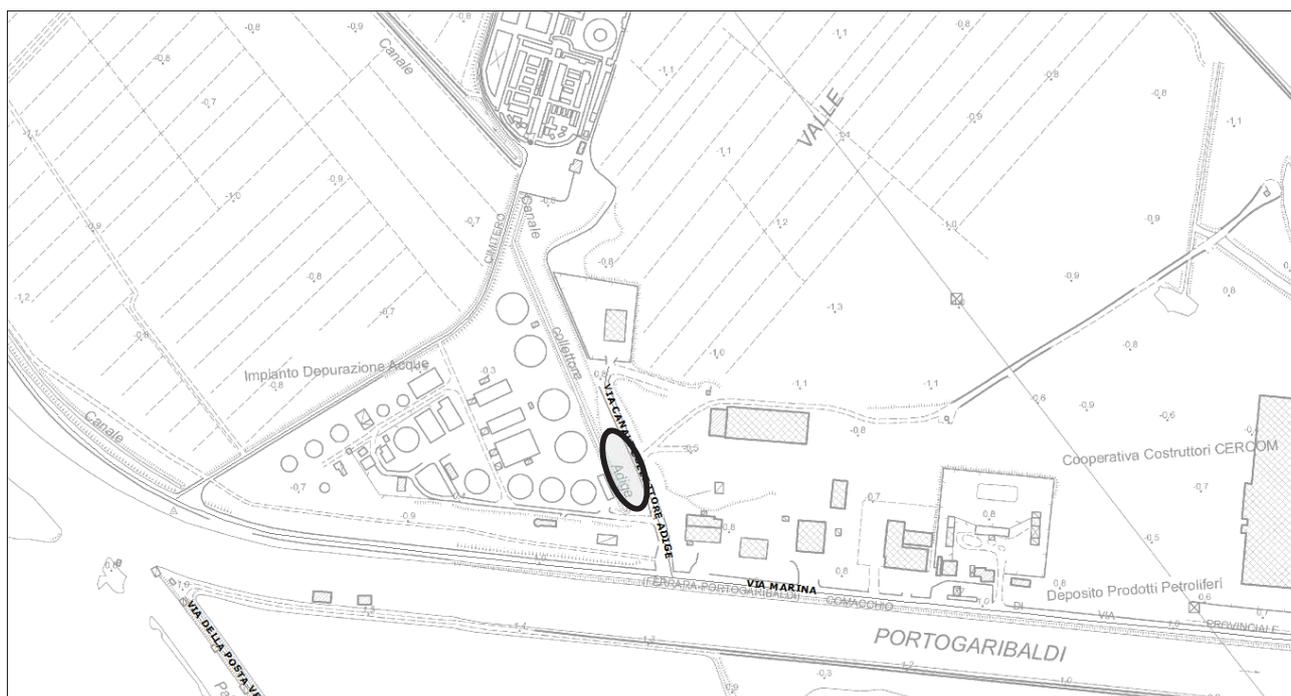
Tel e fax. 0533 / 713798 cell. 335-5240380

E-mail: thomas.veronese@tin.it

MODELLAZIONE GEOLOGICA, SISMICA e GEOTECNICA SULLE INDAGINI

COMUNE DI COMACCHIO
PROVINCIA DI FERRARA

Studio dei terreni di fondazione per il progetto di realizzazione di scolmatore di prima pioggia nel Canale Collettore Adige sito in via Canale Collettore Adige a Comacchio (Fe), riferimenti catastali foglio 48 mappale 45 e 69 del comune di Comacchio (Fe).



Committente: **C.A.D.F. s.p.a.**
Sede in: via Vittorio Alfieri n.3
44021 Codigoro (Fe)
P. Iva: 0 1 2 8 0 2 9 0 3 8 6

Studio S.S.T. SETTORE GEOLOGIA E AMBIENTE

Geotecnica; Studio terreni di fondazione; Rilevamento geologico; Rilievi topografici; Geofisica - Contributi allo Studio di Impatto Ambientale; Assistenza alle pubbliche amministrazioni negli studi di fattibilità e di realizzazione dei P.R.G., cimiteri, discariche, piani attività estrattive, studi di acquiferi per la tutela e per l'utilizzo di risorse idriche sotterranee; subirrigazioni.

09 marzo 2016
Timbro

INDICE:

1. PREMESSA	2
NORMATIVA E RACCOMANDAZIONI DI RIFERIMENTO.....	3
2. MODELLAZIONE GEOLOGICA.....	3
2.1. GEOLOGIA STRUTTURALE DELL'AREA	3
2.2. CARATTERI STRATIGRAFICI E LITOLOGICI.....	5
2.3. CARATTERI GEOMORFOLOGICI.....	7
2.4. CARATTERI IDROGEOLOGICI.....	8
3. DEFINIZIONE DEI PARAMETRI SISMICI	10
3.1. DATI DI AUSILIO PER LA PROGETTAZIONE SISMICA	10
<i>Categoria di suolo di fondazione</i>	10
<i>Azioni Sismiche "D.M. 14 gennaio 2008"</i>	15
<i>Magnitudo di progetto</i>	18
3.2. VERIFICA DELLA RESISTENZA ALLA LIQUEFAZIONE DELLE SABBIE	19
3.3. CALCOLO CEDIMENTI POSTSISMICI.....	23
4. MODELLAZIONE GEOTECNICA.....	24
4.1. ACQUISIZIONE DATI CON PROVE PENETROMETRICHE STATICHE	25



FASE DI ESECUZIONE DELLA PROVA PENETROMETRICA STATICA SCPTU1 e CPTU2

1. PREMESSA

Su incarico del C.A.D.F. s.p.a., con sede in via Vittorio Alfieri 3 a Codigoro (Fe), si redige lo studio per ricostruire la modellazione geologica, sismica e geotecnica sulle indagini per lo “studio dei terreni di fondazione per il progetto di realizzazione di scolmatore di prima pioggia nel Canale Collettore Adige” sito in via Canale Collettore Adige a Comacchio (Fe), riferimenti catastali foglio 48 mappale 45 e 69 del comune di Comacchio (Fe).

L'ubicazione del sito è riportata in **FIGURA 1.1**.

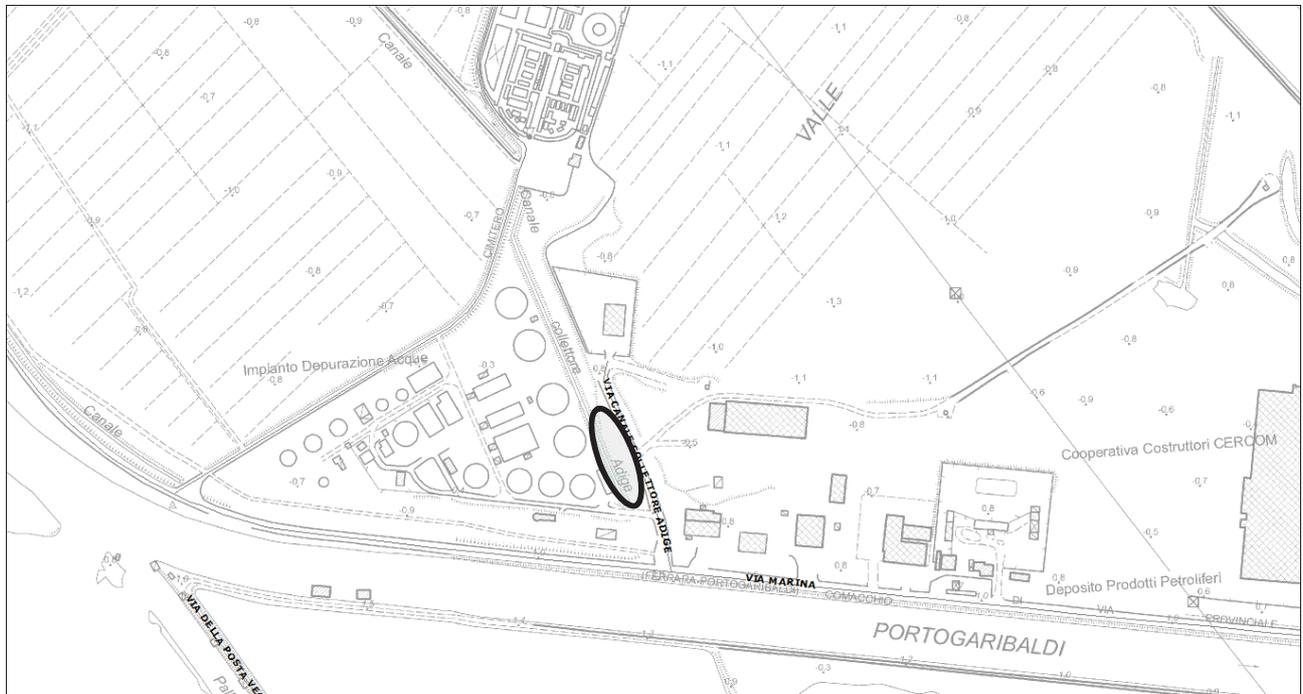


FIGURA 1.1 – Ubicazione area di intervento a Comacchio (Fe)

Normativa e Raccomandazioni di riferimento

- Decreto del Ministero delle Infrastrutture 14 gennaio 2008 “Approvazione delle nuove norme tecniche per le costruzioni”, pubblicato sulla G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008, suppl. ord. n. 30, che entrano in vigore il 6 marzo 2008.
- Circolare Applicativa n° 617 del 02/02/2009 alle NTC/2008.
- Delibera Assemblea Legislativa n°112/2007 della Regione Emilia Romagna “Atto di Indirizzo e coordinamento tecnico” per gli studi di microzonizzazione sismica.
- Decreto della Giunta della Regione Emilia Romagna n. 2193/2015 "Approvazione aggiornamento dell'atto di coordinamento tecnico denominato "Indirizzi per gli studi di microzonazione sismica in Emilia - Romagna per la pianificazione territoriale e urbanistica", di cui allam deliberazione dell'assemblea legislativa 2 Maggio 2007, N. 112.
- A.G.I. (Associazione Geotecnica Italiana)
“Raccomandazioni sulla programmazione ed esecuzione delle indagini geotecniche (giugno 1977).
- A.G.I. (Associazione Geotecnica Italiana)
“Raccomandazioni sui pali di fondazione (dicembre 1984)”.- A.G.I. (Associazione Geotecnica Italiana)
“Aspetti geotecnici nella progettazione in zona sismica (Edizione Provvisoria, marzo 2005)”.- C.N.R. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione.- Eurocode EC-7: Geotechnics, design – dicembre 1987.- C.N.R. UNI Ente Nazionale Italiano di Unificazione.- Eurocode EC-8: Design provisions for earthquake resistance of structures – ottobre 1994.

2. MODELLAZIONE GEOLOGICA

2.1. GEOLOGIA STRUTTURALE DELL'AREA

Nella **FIGURA 2.1** si riporta la sezione geologica passante per Cotignola, Bagnacavallo, Ravenna, Comacchio, Codigoro, Mesola, Chioggia in cui si possono apprezzare gli spessori dei sedimenti del Quaternario sopra i pliocenici, che coincide con il passaggio dai sedimenti sciolti a quelli litificati o pseudolitificati.

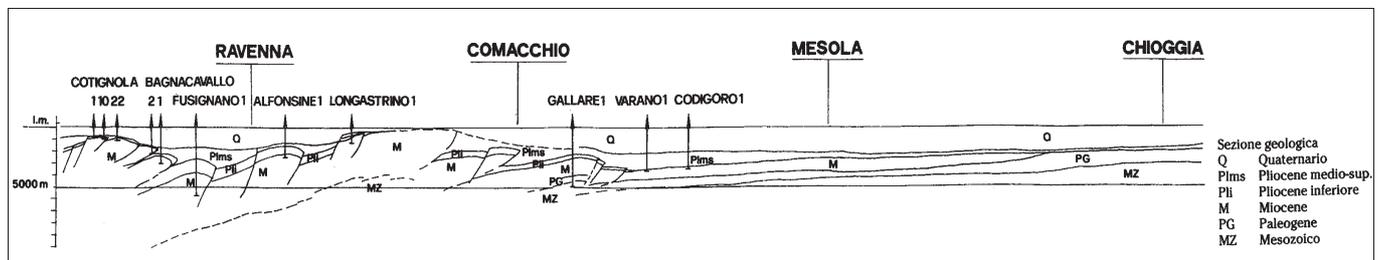


FIGURA 2.1 - Sezione geologica della bassa pianura padana.

Nella **FIGURA 2.2** si riporta uno stralcio della Carta Strutturale della Pianura Padana, con le Pieghe Ferraresi dell'Appennino sepolto (Pieri & Groppi, 1981, CNR, 1992) con visibili le varie strutture sepolte e le faglie e sistemi trascorrenti attivi e non attivi, che sono all'origine della nuova attribuzione alla Zona sismica 3, in cui Comacchio è stato inserito nella OPCM 3274/2003.

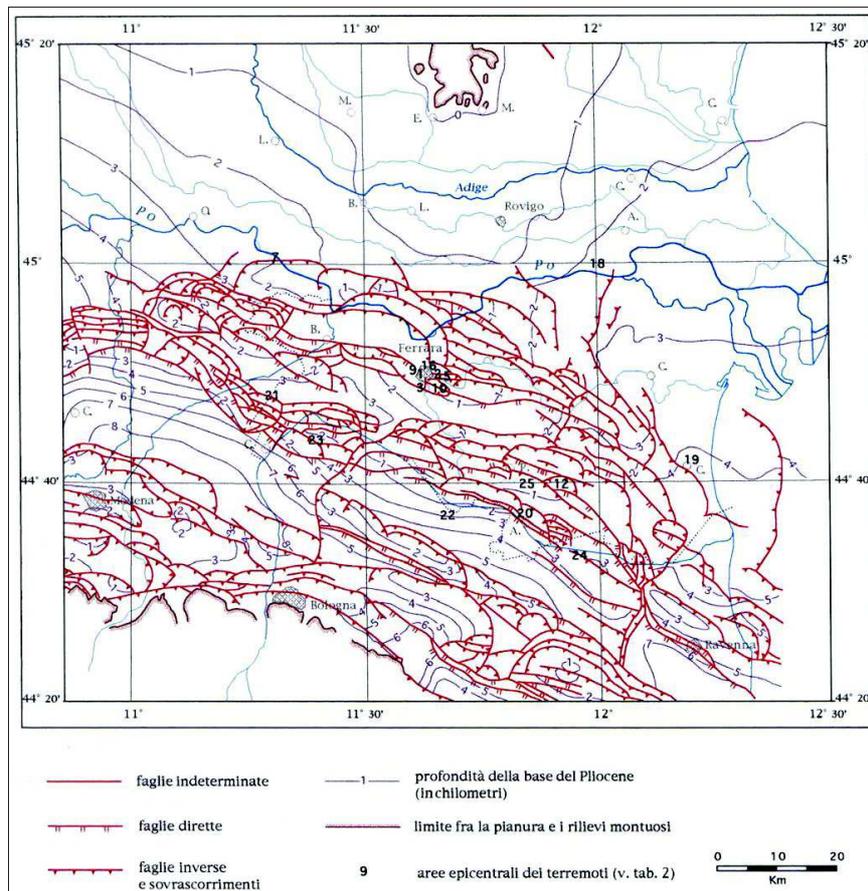


FIGURA 2.2 – Carta strutturale della Pianura Padana (Pieri e Groppi, 1992)

Si fa inoltre presente che la parte del territorio comunale di Comacchio in cui è ubicato il sito allo studio, ricade al di fuori della zona sismogenetica 912 (**FIGURA 2.3**), e dunque, in teoria, non è sede epicentrale di eventi sismici di energia importante.

Di conseguenza in questa zona è previsto che si verifichino sismi con energie piuttosto limitate, di Magnitudo non superiori a 5,50.

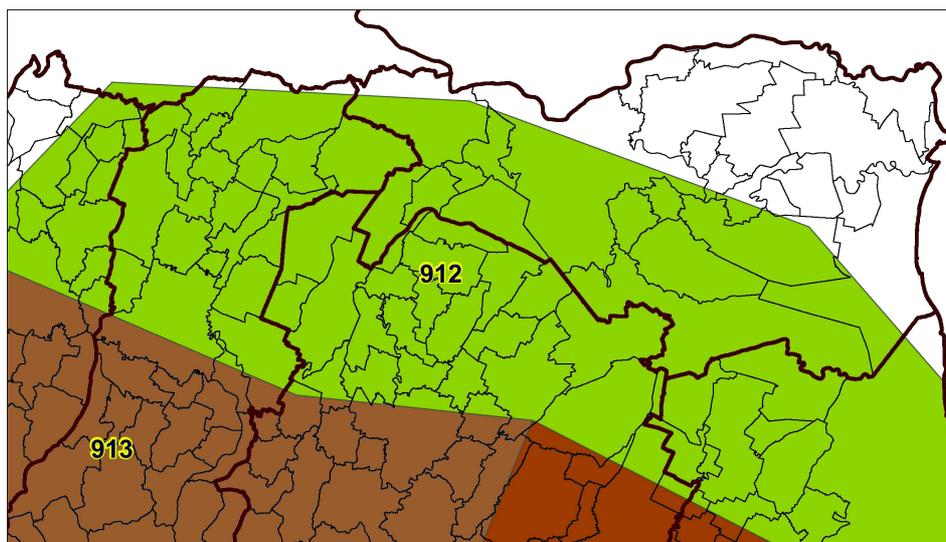


FIGURA 2.3 - Mappa delle aree sismogenetiche dell'Italia Settentrionale

2.2. CARATTERI STRATIGRAFICI E LITOLOGICI

Generalmente i Lidi della Provincia di Ferrara sono caratterizzati dal punto di vista stratigrafico e litologico da un primo strato sabbioso di spessore variabile tra i 14 e i 16m costituito da sabbie eoliche in superficie e sabbie litoranee in profondità con puntuali alternanze di livelli decimetrici di limi sabbiosi e limi argillosi di ambiente deltizio e di prodelta. Tali sedimenti sabbiosi ricoprono i sedimenti marini costituiti da argille limose e limi, con frequenti sottili lenti sabbiose. Tra i 25 ed i 30m dal p.c. si rilevano i sedimenti del pleistocene, generalmente caratterizzati da un primo strato di sabbie alluvionali continentali in graduale passaggio ad argille e limi sempre di ambiente continentale.

Per la validazione del modello geologico è stata eseguita una indagine specifica, progettata in funzione dell'importanza dell'opera allo studio, consistente in due prove penetrometriche statiche con punta elettrica con piezocono SCPTU1 e CPTU2 spinte rispettivamente fino alla profondità di -31,00 m da p.c. e -20,00 m da p.c. con *rif. U21-16*.

Il punto investigato con la prova penetrometrica statica con punta elettrica SCPTU1 rileva:

DA	A	qcm	litol.	consistenza ed addensamento
m	m	MPa	(-)	(-)
0,0	1,5	--	Rip	riporto
1,5	2,0	1,99	A Rip	consistente
2,0	3,4	0,27	T	molle e organica
3,4	4,3	0,64	Al-La	moderatamente consistente
4,3	6,0	4,22	S	moderatamente addensata
6,0	8,4	2,45	S	poco addensata
8,4	14,1	7,41	S	moderatamente addensata
14,1	28,0	1,11	Al-La	consistente
28,0	28,7	6,94	S	moderatamente addensata
28,7	31,0	1,43	A	consistente

Il punto investigato con la prova penetrometrica statica con punta elettrica CPTU2 rileva:

DA	A	qcm	litol.	consistenza ed addensamento
m	m	MPa	(-)	(-)
0,0	1,0	--	Rip	riporto
1,0	1,5	2,04	A Rip	consistente
1,5	2,5	0,68	A	moderatamente consistente
2,5	4,2	0,38	T	molle e organica
4,2	13,5	5,26	S	moderatamente addensata
13,5	17,1	3,14	SI	poco addensata
17,1	20,0	1,16	Al-La	consistente

Legenda Litologia	
RIP	Riporto
T	Torba
A	Argilla
AL-La	Argilla Limosa - Limo Argilloso
L-Ls	Limo - Limo Sabbioso
SI	Sabbia Limosa
S	Sabbia

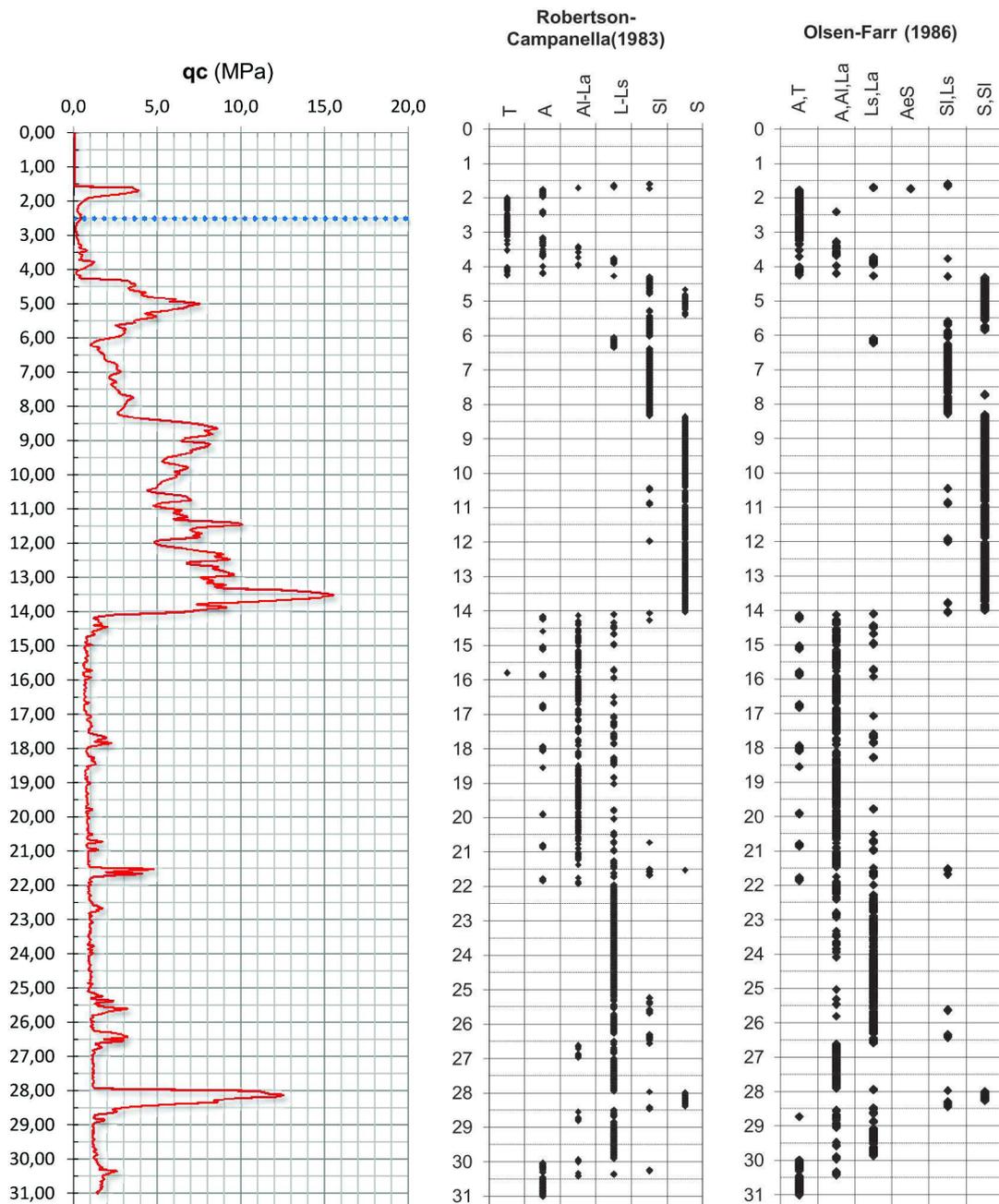


DIAGRAMMA DI RESISTENZA E LITOLOGIE – SCPTU1

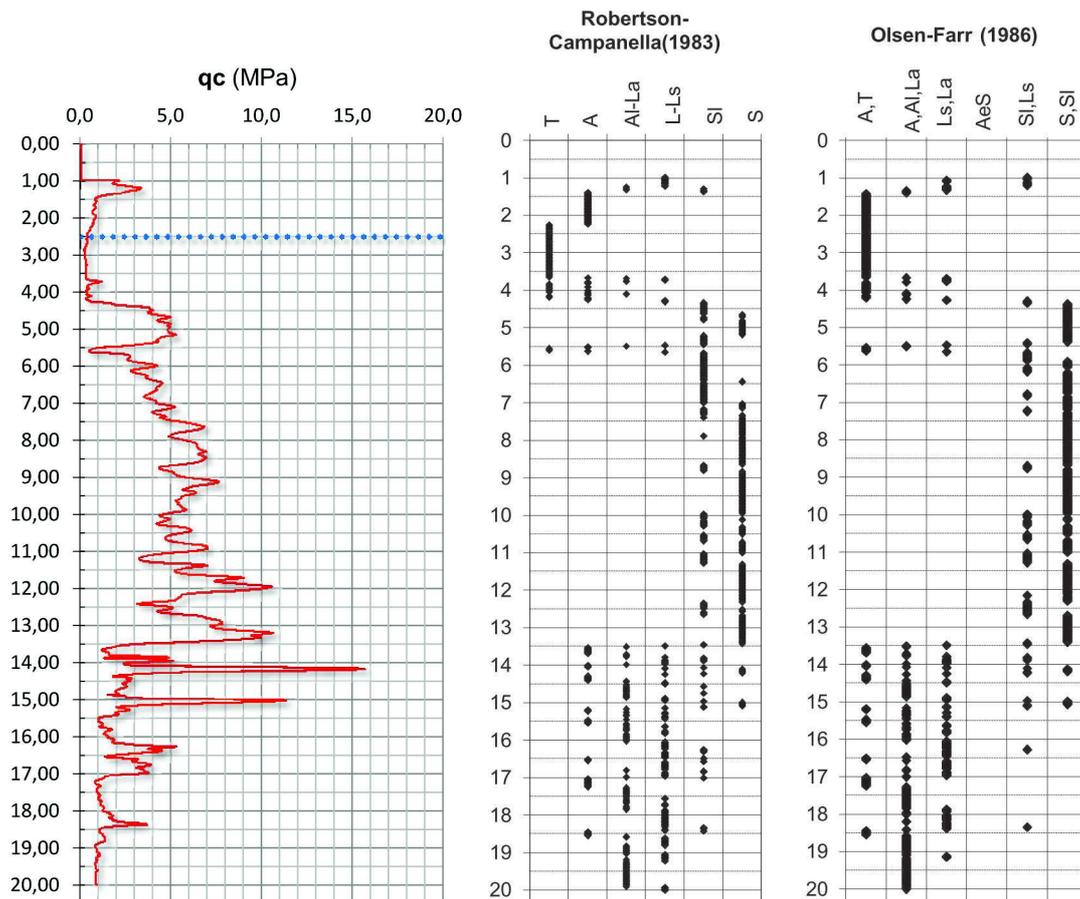


DIAGRAMMA DI RESISTENZA E LITOLOGIE – CPTU2

Da queste indagini e dalla fotointerpretazione aerea di immagini fotografiche in B/N del sito, si possono ricostruire i caratteri geomorfologici del sito.

2.3. CARATTERI GEOMORFOLOGICI

L'area di intervento ricade in un'area geomorfologicamente complessa, dove ha avuto sede per circa un millennio la foce del fiume Padoa - Eridano, antica diramazione di foce principale, di quello che è poi diventato l'attuale fiume Po. In questa area di delta fluviale ambienti di sedimentazione diversi si sono frequentemente sovrapposti ed affiancati, con il risultato di avere una forte disomogeneità stratigrafica in senso sia verticale che orizzontale.

Le facies deposizionali che hanno interferito l'un l'altra durante la progradazione dominante della linea di costa (accompagnata da eventi non rari di trasgressione marina), hanno visto ambienti marini, marino-costieri, fluviali, palustri succedersi alternando la deposizione di sedimenti di alta e di bassa energia idrodinamica.

In **FIGURA 2.4** è riportato uno stralcio della Carta Geomorfologica della Provincia di Ferrara che mostra l'ubicazione dell'area d'intervento collocata su depositi vallivi e palustri inconsistenti con deposizione di sedimenti a bassa e bassissima energia.

La stessa variabilità di strutture geomorfologiche in affioramento caratterizza anche il sottosuolo, offrendo la medesima eterogeneità.

I sedimenti che occupano le aree come quella in esame vengono depositati in diverse condizioni idrodinamiche, consentendo sia la deposizione di sedimenti fini quali limi ed argille, che di sedimenti granulari quali le sabbie. Con le indagini eseguite si è constatato che si tratta prevalentemente di sedimenti fini alluvionali e distali.

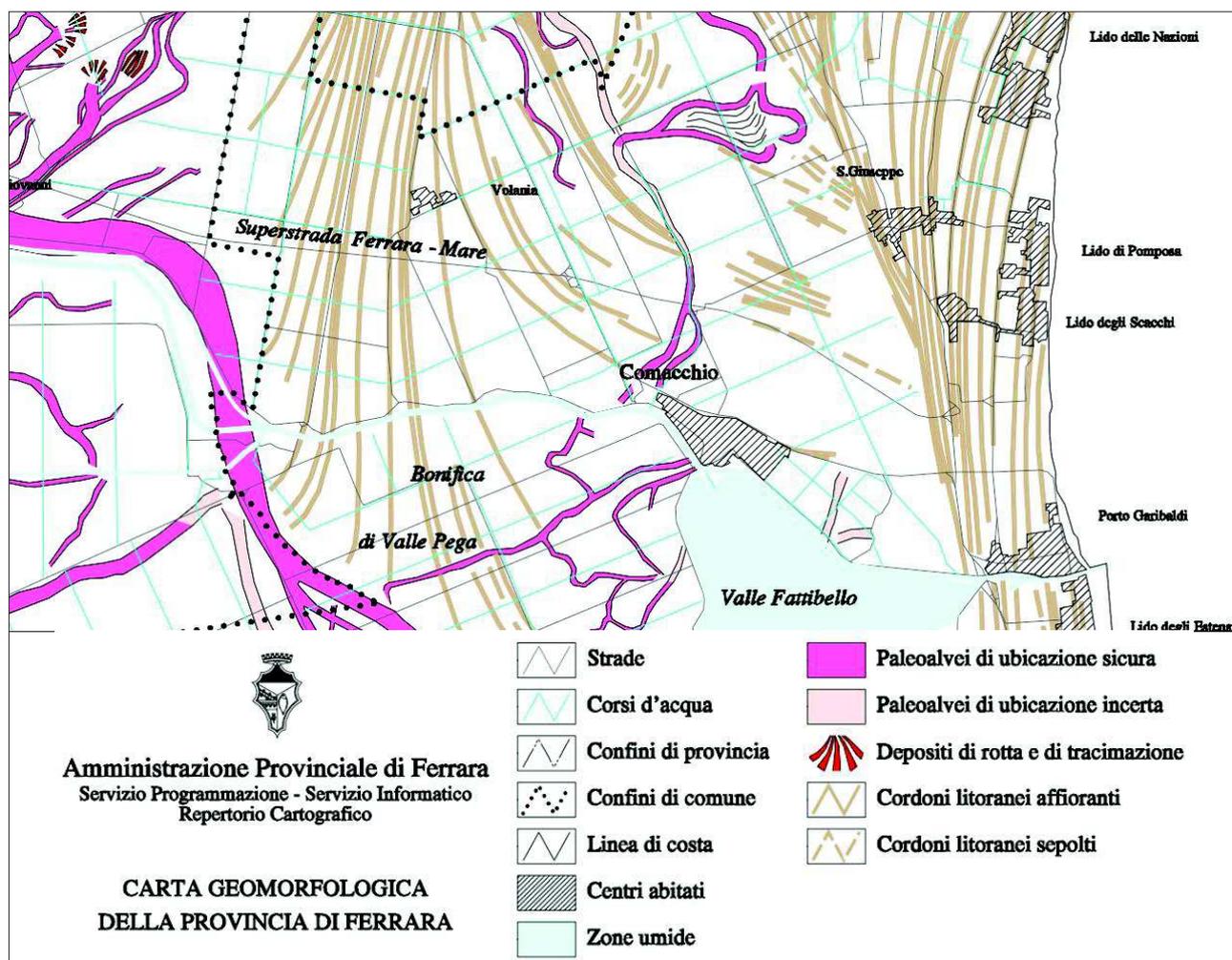


FIGURA 2.4 – Stralcio della Carta geomorfologica della provincia di Ferrara.

2.4. CARATTERI IDROGEOLOGICI

L'area in esame si trova a sud ovest rispetto all'abitato di Comacchio ed è posta ad una quota di circa +0,80 m sul l.m.m. (valori da CTR).

Le acque meteoriche che precipitano all'interno dell'area che delimita il sito in esame vengono dirette all'interno del Canale Collettore Adige situato in adiacenza della vasca di progetto.

Si veda in proposito la FIGURA 2.5 che riporta uno stralcio della *Carta delle aree allagate in seguito a piogge intense negli anni 1995 e 1996* (Amministrazione provinciale di Ferrara), dove vengono evidenziati i tracciati dei canali di scolo. Da questa carta si può inoltre evincere che l'area in esame non è stata soggetta ad allagamenti persistenti (aree tratteggiate).

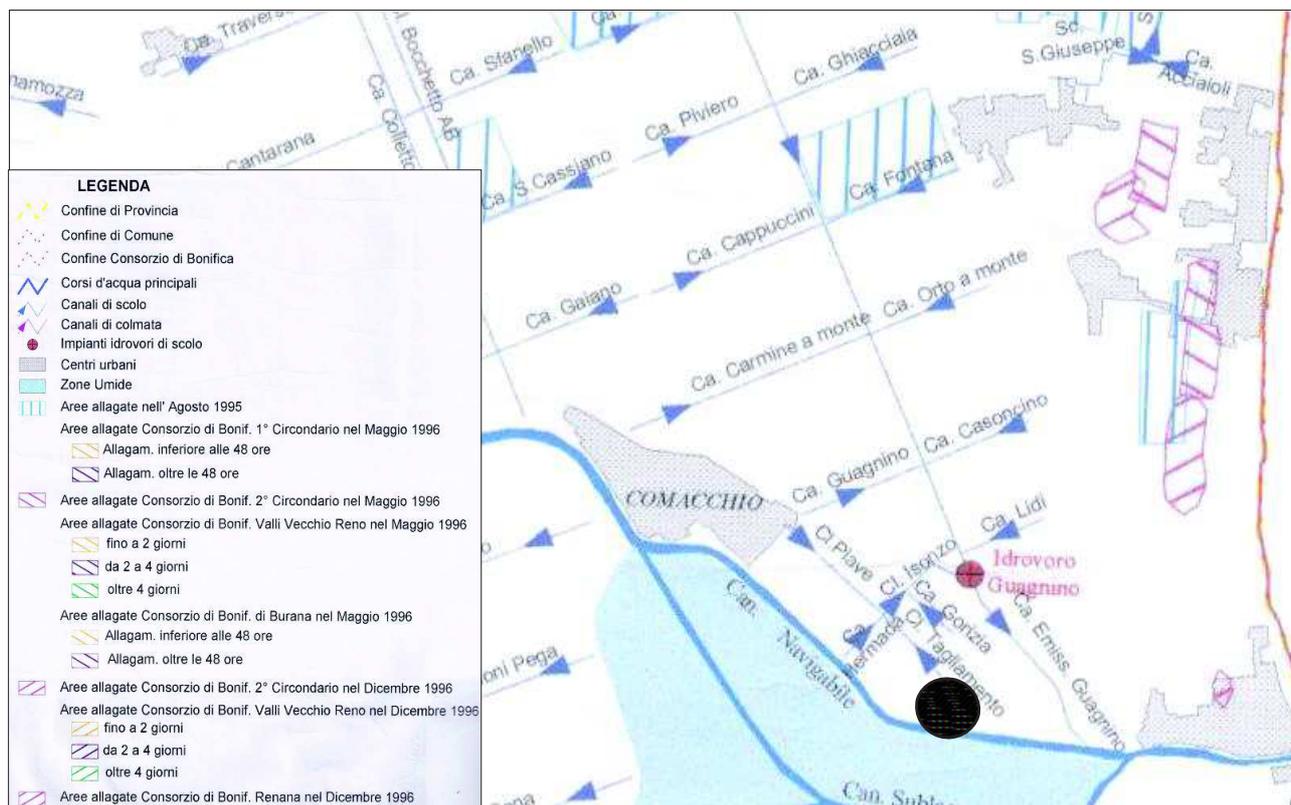


FIGURA 2.5 – Particolare della Carta delle aree allagate in seguito a piogge intense negli anni 1995 e 1996
(Amministrazione provinciale di Ferrara)

Come visibile dalla ortofoto tratta da Google Earth, l'area è compresa tra il canale Navigabile a sud e Valle Molino a nord. In mezzo vi è un'area depressa soggetta ad azione di bonifica dove viene praticata una agricoltura senza pretese, per via dell'assenza di acque dolci irrigue e la presenza di acque di falda salmastre.

In **FIGURA 2.6** si riporta una sezione schematica la cui ubicazione in pianta è visibile nella **FIGURA 2.7**.

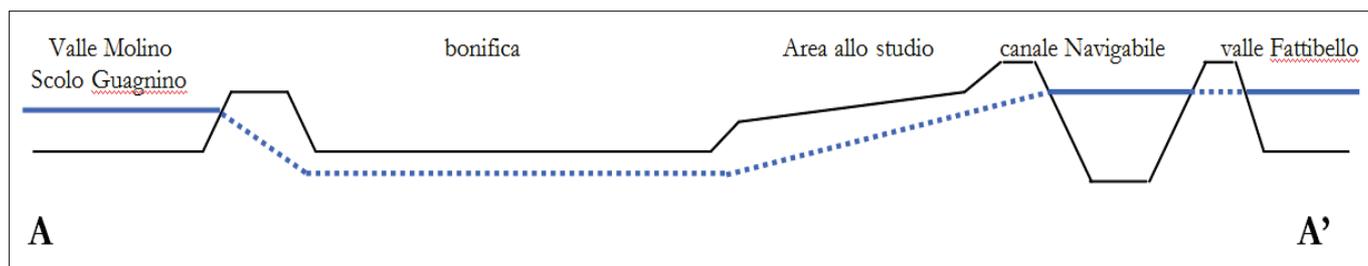


FIGURA 2.6 - Modello concettuale: sezione idrogeologica A-A' orientata nord-sud



FIGURA 2.7 - Modello concettuale in pianta su ortofoto e ubicazione della sezione idrogeologica A-A'.

3. DEFINIZIONE DEI PARAMETRI SISMICI

3.1. DATI DI AUSILIO PER LA PROGETTAZIONE SISMICA

“La Regione Emilia Romagna non è esente da attività sismo-tettonica. La sua sismicità può però essere definita media relativamente alla sismicità nazionale, poiché i terremoti storici hanno avuto magnitudo massima compresa tra 5,5 e 6 della scala Richter e intensità del IX-X grado della scala MCS. I maggiori terremoti (Magnitudo > 5,5) 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 (Magnitudo ≤ 5,5)** sono il margine appenninico-padano tra la Val d'Arda e Bologna, l'arco della dorsale ferrarese e il crinale appenninico” (Note illustrative, Carta Sismotettonica della Regione Emilia Romagna, 2004).

Gli eventi del maggio 2012 hanno dato magnitudo massime di 5,9.

Categoria di suolo di fondazione

La categoria di suolo dipende dal valore di V_{s30} . Il parametro V_{s30} rappresenta la media ponderata dei valori delle velocità dell'onda di taglio “S” nei primi 30 m di sottosuolo indagato, matematicamente espressa da:

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum \frac{h_i}{v_i}}$$

dove,

V_{s30} : velocità media ponderata delle onde di taglio “S”,

h_i : spessore dello strato i -esimo,

V_i : velocità delle onde di taglio “S” nello strato i -esimo.

Il valore di V_{s30} stato rilevato in sito attraverso misure dirette, mediante la realizzazione di una prova penetrometrica statica con punta elettrica e sismocono SCPTU1 con *rif. U21-16*, che raggiunge la profondità di -31,00 m da p.c..

Si ricorda che la V_{s30} va calcolata dal piano di posa della fondazione.

In **FIGURA 3.1** è riportato uno stralcio catastale della provincia di Ferrara con l'ubicazione della prova penetrometrica statica con punta elettrica e sismocono SCPTU1 con *rif. U21-16*.

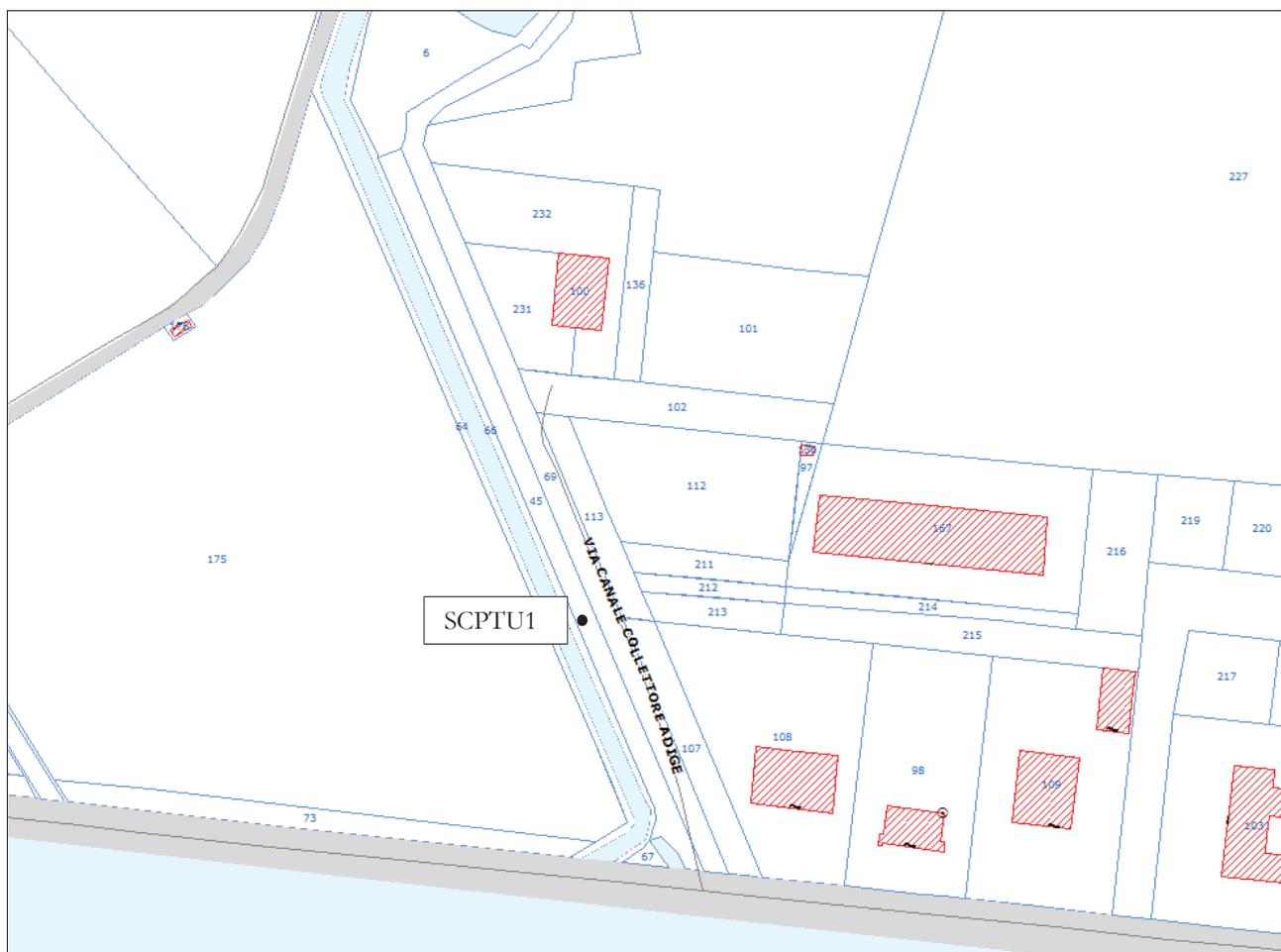


FIGURA 3.1 - Stralcio catastale con ubicazione della prova penetrometrica SCPTU1 con *rif. U21-16*

La prova consiste nell'inserire sulla punta elettrica della prova penetrometrica statica dei ricevitori (geofoni) che con opportuna strumentazione e una sorgente di onde in superficie possono essere misurati, a profondità diverse, in questo caso ad ogni metro (SCPTU1) fino alla profondità di -31,00 m da p.c., i tempi di arrivo delle onde sismiche fra la superficie (sorgente) ed i ricevitori (in profondità), analogamente a quanto avviene con il metodo geofisico cosiddetto "downhole".

La punta utilizzata prende il nome di Piezocono G1-CPL2IN (**FIGURA 3.2**).

In base ai tempi di arrivo conoscendo la distanza tra la sorgente ed il ricevitore si può calcolare la velocità delle onde sismiche ed in particolare delle onde di taglio (V_s).

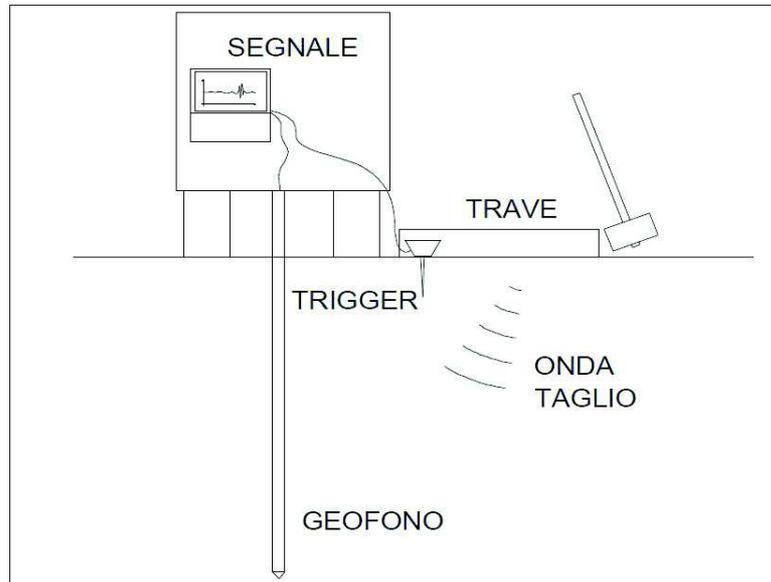
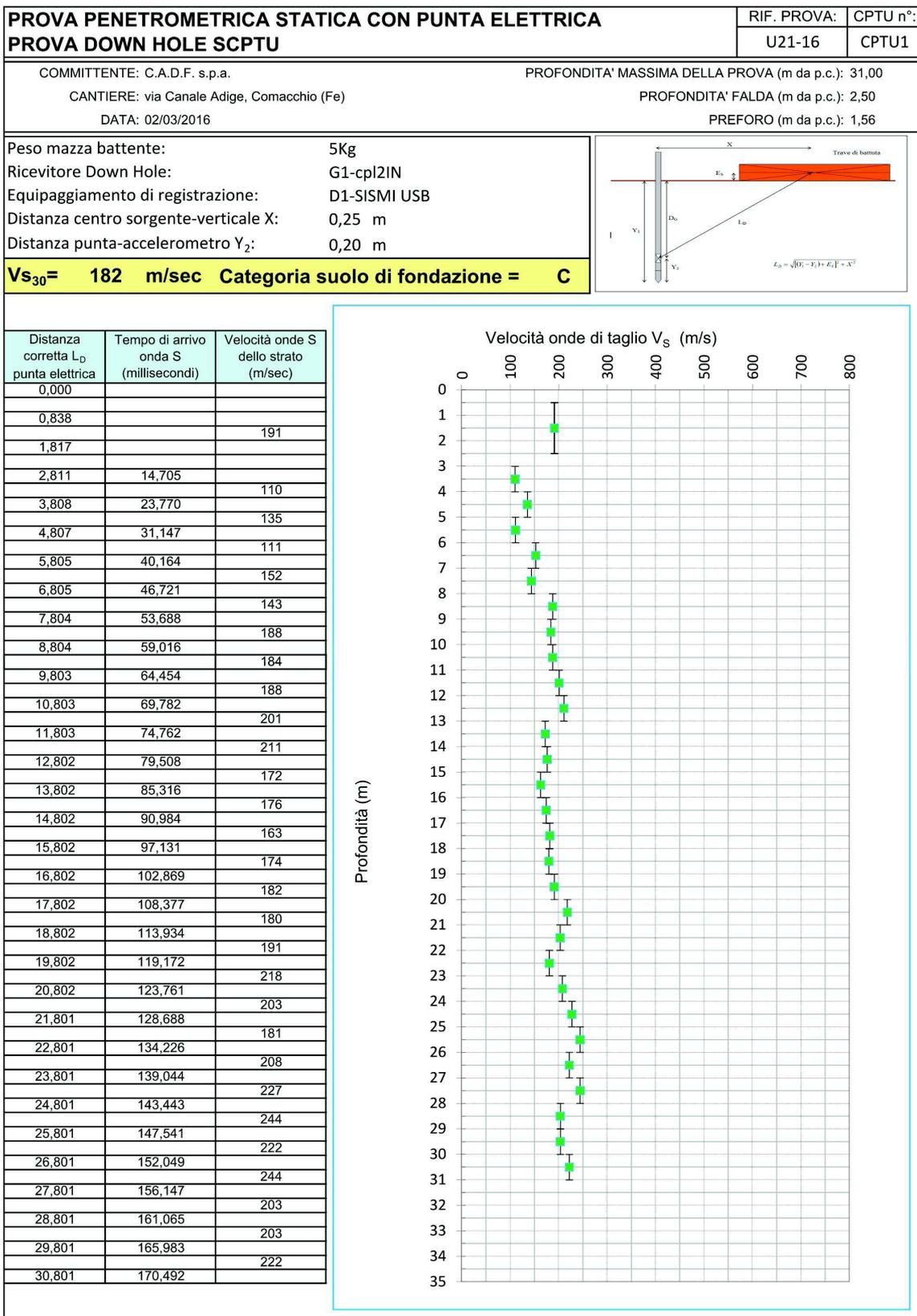


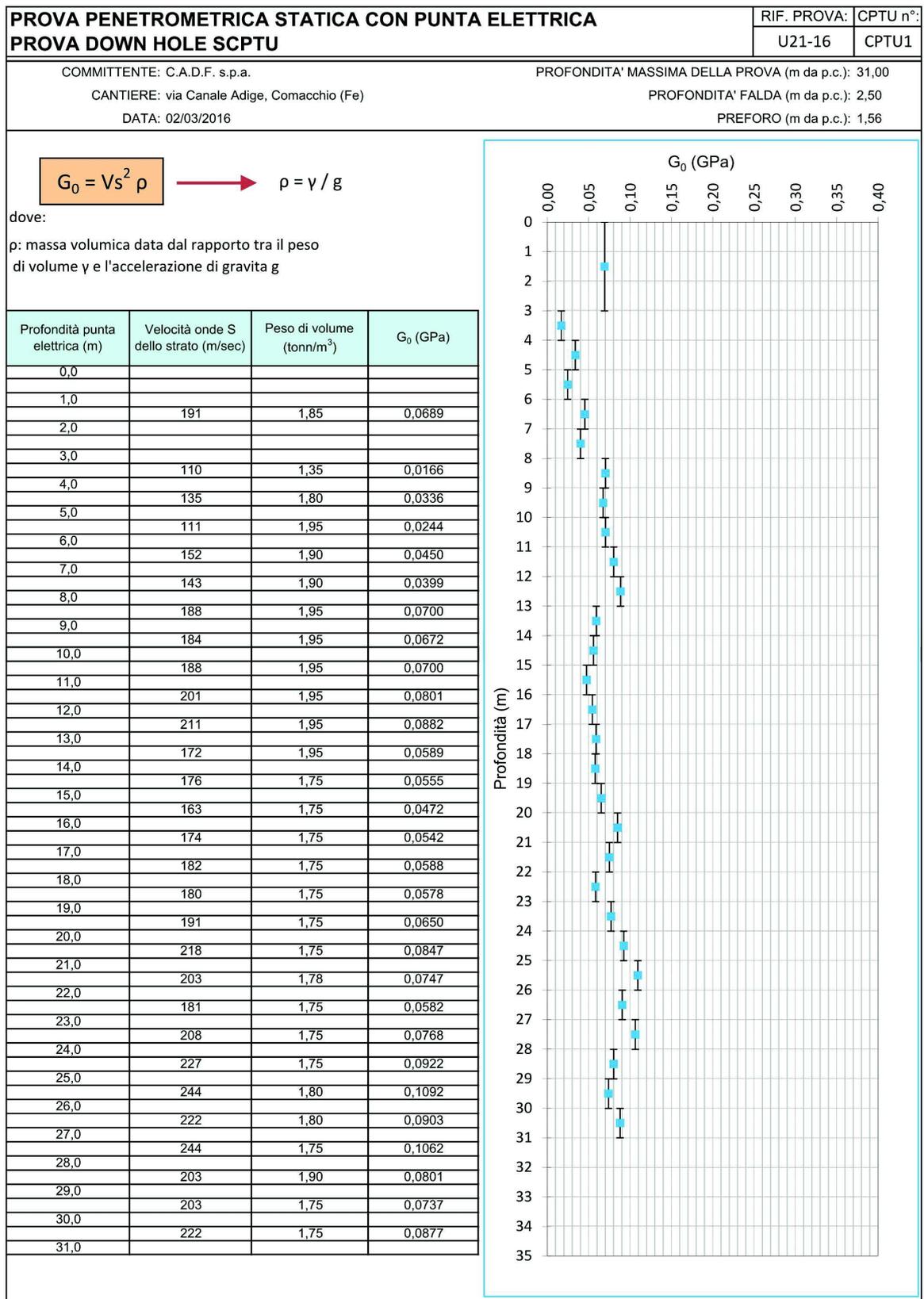
FIGURA 3.2 – Rappresentazione grafica della prova penetrometrica con piezocono sismico

Durante la realizzazione della prova penetrometrica statica con punta elettrica e sismocono SCPTU1 con rif. U21-16 sono state realizzate letture dirette dei tempi di arrivo delle onde di taglio S ad intervalli regolari fino alla profondità di -31,00 m da p.c..

Attraverso questo strumento è possibile determinare la velocità di propagazione delle onde S alla profondità di 30 metri (V_{S30}).

Di seguito viene riportata l'elaborazione della prova SCPTU1 svolta in sito con la rappresentazione del profilo verticale della velocità delle onde di taglio S ad ogni metro, la categoria di suolo di fondazione (ricavata attraverso il profilo fino alla profondità di -31 m da p.c.) e il profilo verticale di G_0 (che rappresenta il modulo di taglio alle piccole deformazioni).





Il valore di V_{S30} risultante dalla lettura dei tempi di arrivo delle onde S alla profondità di 30,00 m da p.c. è di 182 m/s e quindi la Categoria di suolo di fondazione è C.

$V_{S30} = 182 \text{ m/s}$ Categoria di suolo C

Azioni Sismiche “D.M. 14 gennaio 2008”

La classificazione sismica introdotta dall’OPCM 3519/2006, recepita dal D.M. 14/01/2008, attribuisce al comune di Comacchio un valore di accelerazione massima orizzontale di picco al suolo appartenente all’intervallo 0,100 – 0,125, con $T=0$, su suolo rigido ($V_{S30}>800\text{m/sec}$) e con una probabilità di superamento del 10% in 50 anni. Secondo il vigente D.M., gli spettri di risposta rappresentano delle componenti (orizzontale e verticale) delle azioni sismiche di progetto di un generico sito del territorio nazionale.

In **FIGURA 3.3**, si riporta un particolare della mappa di pericolosità sismica redatta dall’INGV, secondo la Tabella 1, allegata alle nuove Norme Tecniche per le Costruzioni.

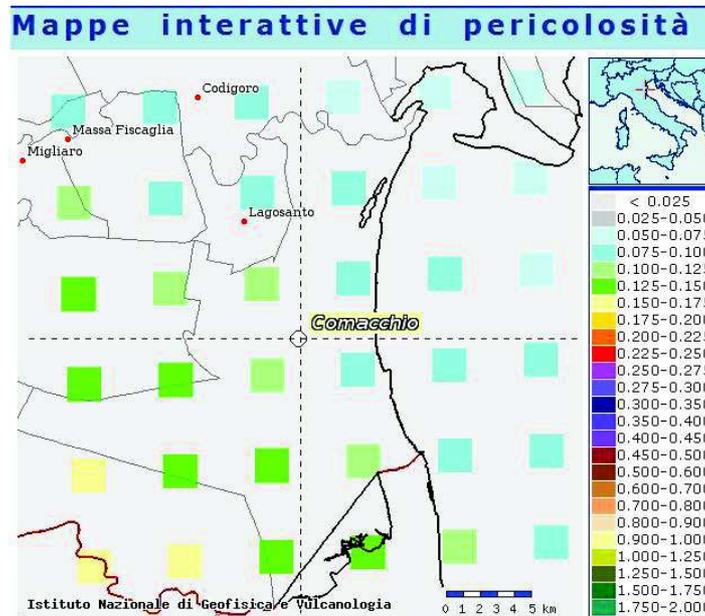


FIGURA 3.3 – Carta pericolosità sismica, da progetto DCP – INGV – S1. fonte: <http://esse1-gis.mi.ingv.it>

Per la scelta della strategia di progettazione, il progettista procede in funzione delle caratteristiche dell’opera progettata e definisce lo spettro di risposta. Ai fini della normativa, *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 del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale
- T^*C periodo di inizio del tratto a velocità costante dello spettro in accelerazione orizzontale.

In allegato alla norma per tutti i siti italiani, sono forniti i valori di a_g , F_0 e T^*C necessari per la determinazione delle azioni sismiche.

Nella **Tabella 3.1** tratta dalla normativa si riportano i valori di probabilità di superamento per i diversi Stati Limite a cui si può spingere la progettazione.

In questo caso si propone lo Stato Limite di Salvaguardia della vita, ma sarà responsabilità del progettista scegliere lo stato limite più consono in base alla tipologia di progetto.

Stati 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 3.1 - D.M. 14-01-2008 Probabilità di superamento P_{VR} al variare dello stato limite considerato

Operatività (SLO):

Probabilità di superamento:	81	%
Tr:	30	[anni]
ag:	0,034	g
Fo:	2,525	
Tc*:	0,250	[s]

Danno (SLD):

Probabilità di superamento:	63	%
Tr:	50	[anni]
ag:	0,041	g
Fo:	2,549	
Tc*:	0,279	[s]

Salvaguardia della vita (SLV):

Probabilità di superamento:	10	%
Tr:	475	[anni]
ag:	0,101	g
Fo:	2,582	
Tc*:	0,298	[s]

Prevenzione dal collasso (SLC):

Probabilità di superamento:	5	%
Tr:	975	[anni]
ag:	0,129	g
Fo:	2,606	
Tc*:	0,299	[s]

Coefficienti Sismici

SLO:

Ss:	1,500
Cc:	1,660
St:	1,000
Kh:	0,010
Kv:	0,005
Amax:	0,504
Beta:	0,200

SLD:

Ss:	1,500
Cc:	1,600
St:	1,000
Kh:	0,012
Kv:	0,006
Amax:	0,604
Beta:	0,200

SLV:

Ss:	1,500
Cc:	1,570
St:	1,000

Kh: 0,036
Kv: 0,018
Amax: 1,483 (**Amax/g=0,151**)
Beta: 0,240

SLC:

Ss: 1,500
Cc: 1,560
St: 1,000
Kh: 0,046
Kv: 0,023
Amax: 1,897
Beta: 0,240

Le coordinate espresse in questo file sono in ED50
Geostru software - www.geostru.com

Magnitudo di progetto

La zonizzazione sismica ZS9 pone come magnitudo attesa massima nella zona sismogenetica 912 il valore di $M = 6,14$, i terremoti storici in questa area allo studio sono decisamente più bassi, Durante gli eventi del maggio 2012 si sono liberate energie sismiche sulla dorsale ferrarese con magnitudo di 5,9 (che è stato stimato da Picotti, 2013, come evento con T_R di 1000 anni).

Autorevoli studi hanno stabilito per la zona comacchiese magnitudo attese comprese tra 5.0 e 5.3 (Facciorusso-Vannucchi, 2009, Rivista italiana di geotecnica, Anno XLII, n°2) riportati in **FIGURA 3.5**.

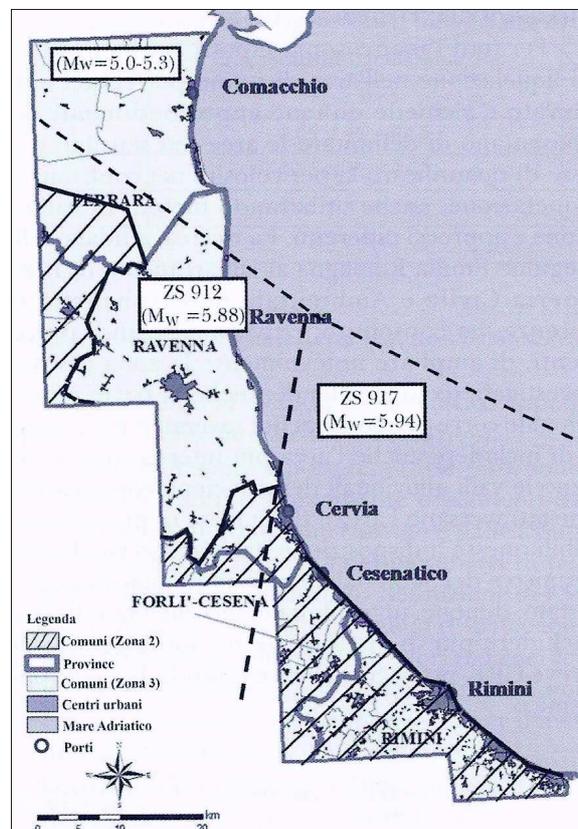


FIGURA 3.5 – Definizione della magnitudo attesa M_w e classificazione dei comuni ivi ricadenti secondo la classificazione sismica nazionale (Facciorusso-Vannucchi, 2009, Rivista italiana di geotecnica, Anno XLII, n°2)

Cautelativamente si adotterà:

Magnitudo di progetto
M = 5,5 Mw

Nella **FIGURA 3.6** sono riportati i sismi che hanno colpito la provincia di Ferrara in tempi storici relativamente recenti.

Comune	Lat.	Lon.	lmax	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	44.74516	11.94085	8	5,6
POGGIO RENATICO	44.76571	11.48392	8	5,6
PORTOMAGGIOR	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
Mw=0,430lmax+2.182				

FIGURA 3.6 - Sismi che hanno colpito la provincia di Ferrara in tempi storici relativamente recenti

3.2. VERIFICA DELLA RESISTENZA ALLA LIQUEFAZIONE DELLE SABBIE

L'obiettivo della riduzione del rischio sismico passa anche per l'analisi delle componenti territoriali che possono innescare fenomeni negativamente impattanti con le strutture antropiche e la loro sicurezza. Vale comunque 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 non si verificherà un sisma con energia sufficiente ad indurre liquefazione.

In particolare vengono ritenuti motivi di esclusione dalla verifica a liquefazione, la verifica di almeno una di queste circostanze:

1. Eventi sismici attesi di magnitudo di momento Mw inferiore a 6 e durata inferiore a 15 sec. ("La Liquefazione del terreno in condizioni sismiche" – Crespellani, Nardi, Simoncini – Zanichelli 1988).
2. Accelerazioni massime attese al piano campagna in condizioni *free-field* minori di 0,1g;
3. Accelerazioni massime al piano campagna in condizioni *free-field* minori di 0,15g e terreni con caratteristiche ricadenti in una delle tre seguenti categorie:

- frazione di fine, FC, superiore al 20%, con indice di plasticità PI>10;
- $FC \geq 35\%$ e resistenza $(N_1)_{60} > 20$;
- $FC \leq 5\%$ e resistenza $(N_1)_{60} > 25$

Dove $(N_1)_{60}$ è il valore normalizzato della resistenza penetrometrica della prova SPT.

4. Distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella **FIGURA 3.7** da distinguere i materiali in funzione del coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ o $U_c > 3,5$.
5. Profondità media stagionale della falda superiore ai 15m dal piano campagna.

6. Copertura di strati superficiali non liquefacibili con spessore maggiore di 3m, oppure con spessore maggiore di 5m per magnitudo maggiori di $M > 7$.

7. Un ulteriore motivo di esclusione dalla verifica di liquefazione è dato dal valore della **densità relativa** D_r del deposito. Gibbs ha eseguito diversi studi su risultati di vari autori stabilendo che una densità relativa pari a 70% è valore limite tra terreni liquefacibili e non liquefacibili (*“Manuale di geotecnica per l’ingegneria civile”* di Nunziante Marino, Maggioli Editore, 2006), di conseguenza tutti i terreni con $D_r > 70\%$ vengono automaticamente esclusi dalla verifica alla liquefazione.

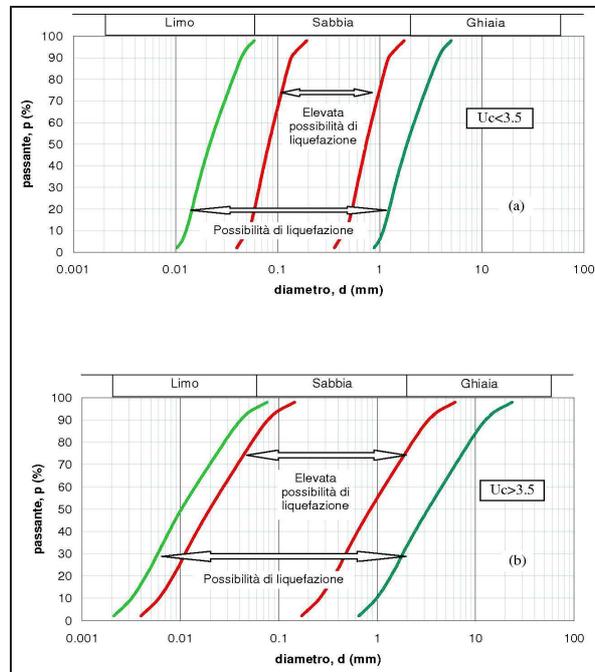


FIGURA 3.7 - Fasce granulometriche per la valutazione preliminare della suscettibilità alla liquefazione di un terreno

Il D.M. 14/01/2008 ha riassunto in questi 5 punti i casi in cui non è prevista liquefazione:

7.11.3.4.2 Esclusione della verifica a liquefazione

La verifica a liquefazione può essere omessa quando si manifesti almeno una delle seguenti circostanze:

1. eventi sismici attesi di magnitudo M inferiore a 5;
2. accelerazioni massime attese al piano campagna in assenza di manufatti (condizioni di campo libero) minori di 0,1g;
3. profondità media stagionale della falda superiore a 15 m dal piano campagna, per piano campagna sub-orizzontale e strutture con fondazioni superficiali;
4. depositi costituiti da sabbie pulite con resistenza penetrometrica normalizzata $(N_1)_{60} > 30$ oppure $q_{c1N} > 180$ dove $(N_1)_{60}$ è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche dinamiche (Standard Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa e q_{c1N} è il valore della resistenza determinata in prove penetrometriche statiche (Cone Penetration Test) normalizzata ad una tensione efficace verticale di 100 kPa;
5. distribuzione granulometrica esterna alle zone indicate nella Figura 7.11.1(a) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c < 3,5$ ed in Figura 7.11.1(b) nel caso di terreni con coefficiente di uniformità $U_c > 3,5$.

In tutte le aree del comune di Comacchio in cui si sono rinvenute sabbie predisposte alla liquefazione per via della loro composizione granulometrica, le analisi effettuate dallo scrivente hanno dimostrato che, per Magnitudo inferiori o uguali a 5,5, non si verifica la liquefazione in quanto vengono a mancare le condizioni scatenanti, pur in presenza dei caratteri predisponenti.

Si forniscono di seguito i risultati di un articolo pubblicato sull'*Italian Geotechnical Journal*, più precisamente sull'edizione n. 2 del 2009. L'articolo dal titolo "Esempi di valutazione del potenziale di liquefazione su scala regionale secondo l'approccio deterministico e probabilistico" è stato redatto da Johann Facciorusso e da

Giovanni Vannucci (docente dell'università di Firenze) e riporta come risultato finale dello studio la Mappa areale della pericolosità di liquefazione **FIGURA 3.8** e la Mappa areale della probabilità di liquefazione **FIGURA 3.9**.

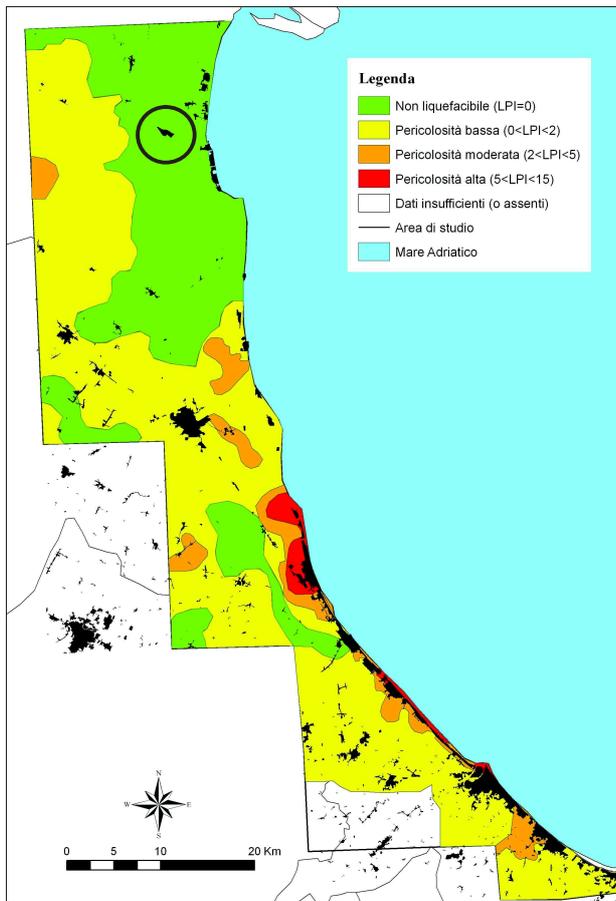


FIGURA 3.8 - Mappa "areale" della pericolosità di liquefazione

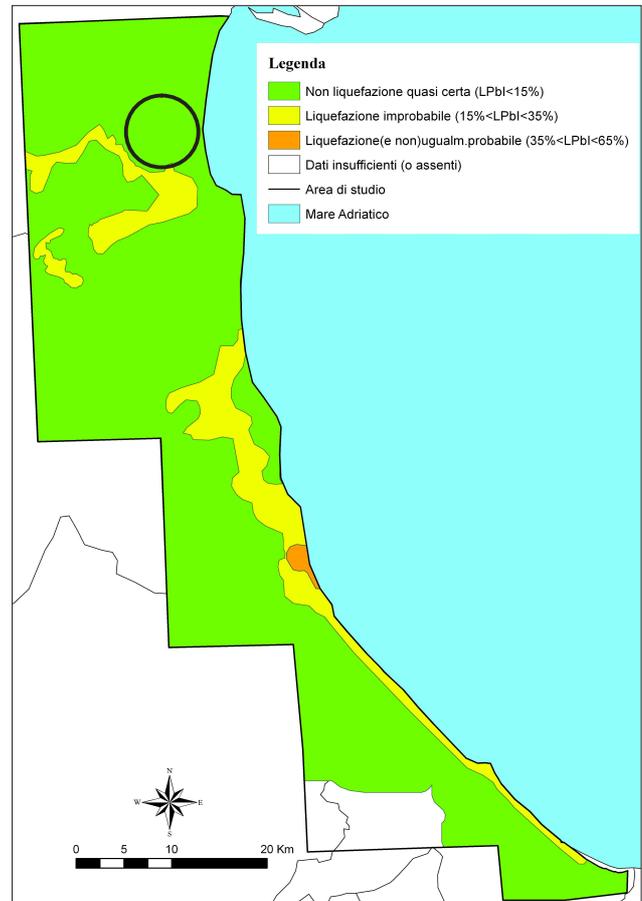


FIGURA 3.9 - Mappa "areale" della probabilità di liquefazione

Dall'analisi delle Mappe sopra riportate si può desumere che l'area di interesse presenta una pericolosità di liquefazione pari a 0, anche la stima della probabilità di liquefazione è praticamente nulla (la non liquefazione è quasi certa); in seguito a queste considerazioni si può perciò affermare che i terreni oggetto di studio non sono liquefacibili.

Comunque a scopo cautelativo il calcolo del potenziale di liquefazione viene comunque eseguito.

Per la verifica della liquefazione delle sabbie è stato utilizzato un software di calcolo che analizzando ogni strato da 2 cm individuato dalla prova CPTU, ne verifica la potenzialità di liquefazione.

Ai fini del calcolo sono state considerate le 2 prove penetrometriche statiche con punta elettrica e piezocono SCPTU1 e CPTU2 spinte rispettivamente fino alla profondità di -31,00 m da p.c. e -20,00 m da p.c. con rif. U21-16.

Per questo calcolo si è considerata una magnitudo di 5,50 e un'accelerazione di progetto di 0,15g.

Utilizzando i dati di input visualizzati in **FIGURA 3.10**, se ne deduce che nell'area di studio il fenomeno della liquefazione è un effetto di sito atteso per gli strati sabbiosi rilevati con le prove eseguite in sito.